

Вінницький національний технічний університет
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ІВАНЧУК ЯРОСЛАВ ВОЛОДИМИРОВИЧ

УДК 62-366.1:531.7:822

ДИСЕРТАЦІЯ

**МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ
ГІДРАВЛІЧНИХ ВІБРАЦІЙНИХ І ВІБРОУДАРНИХ МАШИН**

01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи

Технічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

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

_____ Я. В. Іванчук

Науковий консультант – Іскович-Лотоцький Ростислав Дмитрович
заслужений працівник освіти України,
доктор технічних наук, професор,

Вінниця – 2020

АНОТАЦІЯ

Іванчук Я. В. Методи та засоби математичного моделювання гідравлічних вібраційних і віброударних машин. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 01.05.02 «Математичне моделювання та обчислювальні методи». – Вінницький національний технічний університет, Вінниця, 2020.

Дисертація присвячена питанням розробки і дослідження ефективної узагальненої методології ідентифікації процесів функціонування гідравлічних вібраційних і віброударних машин.

Використання гідравлічного вібраційного і віброударного обладнання у різних галузях промисловості дозволяють значно інтенсифікувати протікання ряду технологічних процесів, забезпечити оптимальність параметрів навантаження і одержати результат технологічної обробки з високими якісними параметрами. Наявна нерівномірність споживання і різка зміна потужності в цих машинах, висока частота роботи і невстановлені процеси робочих циклів із множиною робочих параметрів – свідчить про принципову складність математичного опису фізичних процесів динамічних об'єктів, для ефективного дослідження яких доцільним є використання методів і засобів математичного і комп'ютерного моделювання.

Великий вплив на динаміку роботи гідравлічних вібраційних та віброударних машин мають фізичні параметри енергоносія (робоча рідина). Це змушує розробляти математичні моделі на базі штучної динамічної моделі із приведеними коефіцієнтами для коливальної системи, яка в основному є ефективною для систем невисокої розмірності, і описує властивості об'єктів у вузькому діапазоні зміни робочих параметрів. Це веде до неврахування впливу всіх перехідних процесів у гідравлічній ланці, що спричиняє накопичення надлишкових, нереалізованих вібраційною і віброударною системою технологічних рухів. Досвід показує, що ефективним є постановка нової задачі математичного моделювання гідравлічних

вібраційних та віброударних машин в просторово-нестационарній формі, яка вимагає розробки нових більш повних і адекватних математичних моделей.

Використання детермінованого підходу до математичного опису технологічних процесів на основі гідравлічних вібраційних і віброударних машин є необхідним, але далеко недостатнім і суттєво обмежує можливості проектування, тому що не дозволяє досить точно описувати і виявляти множину суттєвих динамічних властивостей технологічно-оброблюваного середовища. Розв'язання цієї задачі лежить в площині побудови нових математичних моделей з використанням методів системного аналізу із застосуванням положень теорії нечіткої логіки, що вимагає розробки нових алгоритмів синтезу виробничих об'єктів в нечіткому середовищі.

У дисертаційній роботі визначено та розв'язано **актуальну науково-прикладну проблему** розроблення єдиної узагальненої методології математичного та комп'ютерного моделювання процесів функціонування гідравлічних вібраційних і віброударних машин з урахуванням особливостей цього класу об'єктів для забезпечення високої ефективності проектування відповідного типу технологічних систем.

Наукова новизна отриманих результатів представлена **науковими положеннями узагальненої методології** математичного моделювання процесів функціонування гідравлічних вібраційних і віброударних машин, яка складається із вперше розроблених і розвинутих методів:

– графо-аналітичного визначення області стійкості роботи генераторів імпульсів тиску, в якому, на відміну від існуючих, застосовується критерій стійкості Гурвіца для лінійного неоднорідного диференціального рівняння третього порядку, як форми представлення математичної моделі руху запірною елемента клапана-пульсатора, що дає змогу визначити енергетичні співвідношення приводу для виникнення різних типів коливальних процесів;

– статистичної лінеаризації, в якому, на відміну від існуючих, застосовуються комплексні амплітуди та інтеграл ймовірностей у вигляді функції Крампа, що

дозволяє розв'язувати лінійні неоднорідні диференціальні рівняння другого порядку коливальних систем у стохастичних математичних моделях гідравлічних віброударних систем за допомогою спектральної форми амплітудно-частотних характеристик, де функції силової взаємодії робочих органів імпульсного привода представляють собою стаціонарний нормальний випадковий процес;

– чисельного моделювання гідродинамічних процесів, який, на відміну від існуючих, представлений в ізопараметрично кінцево-елементному формулюванні на основі дискретного представлення рівняння нерозривності невстановленого руху рідини в інтегральній формі Гріна і модифікації диференціального рівняння Нав'є–Стокса шляхом введення штучної стисненості рідини в диференціальній формі надлишкового тиску, що дає змогу в цілому підвищити точність ідентифікації процесів функціонування гідравлічних вібраційних та віброударних машин.

В основі цих методів лежать вперше розроблені математичні моделі:

– гідравлічних вібраційних та віброударних машин на базі імпульсного привода за допомогою стаціонарної неавтономної коливальної системи зі скінченим ступенем вільності на основі лінійних неоднорідних диференціальних рівнянь другого порядку, в яких, на відміну від існуючих, функція вільного члена представлена у вигляді лінеаризації функції збуджуючої сили як характеристика використовуваного типу привода, а лінеаризовані коефіцієнти виражають як пружні і дисипативні силові зв'язки елементів привода, так і реологічні властивості технологічно оброблюваного середовища, що дає змогу визначати області стійкості роботи даних типів машин;

– вібраційних та віброударних систем, яка, на відміну від існуючих, представлена у формі функції одиничного стрибка Хевісайда та імпульсної перехідної функції у вигляді згортки інтегралу Лапласа від зображення оператора динамічної податливості, яка дозволяє повністю описати процес зміни відносної координати переміщення як у перехідних, так і в установлених режимах руху системи.

Ці математичні моделі базуються на вперше розробленій класифікації типів коливальних систем, яка, на відміну від існуючих, функціонально подана в параметричному вигляді умовами необхідності і достатності виникнення вібраційних та віброударних режимів руху виконавчого органу в поєднанні з інтегральною характеристикою фазової площини системи, що дозволяє синтезувати та ідентифікувати математичні моделі залежно від типу технологічних машин.

Удосконалено математичні моделі динаміки процесів та систем гідравлічних вібраційних та віброударних машин, у формі просторово-нестационарної постановки задачі, на базі систем нелінійних диференціальних рівнянь в частинних похідних Нав'є–Стокса і умови нерозривності для в'язких рідин та інтегральних рівнянь динамічних характеристик рухомих елементів гідроімпульсного привода в поєднанні із основними положеннями теорії пружності і пластичності на базі системи диференціальних рівнянь деформованого тіла, що, на відміну від існуючих, дало змогу в цілому підвищити точність ідентифікації математичних моделей гідравлічних вібраційних та віброударних машин.

Ключовими особливостями такої методології є використання вперше:

– запропонованого критерію визначення типу гідравлічних вібраційних та віброударних систем за їх режимом руху виконавчої ланки, який, на відміну від існуючих, базується на синтезі функцій зовнішньої імпульсної і гармонійної збуджуючих сил із використанням положень теорії стереомеханічного удару на базі лінійного неоднорідного диференціального рівняння другого порядку для консервативних стаціонарних неавтономних коливальних систем, що дає змогу синтезувати та ідентифікувати математичні моделі в залежності від типу визначених систем;

– розробленої математичної моделі системи оцінювання ефективності функціонування технологічних комплексів гідравлічних вібраційних та віброударних машин, яка, на відміну від існуючих, базується на експертних правилах, формалізованих у вигляді нечітких баз знань, що дає змогу визначати

взаємозв'язок між параметрами стану підсистем технологічного комплексу з якісними показниками об'єкта технологічної обробки.

У першому розділі проведено аналіз особливостей гідравлічних вібраційних та віброударних технологічних машин, як об'єктів моделювання. Проведено аналіз відомих методів математичного моделювання технологічних процесів будівельної галузі. Наведено відомі методи і підходи математичного моделювання, пов'язані з технологічним процесом, ідентифікації процесів функціонування досліджуваних об'єктів. Встановлено, що при математичному моделюванні гідравлічних вібраційних та віброударних машин виконується перехід до штучної динамічної моделі із приведеними коефіцієнтами для коливальної системи, що не завжди відповідає реальному фізичному процесу. Такий підхід вимагає узагальнення наукових і методологічних основ а також, створення на базі принципів системного аналізу теорії і практики математичного моделювання робочих процесів гідравлічних вібраційних та віброударних систем.

У другому розділі на основі аналізу взаємозв'язку множин конструктивних параметрів гідравлічних вібраційних та віброударних машин обґрунтовано системний підхід до побудови математичних моделей динамічних процесів та систем. Встановлено закономірності ідентифікації вібраційних та віброударних режимів роботи гідравлічних технологічних машин. Запропоновано класифікацію досліджуваних машин за функціонально вираженими в параметричному вигляді режимами руху виконавчого органу. Розроблено узагальнену методологію побудови математичних моделей гідравлічних вібраційних та віброударних технологічних машин. Висунуті гіпотези стосовно визначення області стійкості роботи генератора імпульсів тиску із застосуванням критерію стійкості Гурвіца.

У третьому розділі обґрунтовано використання просторово-нестационарної постановки задачі для удосконалення математичної моделі динаміки процесів та систем гідравлічних вібраційних та віброударних технологічних машин із використанням основних положень гідродинаміки, в поєднанні із основними положеннями теорії пружності і пластичності твердого тіла та механореологічної феноменології. Удосконалено математичні моделі технологічних процесів:

вібротранспортування, поверхневого ущільнення, руйнування гірської породи і занурення паль. На основі ідентифікації математичних моделей інерційної вібротрамбовки запропоновано підхід до оцінки ефективності функціонування технологічних комплексів із використанням методів системного аналізу і положень теорії нечіткої логіки.

У четвертому розділі розроблено ефективну чисельну методику для розв'язку багатовимірної системи рівнянь нерозривності і Нав'є-Стокса при помірних числах Рейнольдса, яка здатна досить точно описати локальні властивості течій. Різницева схема цього методу дозволяє розраховувати поле течії без використання значень вихору і тиску на твердій поверхні. Обґрунтовано математичний метод чисельного розв'язування рівнянь гідродинаміки для турбулентного режиму руху робочої рідини.

У п'ятому розділі проведено комплексні експериментально-теоретичні дослідження робочих процесів інерційної вібротрамбовки для поверхневого ущільнення ґрунтів, які дозволили розробити методику експериментального дослідження робочих процесів в гідроімпульсному приводі, а також технологічних характеристик оброблюваного середовища, що дозволило виконати порівняльний аналіз із результатами чисельного моделювання. Статистичний аналіз експериментальних даних дозволив визначити оптимальні технологічні параметри режиму роботи пристрою для отримання високих показників середньої щільності та відносного коефіцієнта ущільнення оброблюваного ґрунтового матеріалу.

У шостому розділі розроблено методику моделювання та її застосування до розв'язання прикладних задач. Розроблено методику комп'ютерного моделювання динамічних процесів та систем гідравлічних вібраційних та віброударних машин, на основі інтегровано-розрахункового програмного середовища із використанням технології «клієнт-сервіс». Розроблено рекомендації для проєктних розрахунків головних параметрів генератора імпульсів тиску. Виконано аналіз адекватності та ефективності розроблених математичних моделей.

Практичне значення отриманих результатів. Запропоновано узагальнені методики та засоби комп'ютерного моделювання процесів функціонування

гідравлічних вібраційних і віброударних машин, які базуються на основі системи підтримки прийняття рішень, яка автоматизує найбільш трудомісткі операції інтелектуальної діяльності при визначенні оцінки ефективності функціонування технологічних комплексів на базі гідравлічних вібраційних і віброударних машин. Особливістю системи є те, що вона дозволяє проводити ранжування станів технологічної системи, здійснювати аналіз чутливості прийнятого рішення до варіації початкових даних та проводити збір, обробку й зберігання діагностичної інформації; інтегровано-розрахункового програмного середовища із використанням окремих програмних комплексів із застосуванням технології «клієнт-сервер», які реалізують відповідний чисельно-розрахунковий метод розв'язання математичних моделей із використанням методів імітаційного моделювання. Розроблено методику експериментального дослідження робочих процесів в гідроімпульсному приводі, а також технологічних характеристик оброблюваного середовища, яка дозволяє виконувати порівняльний аналіз із результатами чисельного моделювання, щоб отримати більш точну картину роботи гідравлічних вібраційних і віброударних технологічних машин і визначати адекватність розроблених математичних моделей. На основі результатів математичного моделювання розроблено методику проектного розрахунку імпульсного приводу вібраційних та віброударних машин, за допомогою якої був спроектований і виготовлений дослідний зразок генератора імпульсів тиску.

Ключові слова: вібрації, ударне навантаження, синтез, гідроімпульсний привід, математична модель, ідентифікація, нечіткі множини, диференціальні рівняння, рівняння Нав'є-Стокса, функція належності.

ABSTRACT

Yaroslav Ivanchuk. Methods and Tools for Mathematical Modeling of Hydraulic Vibrating and Vibro-Impact Machines. – Qualified scientific work on the right of the manuscript.

Thesis for a scientific degree of Doctor of Engineering in the specialty 01.05.02 «Mathematical Modelling and Computation Methods». – Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, 2020.

The dissertation is devoted to the development and research of an effective generalized methodology for identifying the functioning processes of hydraulic vibrating and vibro-impact machines.

The use of hydraulic vibrating and vibration-shock equipment in various industries can significantly intensify the flow of a number of technological processes. This ensures the optimum load parameters and allows to obtain the result of technological processing with high quality parameters. Uneven consumption and a sharp change in power by these machines, a high frequency of operation and unidentified processes of work cycles with many operating parameters indicates the fundamental complexity of the mathematical description of the physical processes of dynamic objects. For their effective research, it is advisable to use the methods and means of mathematical and computer modeling.

The physical parameters of the energy carrier (working fluid) have a great influence on the dynamics of the hydraulic vibrating and vibro-shock machines. This leads to the development of mathematical models based on an artificial dynamic model with reduced coefficients for an oscillatory system. This model is mainly effective for low-dimensional systems, and describes the properties of objects in a narrow range of changes in operating parameters. This leads to neglect of the influence of all transients in the hydraulic link. This leads to the accumulation of excess, unrealized vibrational and vibration-shock system of technological movements. Experience shows that the formulation of the new problem of mathematical modeling of hydraulic vibrating and vibro-shock machines in a spatially unsteady form is effective. This requires the development of new, more complete and adequate mathematical models.

Using a deterministic approach to the mathematical description of technological processes based on hydraulic vibrating and vibro-shock machines is necessary, but far from sufficient. This significantly limits the possibilities of design, as it allows you to accurately describe and identify many of the significant dynamic properties of a technologically processed environment. The solution to this problem lies in the plane of

constructing new mathematical models using methods of system analysis using the provisions of the theory of fuzzy logic. This leads to the development of new algorithms for the synthesis of production facilities in a fuzzy environment.

In the dissertation, the **actual scientific and applied problem** of developing a unified methodology of mathematical and computer modeling of the functioning processes of hydraulic vibrating and vibro-impact machines taking into account the features of this class of objects to ensure high design efficiency of the corresponding type of technological systems is defined and solved.

The scientific novelty of the study is represented by **the scientific provisions of the generalized methodology** of mathematical modeling of the functioning processes of hydraulic vibrating and vibro-impact machines. It consists of first developed and developed methods:

- graph-analytical determination of the stability region of the pressure pulse generator. In it, unlike the existing ones, the Hurwitz stability criterion is used for a linear inhomogeneous differential equation of the third order, as a form of representation of a mathematical model of the movement of the locking element of the pulsating valve. This allows you to determine the energy ratio of the drive for the emergence of various types of oscillatory processes;

- statistical linearization, in which, unlike the existing ones, complex amplitudes and the probability integral are used in the form of the Crump function. This makes it possible to solve linear inhomogeneous differential equations of the second order of oscillatory systems in stochastic mathematical models of hydraulic vibro-shock machines of systems using the spectral shape of the amplitude-frequency characteristics. In them, the functions of the force interaction of the working bodies of a pulse drive are a stationary normal random process;

- numerical simulation of hydrodynamic processes. Unlike the existing ones, it is presented in an isoparametric finite element formulation based on a discrete representation of the continuity equation for the unsteady motion of a weakly compressed fluid in Green's integral form. It is also presented in a modification of the Navier-Stokes differential

equation by introducing artificial compressibility of the liquid in the differential form of overpressure, which allows to generally improve the accuracy of identification of the functioning of hydraulic vibrating and vibro-shock machines.

These methods are based on the first developed one-dimensional mathematical models:

- hydraulic vibrating and vibro-shock machines based on a pulse drive using a stationary non-autonomous oscillatory system with a finite degree of freedom. It is formed on the basis of linear inhomogeneous differential equations of the second order, in which, unlike the existing, the function of the free term is represented as a linearization of the function of the exciting force. It acts as a characteristic of the type of drive used, and linearized coefficients express the elastic and dissipative force connections of the drive elements and the rheological properties of the process medium. This allows you to determine the stability areas of these types of machines;

- vibration and vibration shock systems. It, unlike the existing ones, is presented in the form of the Heaviside unit jump function and the impulse transition function in the form of a convolution of the Laplace integral from the image of the dynamic compliance operator. It allows you to fully describe the process of changing the relative coordinates of movement in transitional and in established modes of movement of the system.

These one-dimensional mathematical models are based on the first developed classification of types of oscillatory systems. It, unlike the existing ones, is functionally expressed in a parametric form by the conditions of necessity and sufficiency of the occurrence of vibrational and vibrational shock modes of movement of the executive body. In combination with the integral characteristic and the type of the phase plane of the system, this allows you to synthesize and identify mathematical models depending on the type of technological machines.

One-dimensional mathematical models of the dynamics of processes and systems of hydraulic vibrating and vibro-impact machines in the form of a spatially unsteady problem statement have been improved. Also improved on the basis of: systems of non-linear partial differential equations of Navier-Stokes and continuity conditions for weakly

compressed viscous liquids, and integral equations of dynamic characteristics of moving elements of a hydro-pulse drive. They are combined with the basic principles of the theory of elasticity and plasticity based on a system of differential equations of a deformed body. Unlike the existing ones, this made it possible to generally increase the accuracy of identification of mathematical models of hydraulic vibrating and vibro-impact machines.

A key feature of this methodology is the use for the first time:

- the proposed criterion for determining the type of hydraulic vibrating and vibration-shock systems with their mode of movement of the executive link. Unlike the existing ones, it is based on the synthesis of the functions of an external pulsed and harmonious exciting forces. He uses the theory of stereomechanical shock based on a linear non-uniform second-order differential equation for conservative stationary non-autonomous oscillatory systems. This allows you to synthesize and identify mathematical models depending on the type identified with the system;

- the developed mathematical model of a system for evaluating the effectiveness of the operation of technological complexes of hydraulic vibrating and vibro-impact machines. Unlike existing ones, it is based on formalized in the form of fuzzy knowledge bases, expert rules. This allows you to determine the relationship between the state parameters of the subsystems of the complex with quality indicators of the object of technological processing.

The first chapter. The first chapter analyzes the characteristics of hydraulic vibrating and vibration-shock technological machines as objects of modeling. The analysis of the known methods of mathematical modeling of technological processes in the construction industry is carried out. The well-known methods and approaches of mathematical modeling related to the technological process, the identification of the functioning processes of the studied objects are given. It is established that in the mathematical modeling of hydraulic vibrating and vibro-shock machines, a transition to an artificial dynamic model with reduced coefficients for the oscillatory system is performed. But this does not always correspond to a real physical process. This approach requires a generalization of scientific and methodological foundations, as well as the creation, on the

basis of the principles of system analysis, theory and practice of mathematical modeling of the working processes of hydraulic vibration and shock systems.

In the second chapter, based on an analysis of the relationship between the sets of design parameters of hydraulic vibrating and vibro-shock machines, a systematic approach to constructing mathematical models of dynamic processes and systems is substantiated. The patterns of identification of vibrational and vibration-shock modes of operation of hydraulic technological machines are established. The proposed classification of the studied machines according to the functionally expressed in the parametric form of the movement modes of the executive body. A generalized methodology for the construction of mathematical models of hydraulic vibrating and vibration-shock technological machines has been developed. Hypotheses are put forward regarding the determination of the stability region of the pressure pulse generator using the Hurwitz stability criterion.

The third chapter substantiates the use of a spatially non-stationary formulation of the problem to improve the mathematical model of the dynamics of processes and systems of hydraulic vibrating and vibration-shock technological machines. The basic principles of hydrodynamics are used, in combination with the basic principles of the theory of elasticity and plasticity of a solid body and mechanorheological phenomenology. Improved mathematical models of technological processes: vibrotransportation, surface compaction of soil, destruction of rock and piling. Based on the identification of mathematical models of inertial vibratory rammers, an approach to assessing the effectiveness of the operation of technological complexes using the methods of system analysis and the provisions of the theory of fuzzy logic is proposed.

In the fourth chapter, an effective numerical technique is developed for solving the multidimensional system of continuity and Navier-Stokes equations at moderate Reynolds numbers. It is capable of accurately describing the local properties of flows. The difference scheme of this method allows calculating the flow field without using the values of the vortex and pressure on a solid surface. A mathematical method is justified for numerically solving the equations of hydrodynamics for a turbulent regime of movement of a working fluid.

In the fifth chapter, comprehensive experimental and theoretical studies of the inertial vibratory rammer working processes for surface compaction of soils are carried out. This allowed us to develop a methodology for the experimental study of working processes in a hydraulic drive, as well as the technological characteristics of the medium being treated. This allowed us to perform a comparative analysis with the results of numerical modeling. Statistical analysis of experimental data made it possible to determine the optimal technological parameters of the device operating mode to obtain high average density and relative compaction coefficient of the processed soil material.

The sixth chapter is devoted to the development of a modeling technique and its application to solving applied problems. A technique for computer modeling of dynamic processes and systems of hydraulic vibrating and vibro-impact machines has been developed. It is based on the use of an integrated settlement software environment using the “client-service” technology. Recommendations are developed for design calculations of the main parameters of the pressure pulse generator. The analysis of the adequacy and efficiency of the developed mathematical models.

Practical value of the obtained results. The proposed generalized methods and means of computer simulation of the functioning of hydraulic vibrating and vibro-impact machines. They are based on a decision support system. This system automates the most labor-intensive operations of intellectual activity when determining the effectiveness of the operation of technological complexes based on hydraulic vibrating and vibro-impact machines. Feature of the system: it allows ranking the states of the technological system; carry out sensitivity analysis of the decision made in the variation of the source data and collect, process and store diagnostic information; Also based on an integrated computing environment. It uses separate software systems using the client-service technology. These complexes implement the corresponding numerical calculation method for solving mathematical models using simulation methods. The technique of experimental research of working processes in the hydraulic drive, as well as the technological characteristics of the processing medium, is developed. It allows you to perform a comparative analysis with the results of numerical simulations in order to get a more accurate picture of the operation of hydraulic vibrating and vibration-shock technological machines. It also allows you to

determine the adequacy of the developed mathematical models. Based on the results of mathematical modeling, a design methodology for calculating the pulse drive of vibrating and vibro-impact machines has been developed. Using it, a prototype pressure pulse generator was designed and manufactured.

Key words: vibrations, shock load, synthesis, hydro-pulse drive, mathematical model, identification, fuzzy sets, differential equations, Navier-Stokes equations, membership function.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:

[1] Р. Д. Іскович-Лотоцький, та Я. В. Іванчук, «Гідроударник», *МПК Е 21 В1/00, № 10469*, Лист. 15, 2005.

[2] Р. Д. Іскович-Лотоцький, Я. В. Іванчук, та О. В. Околюшко, «Пристрій для розвантаження і очищення кузова пікорозтрушувальної машини», *МПК В 65 G 67/32, № 45423*, Жовт. 10, 2009.

[3] Р. Д. Іскович-Лотоцький, та Я. В. Іванчук, «Вібродарний пристрій для розвантаження кузовів самоскидів», *Вібрації в техніці і технологіях*, № 4(56), с. 14–17, 2009.

[4] Р. Д. Іскович-Лотоцький, та Я. В. Іванчук, «Аналіз використання гідроімпульсних вібророзвантажувальних пристроїв на автомобільному транспорті», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 6, с. 228–231, 2011.

[5] Р. Д. Іскович-Лотоцький, та Я. В. Іванчук, «Застосування гібридного моделювання при розробці установок для утилізації відходів», *Технологічні комплекси. Науковий журнал*, Луцьк, № 1,2(5, 6), с. 122–126, 2012.

[6] Р. Д. Іскович-Лотоцький, та Я. В. Іванчук, *Вібраційні та вібродарні пристрої для розвантаження транспортних засобів*. Монографія. Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2012.

[7] Р. Д. Іскович-Лотоцький, І. В. Севостьянов, Я. В. Іванчук, та В. С. Любин, «Визначення робочих параметрів гідроімпульсного вібропреса для потокового

віброударного зневоднення вологих дисперсних матеріалів», *Промислова гідравліка і пневматика*, № 4(38), с. 57–65, 2012.

[8] Р. Д. Іскович-Лотоцький, Я. В. Іванчук, та Я. П. Веселовський, «Дослідження напружено-деформованого стану кузова автомобіля-самоскида при віброударному розвантаженні вантажу», *Машинознавство*. Львів, № 9–10, с. 51–55, 2012.

[9] І. В. Севостьянов, та Я. В. Іванчук, «Реологічні моделі та рівняння вологих дисперсних матеріалів під час їх віброударного інерційного навантаження», *Вісник НТУУ «КПІ». Серія Машинобудування*, № 65, с. 63–70, 2012.

[10] І. В. Севостьянов, та Я. В. Іванчук, «Теоретические исследования процессов потокового фильтрования влажных дисперсных сред в пищевой промышленности», *MOTROL. Commission of motorization and energetics in agriculture*, № 15(4), с. 90–96, 2013.

[11] Р. Д. Іскович-Лотоцький, Я. В. Іванчук, та Є. І. Івашко, «Моделювання процесу теплообміну в шпindelьному вузлі установки для розпилення вольфраму», *Вісник східноукраїнського національного університету ім. В. Даля*. Ч.1. Луганськ, № 2(191), с. 63–68, 2013.

[12] Р. Д. Іскович-Лотоцький, Н. Р. Веселовська, Я. В. Іванчук, Є. І. Івашко, Я. П. Веселовський, «Гібридне моделювання вузлів установки для розпилення порошків металів», у *Міжвузівський збірник наукових праць «НАУКОВІ НОТАТКИ»*. Луцьк, № 41(2), с. 40–44, 2013.

[13] Р. Д. Іскович-Лотоцький, Я. В. Іванчук, та Є. І. Івашко, «Ущільнення шпindelьного вузла», *МПК F 16 G 15/447, № 89403*, Квіт. 25, 2014.

[14] Р. Д. Іскович-Лотоцький, Я. В. Іванчук ЯВ, та Я. П. Веселовський, «Застосування гібридного моделювання при розробці гідроімпульсного привода віброударного пристрою для розвантаження кузовів–самоскидів транспортних засобів», *Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту*. Харків, № 148(1), с. 95–101, 2014.

[15] Р. Д. Іскович-Лотоцький, Я. В. Іванчук, та Я. П. Веселовський, «Основи резонансно-структурної теорії віброударного розвантаження транспортних засобів»,

Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна, Д., № 5(53), с. 109–118, 2014. doi: 10.15802/stp2014/30458.

[16] Р. Д. Іскович-Лотоцький, В. П. Міськов, та Я. В. Іванчук, «Математичне моделювання робочих процесів інерційного вібропрес-молота з електрогідравлічною системою керування гідроімпульсного привода для формоутворення заготовок з порошкових матеріалів», *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки*, № 3(237), с. 176–180, 2016.

[17] Р. Д. Іскович-Лотоцький, Я. В. Іванчук, та Я. П. Веселовський, «Оптимізація конструктивних параметрів інерційного вібропрес-молота», *Вісник машинобудування та транспорту*, № 2, с. 43–50, 2016.

[18] R. D. Iskovych-Lototsky, Y. V. Ivanchuk, and Y. P. Veselovsky, “Simulation of working processes in the pyrolysis plant for waste recycling”, *Eastern–European Journal of Enterprise Technologies. Engineering technological systems*, № 1,8(79), с. 11–20, 2016. doi: 10.15587/1729-4061.2016.59419.

[19] R. D. Iskovych-Lototsky, O. V. Zelinska, Y. V. Ivanchuk, and N. R. Veselovska, “Development of the evaluation model of technological parameters of shaping workpieces from powder materials”, *Eastern–European Journal of Enterprise Technologies. Engineering technological systems*, № 1,1(85), с. 9–17, 2017. doi: 10.15587/1729-4061.2017.59418.

[20] Р. Д. Іскович-Лотоцький, Я. В. Іванчук, та Я. П. Веселовський, «Моделювання робочих процесів гідроімпульсного привода з однокаскадним клапаном пульсатором», *Вібрації в техніці та технологіях*. Вінниця, № 3(86), с. 10–19, 2017.

[21] Р. Д. Іскович-Лотоцький, Я. В. Іванчук, та О. В. Зелінська, *Технологія моделювання оцінки параметрів формоутворення заготовок з порошкових матеріалів на вібропресовому обладнанні з гідроімпульсним приводом*: монографія. Вінниця: ВНТУ, 2018.

[22] Н. Р. Веселовська, О. В. Зелінська, та Я. В. Іванчук, «Загальні принципи побудови і дослідження детермінованих моделей вібраційних та віброударних

машин з гідроімпульсним приводом», *Вібрації в техніці та технологіях*. Вінниця, № 4(91), с. 21–28, 2018.

[23] Я. В. Іванчук, «Математичний метод визначення стійкості коливальних систем під дією зовнішнього вібраційного навантаження», *Технічні науки та технології: науковий журнал*. Чернігів. нац. техн. ун-т. Чернігів: ЧНТУ, № 2(12), с. 25–33, 2018. doi:10.25140/2411-5363-2018-2(12)-25-33.

[24] Я. В. Іванчук, «Математичне моделювання технологічного процесу руйнування гірської породи віброударним пристроєм з гідроімпульсним приводом», у *Праці Одеського політехнічного університету*. Одеса, № 3(56), с. 5-18, 2018. doi:10.15276/opus.3.56.2018.01.

[25] Я. В. Іванчук, Р. Д. Іскович-Лотоцький, І. В. Коц, та І. В. Севостьянов, «Математичне моделювання технологічного процесу завантаження судна вібраційним конвеєром», *Судостроение и морская инфраструктура*, № 2(10), с. 81–92, 2018. doi:10.15589/SMI20180208.

[26] Р. Д. Іскович-Лотоцький, Я. В. Іванчук, та Є. І. Івашко, «Дослідження параметрів процесу формоутворення заготовок з порошкових матеріалів на вібропресовому обладнанні», *Вісник НТУ «ХПІ»*. Серія: *Нові рішення в сучасних технологіях*. Харків: НТУ «ХПІ», № 9(1285), с. 31-37, 2018. doi: 10.20998/2413-4295.2018.09.04.

[27] Р. Д. Іскович-Лотоцький, Я. В. Іванчук, та Є. О. Кобилянський, «Вібраційне та віброударне навантаження при механічних випробуваннях деталей та вузлів машин», *Сучасні технології в машинобудуванні, транспорті та будівництві*. *Вісник кременчуцького національного університету ім. М. Остроградського*. Ч.1. Кременчук, № 2(109), с. 60 – 65, 2018. doi: 10.30929/1995-0519.2018.2.

[28] Р. Д. Іскович-Лотоцький, Я. В. Іванчук, та Я. П. «Веселовський, «Моделювання процесу оброблення дрібнодисперсних деревинних матеріалів під дією вібраційного і віброударного навантаження», *Науковий вісник НЛТУ України: збірник наукових праць*. Львів, № 28(5), с. 124-129, 2018. doi: 10.15421/40280526.

[29] Р. Д. Іскович-Лотоцький, І. В. Коц, Я. В. Іванчук, та Є. І. Івашко, «Моделювання руху двомасового вібраційного живильника на базі гідроімпульсного

привода», у *Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*. Кропивницький: КНТУ, № 31, с. 3–9, 2018.

[30] Р. Д. Іскович-Лотоцький, Я. В. Іванчук, та Є. І. Івашко, «Математичне моделювання зусилля на робочому органі вібротолота з гідроімпульсним приводом», *Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини: збірник наукових праць Київського національного університету будівництва і архітектури*. Київ, № 91(2018), с. 5–12, 2018. doi: 10.26884/gbdmm1891.0101.

[31] Я. В. Іванчук, “Mathematical modeling for the technological process of surface soil compaction by the inertial vibratory rammer”, *Збірник наукових праць. Серія: Галузеве машинобудування, будівництво*. Полтава: ПолтНТУ, № 1(52), с. 15–24, 2019. doi:10.26906/znp.2019.52.1666.

[32] Н. Р. Веселовська, О. В. Зелінська, О. Ф. Гнатюк, та Я. В. Іванчук, «Моделювання робочих режимів вібраційних та віброударних машин», *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. Вінниця, № 1(104), с. 56–63, 2019.

[33] Я. В. Іванчук, А. А. Яровий, та К. О. Коваль, «Метод чисельного моделювання гідродинамічних процесів», *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*. Вінниця, № 1(44), с. 37–45, 2019.

[34] Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 85540. «Комп'ютерна програма ”Розрахунок зусилля на повздовжніх тягах трьохточкової навіски”» / Р. С. Белзецький, Я. В. Іванчук, А. В. Корпало (Україна); Міністерство економічного розвитку і торгівлі України. – Дата реєстрації 08.02.2019 р.

[35] R. Iskovich-Lototsky, I. Kots, Y. Ivanchuk, Y. Ivashko, K. Gromaszek, A. Mussabekova, and M. Kalimoldayev, “Terms of the stability for the control valve of the hydraulic impulse drive of vibrating and vibro-impact machines”, *Przeglad Elektrotechniczny*, vol. 4, no. 19, pp. 19-23, 2019. doi: 10.15199/48.2019.04.04.

[36] Р. Д. Іскович-Лотоцький, Я. В. Іванчук, О. Д. Манжілевський, та І. В. Севостьянов, «Навісний віброударний пристрій з гідравлічним приводом для занурення паль», *МПК E02D 7/00, №141392*, Квіт. 10, 2020.

Наукові праці апробаційного характеру:

[37] Р. Д. Іскович–Лотоцький, Я. В. Іванчук, та Б. В. Крижанівський, «Застосування віброударного гідроімпульсного приводу для розвантаження транспортних засобів», на *Міжнародна студентська наукова конференція «Прогресивні напрямки розвитку машино–приладобудівних галузей і транспорту»*, Севастополь: СевНТУ, 2010, с. 56–58.

[38] Р. Д. Іскович–Лотоцький, Я. В. Іванчук, та Я. П. Веселовський, «Дослідження напружено-деформованого стану кузова автомобіля-самоскида при віброударному розвантаженні вантажу», на *3–ій Міжнародній науково–технічній конференції «Теорія та практика раціонального проектування, виготовлення і експлуатації машинобудівних конструкцій»*, Львів: КІНПАТРИ ЛТД, 2012, с. 118.

[39] Р. Д. Іскович–Лотоцький, Я. В. Іванчук, Я. П. Веселовський, та В. І. Повстенюк, «Піролізна установка утилізації медичних відходів з додатковим очищенням атмосферних викидів», на *II Всеукраїнська міжвузівська науково–технічна конференція «Сучасні технології в промисловому виробництві»*: матеріали у трьох частинах, Суми: СумДУ, 2012, с. 97–98.

[40] Р. Д. Іскович–Лотоцький, І. В. Севостьянов, Я. В. Іванчук, та В. С. Любин, «Визначення робочих параметрів гідроімпульсного вібропреса для потокового віброударного зневоднення вологих дисперсних матеріалів», на *XVII Міжнародна науково–технічна конференція «Гідроаеромеханіка в інженерній практиці»*, Черкаси: АПБ ім. Героїв Чернобиля, 2012, с. 140.

[41] Р. Д. Іскович–Лотоцький, Н. Р. Веселовська, Я. В. Іванчук, та Я. П. Веселовський, «Розрахунок температурних полів в робочих зонах піролізної установки», на *IV Міжнародна науково–практична конференція «Теоретичні і експериментальні дослідження в технологіях сучасного матеріалознавства та машинобудування»*, Луцьк: Луцький національний технічний університет, 2013, с. 113-119.

[42] Р. Д. Іскович–Лотоцький, та Я. В. Іванчук, «Оптимізація параметрів віброзбуджувача гідроімпульсних приводів», на *XIV Міжнародній науково–технічній конференції АС ПГП «Промислова гідравліка і пневматика»*, Одеса, Вінниця: «ГЛОБУС-ПРЕС», 2013, с. 101.

[43] Р. Д. Іскович–Лотоцький, Я. В. Іванчук, та Я. П. Веселовський, «Моделювання робочих процесів віброударного пристрою для розвантаження кузовів–самоскидів транспортних засобів», на *Міжнародна науково–технічна інтернет–конференція «Гідро– та пневмоприводи машин–сучасні досягнення та застосування»*, Вінниця: ВНТУ, 2014, с. 54–55.

[44] Р. Д. Іскович–Лотоцький, Я. В. Іванчук, та Я. П. Веселовський, «Застосування гібридного моделювання при розробці гідроімпульсного привода віброударного пристрою для розвантаження кузовів–самоскидів транспортних засобів», на *Міжнародна науково–технічна інтернет–конференція «Нові технології, обладнання, матеріали в будівництві і на транспорті»*, Харків: «Влавке», 2014, с. 43-45.

[45] Р. Д. Іскович–Лотоцький, Я. В. Іванчук, та Є. І. Івашко, «Перспективні напрямки ґрунтоущільнювальних машин», на *75 Міжнародна науково–практична конференція «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту»*, Дніпропетровськ: ДИИТ, 2015, с. 281–282.

[46] Р. Д. Іскович–Лотоцький, Я. В. Іванчук, та Я. П. Веселовський, «Основні теоретичні положення робочих режимів вібраційного та віброударного обладнання з гідроімпульсним приводом», на *II Міжнародна науково–технічна конференція «Гідро– та пневмоприводи машин – сучасні досягнення та застосування»*, Вінниця: Барановська ТП; 2016, с. 95-97.

[47] Я. В. Іванчук, та Я. П. Веселовський, «Моделювання робочих процесів гідроімпульсного привода з однокаскадним клапаном пульсатором», на *XLVI Науково–технічна конференція підрозділів Вінницького національного технічного університету (2017)*, Вінниця: ВНТУ, 2017, с. 3048-3050. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://conferences.vntu.edu.ua/public/files/1/vntu_2017_netpub.pdf.

[48] Р. Д. Іскович–Лотоцький, Я. В. Іванчук, та Є. І. Івашко, «Моделювання робочих процесів гідроімпульсного привода навісного обладнання для зондування ґрунтів», на *XVI Міжнародна науково–технічна конференція «Вібрації в техніці та технологіях»*, Вінниця: ВНТУ, 2017, с. 147-149.

[49] Р. Д. Іскович–Лотоцький, Я. В. Іванчук, та Я. П. Веселовський, «Гібридне моделювання двокаскадного клапана–пульсатора гідроімпульсного привода», на *VII*

Міжнародна науково-практична конференція «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем», Том. 1, Чернігів: ЧНТУ; 2017, с. 195-196.

[50] Р. Д. Іскович-Лотоцький, Я. В. Іванчук, Я. П. Веселовський, та В. В. Снігур, «Інерційний вібропрес-молот», на *XVIII Міжнародна науково-технічна конференція АС ПГП «Промислова гідравліка і пневматика»,* Вінниця: ГЛОБУС-ПРЕС, 2017, с. 87.

[51] Р. Д. Іскович–Лотоцький, І. В. Коц, та Я. В. Іванчук, «Моделювання робочих процесів гідроімпульсного пристрою для руйнування гірських порід», на *XVII Міжнародна науково-технічна конференція «Вібрації в техніці та технологіях»,* Львів: Національний університет «Львівська політехніка»; 2018, с. 58-59.

[52] R. D. Iskovych-Lototsky, Y. V. Ivanchuk, N. R. Veselovska, S. Wojciech, and S. Samat, “Automatic system for modeling vibro-impact unloading bulk cargo on vehicles”, *Proc. SPIE 10808. Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2018*, 1080860, 2018 Oct 1. doi: 10.1117/12.2501526.

[53] R. D. Iskovych-Lototsky, Y. V. Ivanchuk, Y. P. Veselovsky, K. Gromaszek, and A. Oralbekova, “Automatic system for modeling of working processes in pressure generators of hydraulic vibrating and vibro-impact machines”, *Proc. SPIE 10808, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2018*, 1080850, 2018 Oct 1. doi: 10.1117/12.2501532.

[54] Я. В. Іванчук, «Моделювання робочих процесів віброударної установки для руйнування гірських порід», на *XLVII Науково-технічна конференція підрозділів Вінницького національного технічного університету (2018),* Вінниця. Вінниця: ВНТУ, 2018, с. 3628-3630. [Електронний ресурс]. Доступно: https://conferences.vntu.edu.ua/public/files/1/vntu_2018_netpub.pdf.

[55] Я. В. Іванчук, «Математичне моделювання технологічного процесу руйнування гірської породи віброударним пристроєм», на *III Всеукраїнська науково-технічна конференція «Створення, експлуатація і ремонт автомобільного транспорту та будівельної техніки»,* Полтава: Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, 2019, с. 15-20.

[56] Я. В. Іванчук, «Математичний метод чисельного моделювання гідродинамічних процесів», на *Міжнародна науково-практична конференція «Інформаційні технології та комп'ютерне моделювання»*, Івано-Франківськ, 2019, с. 269-272.

[57] Я. В. Іванчук, Р. Д. Іскович-Лотоцький, А. А. Яровий, та К. О. Коваль, «Математичне моделювання технологічного процесу поверхневого ущільнення ґрунтів інерційною вібротрамбовкою», на *I Міжнародна науково-технічна конференція «Перспективи розвитку машинобудування та транспорту – 2019»*, Вінниця: ПП «ГД Едельвейс і К», 2019, с. 241-243.

[58] Р. Д. Іскович-Лотоцький, І. В. Коц, Я. В. Іванчук, та О. Д. Манжілевський, «Навісний інерційний вібромолот», на *III Міжнародній науково-технічній конференції «Гідро- та пневмоприводи машин – сучасні досягнення та застосування»*, Вінниця: ВНТУ, 2019, с. 58-61.

[59] О. Д. Манжілевський, Р. Д. Іскович-Лотоцький, В. Д. Стасюк, Я. В. Іванчук, та А. А. Яровий, «Математичне моделювання робочих процесів пневматичного ударного пристрою», на *I Міжнародній науково-технічній конференції «Перспективи розвитку машинобудування та транспорту – 2019»*, Вінниця: ПП «ГД Едельвейс і К», 2019, с. 252-254.

[60] Я. В. Іванчук, «Математичний метод оцінки технологічних параметрів формоутворення заготовок з порошкових матеріалів», на *Міжнародна науково-практична конференція «Інтелектуальні системи та інформаційні технології»*, Одеса, 2019, с. 77-82.

[61] Я. В. Іванчук, «Математичний метод визначення стійкості коливальних систем під дією зовнішніх віброударних навантажень», на *XVIII Міжнародна науково-технічна конференція «Вібрації в техніці та технологіях»*, Київ, 2019, с. 82-85.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	29
ВСТУП.....	30
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ВІБРАЦІЙНИХ І ВІБРОУДАРНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ МАШИН ТА ЇХ МЕТОДІВ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ.....	45
1.1 Область застосування вібраційних та віброударних технологічних машин.....	45
1.2 Математичні методи моделювання технологічних процесів із застосуванням вібраційних і віброударних технологічних машин.....	52
1.3 Оцінка та аналіз конструктивних та технологічних параметрів вібраційних і віброударних технологічних машин.....	61
1.4 Аналіз аналітичних методів математичного моделювання та розрахунку гідравлічних вібраційних та віброударних технологічних машин	80
1.5 Обґрунтування і вибір напрямку досліджень.....	89
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ТА СИСТЕМ ГІДРАВЛІЧНИХ ВІБРАЦІЙНИХ І ВІБРОУДАРНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ МАШИН.....	95
2.1 Висунення гіпотез стосовно математичного моделювання динамічних процесів та систем гідравлічних вібраційних і віброударних технологічних машин.....	95
2.2 Розроблення методу визначення типу вібраційних та віброударних систем за їх режимом руху виконавчої ланки	98
2.2.1 Вібраційний режим роботи	98
2.2.2 Віброударний режим роботи	101
2.2.3 Розроблення функціональної математичної моделі динаміки вібраційних та віброударних систем	109
2.3 Розроблення методики побудови універсальних математичних моделей гідравлічних вібраційних та віброударних машин.....	117

2.3.1 Побудова універсальних детермінованих математичних моделей гідравлічних вібраційних машин.....	117
2.3.2 Побудова універсальних детермінованих математичних моделей гідравлічних віброударних технологічних машин.....	131
2.3.3 Побудова універсальних стохастичних математичних моделей вібраційних технологічних машин.....	151
2.3.4 Побудова універсальних стохастичних математичних моделей гідравлічних віброударних технологічних машин.....	155
2.4 Розроблення методу визначення області стійкості роботи імпульсних гідравлічних вібраційних і віброударних машин.....	160
2.5 Висновки до розділу 2.....	170
РОЗДІЛ 3. МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ТА СИСТЕМ ГІДРАВЛІЧНИХ ВІБРАЦІЙНИХ І ВІБРОУДАРНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ МАШИН.....	172
3.1 Обґрунтування доцільності математичного моделювання гідравлічних вібраційних та віброударних технологічних машин на базі положень гідродинаміки і механіки твердого тіла.....	172
3.2 Розроблення адекватних математичних моделей гідравлічних вібраційних та віброударних технологічних машин.....	178
3.2.1 Математична модель технологічного процесу транспортування вібраційним конвеєром.....	178
3.2.2 Математична модель технологічного процесу поверхневого ущільнення ґрунтів інерційною вібротрамбовкою.....	191
3.2.3 Математична модель технологічного процесу руйнування гірської породи навісним віброударним пристроєм.....	201
3.2.4 Математична модель технологічного процесу занурення палів навісним віброударним пристроєм.....	215
3.3 Розроблення методики оцінювання ефективності функціонування технологічного комплексу поверхневого ущільнення ґрунтів на базі інерційної вібротрамбовки.....	232

3.4 Висновки до розділу 3.....	245
РОЗДІЛ 4. МАТЕМАТИЧНИЙ МЕТОД ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ГІДРОДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ У СИСТЕМАХ ПРИВОДІВ ГІДРАВЛІЧНИХ ВІБРАЦІЙНИХ ТА ВІБРОУДАРНИХ МАШИН.....	247
4.1 Розроблення методу чисельного розв’язування рівняння нерозривності в диференціальній формі.....	248
4.2 Розроблення методу чисельного розв’язування рівняння Нав’є-Стокса.....	250
4.3 Модифікація математичного методу чисельного розв’язування системи рівнянь гідродинаміки.....	256
4.3.1 Модифікація математичного методу чисельного розв’язування системи рівнянь гідродинаміки для турбулентного режиму руху робочої рідини.....	256
4.3.2 Модифікація математичного методу чисельного розв’язування системи рівнянь гідродинаміки для пристінних шарів робочої рідини.....	260
4.3.3 Модифікація математичного методу чисельного розв’язування руху шарів робочої рідини в області зазору.....	263
4.4 Висновки до розділу 4.....	263
РОЗДІЛ 5. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ І СИСТЕМ ГІДРАВЛІЧНИХ ВІБРАЦІЙНИХ ТА ВІБРОУДАРНИХ МАШИН.....	265
5.1 Розроблення експериментального стенда інерційної вібротрамбовки на базі гідроімпульсного приводу.....	266
5.2 Розроблення методики експериментальних досліджень.....	276
5.3 Експериментальні дослідження закономірностей зміни робочих режимів гідроімпульсного приводу інерційної вібротрамбовки.....	280
5.4 Експериментальні дослідження закономірностей поверхневого ущільнення ґрунтів інерційною вібротрамбовкою.....	289
5.5 Висновки до розділу 5.....	296

РОЗДІЛ 6. РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДИКИ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ЇЇ ЗАСТОСУВАННЯ ДО РОЗВ'ЯЗАННЯ ПРИКЛАДНИХ ЗАДАЧ.....	299
6.1 Розроблення методики комп'ютерного моделювання динамічних процесів і систем гідравлічних вібраційних та віброударних машин	300
6.2 Практична реалізація розроблених математичних моделей динамічних процесів і систем гідравлічних вібраційних та віброударних технологічних машин	306
6.2.1 Аналіз достовірності результатів математичного моделювання	307
6.2.2 Аналіз ефективності результатів моделювання динамічних процесів і систем гідравлічних вібраційних та віброударних технологічних машин	310
6.3 Аналіз адекватності використання розроблених рівнянь гідродинаміки для моделювання режимів течії робочої рідини	314
6.4 Аналіз результатів впровадження дисертаційної роботи.....	319
6.5 Висновки до розділу 6.....	323
ВИСНОВКИ.....	325
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	328
ДОДАТКИ.....	360
Додаток А. Принципові та конструктивні схеми вібраційних і віброударних технологічних машин.....	360
Додаток Б. Організація та реалізація математичної моделі оцінювання стану технологічного комплексу поверхневого ущільнення ґрунтів.....	373
Додаток В. Програмна реалізація математичного методу чисельного моделювання гідродинамічних процесів.....	401
Додаток Г. Результати експериментальних досліджень заготовок із ґрунтових матеріалів.....	426
Додаток Д. Блок-схеми методики комп'ютерного моделювання динамічних процесів та систем гідравлічних вібраційних та віброударних машин.....	431
Додаток Е. САД та CFD моделі гідравлічних вібраційних і віброударних	

технологічних машин та їх компонентів.....	441
Додаток Ж. Параметри математичних моделей для чисельного моделювання у функціонально програмованому середовищі Matlab.Simulink.....	458
Додаток И. Акти впроваджень.....	476
Додаток К. Аналіз результатів комп'ютерного моделювання та адекватності розроблених математичних моделей.....	501
Додаток Л. Розробка методики проектного розрахунку гідроімпульсного приводу вібраційних і віброударних машин та аналіз ефективності розроблених математичних моделей.....	557
Додаток М. Список публікацій за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації.....	570

ВСТУП

Актуальність теми. Використання ГВ і ГВУ обладнання у різних галузях промисловості дозволяє значно інтенсифікувати протікання ряду технологічних процесів [1]–[4], забезпечити оптимальність параметрів навантаження і одержати результат технологічної обробки з високими якісними параметрами [1], [5]. Вид руху і такі робочі характеристики ПП, як частота, амплітуда коливання і робоче зусилля на виконавчій ланці в поєднанні із простотою, надійністю в експлуатації й невисокою металомісткістю, визначає ефективність використання даних вібраційних і ВУ машин для різних технологічних процесів.

Однією із проблем при проектуванні ПП є суттєва нерівномірність споживання потужності через явно виражену імпульсну роботу ГВ та ГВУ машин [6]–[8]. Збільшення миттєвої потужності у визначених умовах дозволяє зменшити масу машини, збільшити її швидкодію і продуктивність. Різка зміна потужності і висока частота, при якій робочий цикл ГВ та ГВУ машин складається із суми невстановлених процесів із множиною робочих параметрів, ускладнює проектування і дослідження даних машин. Аналізуючи неоднозначність динамічних властивостей елементів ПП, необхідно додатково враховувати реологічні властивості оброблюваного середовища [9]–[11], що свідчить про принципову складність математичного опису фізичних процесів. Таким чином, сучасні ГВ та ГВУ машини на базі ПП відносять до складних динамічних об'єктів, для ефективного дослідження яких, доцільним є використання методів і засобів математичного і комп'ютерного моделювання.

Завдяки розробкам технологій на основі гідравлічних і пневматичних вібраційних і ВУ систем основоположниками яких є такі вчені як: О. Д. Алімов [1], С. А. Басов [12], К. В. Фролов [13], А. І. Москвітін [14], К. Н. Шмаргунов [15], Ш. А. Болгожин [16], Б. Г. Гольдштейн [17], С. О. Доброгурський [18], F. K. Arndt [19], R. L. Bullock [20], C. Fairhurst [21], I. E. Sears [11], B. Lundberg [22], J. Meier [23], стало можливим розробка у ВНТУ оригінальних конструкцій вібраційних та ВУ машин на базі ГПП. Основний внесок у розвиток теоретичних основ розрахунку

та розробки технологічних процесів і обладнання на основі ГПП зробили такі відомі вчені України, як І. Б. Матвєєв [24], Р. Д. Іскович-Лотоцький [25], Р. Р. Обертюх [26], В. А. Пішенін [6], І. В. Коц [27], М. М. Вірник [28], І. В. Севостьянов [29] та ін.

У даний час основним апаратом математичного моделювання вібраційних і ВУ процесів є точні методи нелінійної механіки, які ґрунтуються на припасовуванні розв'язків [30], [31], які описують суміжні інтервали рухів виконавчого органу. Ці методи дозволили детально вивчити складну динамічну картину рухів ряду вібраційних та ВУ машин і виявити багато характерних їм фундаментальних властивостей. Отримані в цьому напрямку результати значною мірою відображені у наукових працях Н. Н. Боголюбова [32], Ю. А. Мітропольського [33], В. І. Бабіцького [34], В. Л. Бідермана [35], І. І. Блехмана [36], А. А. Кобринського [37], В. Л. Рагульскене [38], К. Magnus [39], G. Van Shothorst [40], J. D. Loeb [41], S. F. Masri [42], D. M. Egle [43], D. L. Sikarskie [44] та ін. Проте використання даних методів для побудови математичних моделей широкого спектру ГВ та ГВУ систем на базі П є трудомістким і обмежується областю їх застосування особливо при збільшенні розмірності систем, а також при необхідності врахування додаткових нелінійних факторів і ускладненні характеру збурень від дії неперіодичних і випадкових сил.

Загальноприйнятим підходом до моделювання ВУ систем є підхід асимптотичного представлення розв'язків за степенями малого параметру [33], [45] при аналізі основних гармонічних складових коливань. Він базується на виділенні із їхнього загального математичного опису більш простих співвідношень при переході до спектральних представлень [46] і ідей еквівалентної лінеаризації [47], але не дозволяє знайти прийнятну математичну модель для вібраційних систем. Це веде до необхідності розробки нових методів і підходів побудови еталонних математичних моделей ГВ та ГВУ систем для широкого спектра вібраційних і ВУ технологічних машин.

Великий вплив на збільшення швидкодії, енергонасиченості і компактності ГПП для вібраційних та ВУ машин мають фізичні параметри енергоносія (робоча рідина) і конструктивні параметри ГПТ [48], який забезпечує керуванням роботи

таких машин. Це призводить до розробки математичних моделей у формі систем диференціальних рівнянь руху конструктивних елементів ПП, на базі штучної динамічної моделі із приведеними коефіцієнтами для коливальної системи. Приведені коефіцієнти описують пружно-в'язкісні характеристики гідравлічної ланки на базі математичної моделі Кельвіна-Фохта [49] з подальшою лінеаризацією динамічних властивостей, а саме: припущення сталості зведеного модуля пружності, густини і динамічної в'язкості робочої рідини, а це веде безпосередньо до неврахування хвильових процесів [50] у самому ГПП. У свою чергу наявна система диференціальних рівнянь із розподіленими коефіцієнтами доповнюється системою диференціальних рівнянь витрат [51] у формі частинних інтегральних розв'язків диференціальних рівнянь нерозривності і Нав'є–Стокса для ідеальної робочої рідини [52].

Практична реалізація такого підходу можлива лише для математичних моделей в основному невисокої розмірності, і описує властивості об'єктів у вузькому діапазоні зміни таких робочих параметрів, як амплітуда і частота коливання елементів ПП. А це призводить до обмеження області використання результатів математичного моделювання, в яких не врахований вплив усіх перехідних процесів у гідравлічній ланці [53], що веде до накопичення надлишкових, нереалізованих вібраційною і ВУ системами технологічних рухів [54].

Досвід показує, що для подолання зазначених труднощів необхідна постановка нової задачі математичного моделювання ГВ та ГВУ машин в просторово-нестационарній формі, яка вимагає розроблення нових більш повних і адекватних математичних моделей, які засновані на системі диференціальних рівнянь в частинних похідних із коефіцієнтами у формі інтегральних функцій незалежних змінних [55]. Незважаючи на те, що цей підхід вимагає розробки нових ітераційних і варіаційних чисельних методів, такий підхід дозволить: визначати значення тиску і вектора швидкості робочої рідини у векторному просторі системи ПП, аналізувати напружено-деформований стан виконавчих органів вібраційних та ВУ машин. Більше того, сам принцип диференціальної багатозначності дозволяє будувати математичну модель технологічно-оброблюваного середовища за

допомогою феноменологічних моделей [11], [56], що у свою чергу дозволить з більшою точністю визначати: амплітуди і частоту коливань елементів ІІІ, умови виникнення кавітаційних явищ [50], [51], силу взаємодії виконавчого органу із технологічно-оброблюваним середовищем, динамічні характеристики шарів оброблюваного середовища.

Відомо, що виробничі процеси на базі технологічних ГВ та ГВУ машин представляють собою складну систему, в яких традиційний детермінований підхід [57] до математичного опису технологічних процесів є необхідним, але далеко недостатнім і суттєво обмежує можливості проєктування. Наприклад, традиційним є побудова математичних моделей процесів поверхневого вібраційного і ВУ ущільнення ґрунтів на основі феноменологічних моделей у вигляді систем диференціальних рівнянь руху шарів різних типів ґрунту. Проте такий підхід не дозволяє досить точно описувати і виявляти множину суттєвих динамічних властивостей ґрунтової системи, таких як частота власних коливань. Згідно з резонансно-структурною теорією [58], визначення частоти цих автоколивань, дозволяє впливати на шар у фазі із його власними коливаннями, що забезпечує максимальний технологічний ефект. Розв'язання цієї задачі лежить в площині побудови нових математичних моделей використовуючи методи системного аналізу [59], [60] із застосуванням положень теорії нечіткої логіки [22], [61], що веде до розробки нових алгоритмів синтезу виробничих об'єктів в нечіткому середовищі при кількісно вимірних вхідних і нечітких (якісних) вихідних параметрів дослідних зразків технологічно-оброблюваного середовища із застосуванням лінгвістичних термів.

У цілому, незважаючи на певні досягнення, проблеми математичного моделювання вібраційних і ВУ систем без застосування математичних методів припасовування [30], [31], методів лінеаризації параметрів у системі диференціальних рівнянь [62], та припущень про ідеальність енергоносія в системі ІІІ [63], залишаються невирішеними або дослідженими недостатньо. Залишається актуальним питанням про можливість заміни фізичного експерименту чисельним, з використанням методів комп'ютерного моделювання. Існуючий розрив між

теоретичними розробками і можливостями їх використання на практиці є тому підтвердженням.

Тому **актуальною** є науково-прикладна проблема відсутності узагальненої методології математичного та комп'ютерного моделювання процесів функціонування ГВ і ГВУ машин з урахуванням особливостей цього класу об'єктів для забезпечення високої ефективності проєктування відповідного типу технологічних систем.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тематика роботи відповідає вимогам встановленим Законом України «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки» (від 11 липня 2001 року, № 2623-III і 16 січня 2016 року, №848-VIII), у тому числі розділам «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» і «Енергетика та енергоефективність», а також Закону України «Про пріоритетні напрями інноваційної діяльності в Україні» (від 8 вересня 2011 року, № 3715-VI і 5 грудня 2012 року, № 5460-VI), у тому числі розділу «Стратегічний пріоритетний напрям на 2011–2021 роки: освоєння нових технологій транспортування енергії, впровадження енергоефективних, ресурсозберігаючих технологій, освоєння альтернативних джерел енергії». Дисертаційне дослідження проводилося на кафедрах галузевого машинобудування і комп'ютерних наук Вінницького національного технічного університету відповідно до науково-дослідної тематики кафедр згідно з держбюджетними темами №19-Д-331 (номер державної реєстрації 0111U001108) «Теоретичні основи процесів фазового розділення дисперсних матеріалів в полі віброударних інерційних навантажень», строки виконання якої з 01.01.2011 р. по 31.12.2013 р.; №22 К1 «Моделі, методи, технології та пристрої інтелектуальних інформаційних систем управління, економіки, навчання та комунікацій» строки виконання якої з 01.01.2014 р. по 31.12.2018 р., а також згідно з договором про творчу співдружність №19/7 «Модернізація установки для віброобразивної обробки деталей» строки виконання якої з 01.03.2011 р. по

30.07.2012 р. і госпдоговірних тем № 1925 (номер державної реєстрації 01105U004105) «Розробка систем відбору тепла в установках для утилізації відходів» строки виконання якої з 01.03.2010 р. по 30.01.2012 р. і № 1929 (номер державної реєстрації 0115U001155) «Розробка рекомендацій можливості використання віброударних динамічних процесів в механічних системах транспортних розвантажувальних пристроїв» строки виконання якої з 01.03.15 р. по 29.02.16 р., у виконанні яких автор брав безпосередню участь як виконавець.

Метою роботи є підвищення точності ідентифікації процесів у ГВ і ГВУ машин шляхом розроблення і впровадження нових, більш ефективних методів і засобів їхнього математичного і комп'ютерного моделювання. Це дозволить досягти низки якісних практичних результатів: підвищення достовірності визначення робочих характеристик при проєктуванні гідроприводу; можливість розробки систем з покращеними експлуатаційними характеристиками; зменшення часу на відпрацювання деяких технологій тощо.

Для досягнення поставленої мети в дисертаційній роботі необхідно виконати такі науково-технічні **завдання**:

1. Провести оцінку сучасного стану та перспектив розвитку проблеми математичного моделювання ГВ та ГВУ технологічних машин на основі вивчення їхніх особливостей як об'єктів моделювання, вибору пов'язаного з технологічним процесом підходу до синтезу та ідентифікації їхніх математичних моделей, методів одержання кількісних і якісних характеристик досліджуваного об'єкта.

2. Розробити математичні моделі динамічних процесів та систем ГВ та ГВУ машин, на основі принципової схеми конструкції технологічної машини та критеріїв ідентифікації режиму руху коливальних систем, що забезпечить визначення умов існування і стійкості роботи цих типів машин за допомогою аналізу амплітудно-частотної характеристики математичних моделей досліджуваних об'єктів та їхніх складових із використанням критеріальних рівнянь.

3. Обґрунтувати можливість використання основних положень гідродинаміки для моделювання руху робочої рідини в системах приводів, рівнянь руху елементів приводу в поєднанні із основними положеннями теорії пружності і пластичності, що

дозволить будувати найбільш точні і адекватні математичні моделі динаміки процесів та систем ГВ та ГВУ машин.

4. Обґрунтувати підхід до побудови математичних моделей системи оцінювання ефективності функціонування технологічного комплексу на базі ГВ та ГВУ машин на основі нечіткого логічного висновку та проведення параметричної ідентифікації (настроювання) моделі оцінювання ефективності, яка дозволить визначати ефективні параметри режимів роботи ПП для реалізації ефективних технологічних впливів на оброблювані середовища.

5. Розробити методи чисельного розв'язання математичних моделей гідродинамічних процесів у системах приводів ГВ та ГВУ машин з урахуванням різних типів граничних умов та засобів їхньої чисельної реалізації, дослідження збіжності, стійкості та апроксимації різницевої схеми, особливостей режиму руху та її узагальнення на більш широкий клас об'єктів.

6. Виконати комплексні експериментально-теоретичні дослідження робочих процесів технологічних ГВ та ГВУ машин з метою визначення достовірності розроблених математичних моделей за допомогою порівняльного аналізу із результатами чисельного та імітаційного моделювання динамічних процесів та систем цих типів машин.

7. На основі розробленої методики комп'ютерного моделювання динамічних процесів та систем ГВ та ГВУ машин забезпечити ефективну реалізацію розроблених математичних моделей, з можливістю доцільного вибору алгоритмів стосовно властивостей конкретного завдання, і можливістю виконання швидких стійких рекурентних і високоточних ітераційних процедур, щоб на основі отриманих результатів розробити рекомендації для проектних розрахунків головних параметрів ГПП.

8. Провести впровадження результатів наукових досліджень на підприємствах та в установах, що займаються розробкою й експлуатацією ГВ та ГВУ машин для різних технологічних процесів.

Об'єктом дослідження є динамічні процеси у ГВ і ГВУ системах технологічних машин.

Предметом дослідження є методи і засоби математичного та комп'ютерного моделювання процесів у приводах ГВ і ГВУ технологічних машин для визначення їхніх робочих характеристик.

Методи дослідження. Дослідження проведено із застосуванням класичної теорії коливань механічних систем і механореологічної феноменології суцільних середовищ; елементів теорії інтегральних та диференціальних рівнянь; методів механіки суцільного середовища – для побудови моделей фізичних процесів руху слабостисненого в'язкого суцільного середовища і деформування твердих тіл; методів системного аналізу і теорії нечіткої логіки для побудови математичних моделей оцінювання ефективності функціонування технологічних об'єктів; експериментальні дослідження і методи імітаційного моделювання для перевірки адекватності моделей, аналітичних і чисельних методів алгебри, розв'язування апарату диференціальних рівнянь з частинними похідними для реалізації моделей досліджуваних процесів та одержання їхніх числових характеристик.

Наукова новизна отриманих результатів представлена науковими положеннями узагальненої методології математичного моделювання процесів функціонування ГВ і ГВУ машин, яка складається із вперше розроблених і розвинутих методів:

– графо-аналітичного визначення області стійкості роботи ГІТ, в якому, на відміну від існуючих, застосовується критерій стійкості Гурвіца для лінійного неоднорідного диференціального рівняння третього порядку, як форми представлення математичної моделі руху запірного елемента клапана-пульсатора, що дає змогу визначити енергетичні співвідношення приводу для виникнення різних типів коливальних процесів;

– статистичної лінеаризації, в якому, на відміну від існуючих, застосовуються комплексні амплітуди та інтеграл ймовірностей у вигляді функції Крампа, що дозволяє розв'язувати лінійні неоднорідні диференціальні рівняння другого порядку коливальних систем у стохастичних математичних моделях ГВУ систем за допомогою спектральної форми амплітудно-частотних характеристик, де

функції силової взаємодії робочих органів ІІ представляють собою стаціонарний нормальний випадковий процес;

– чисельного моделювання гідродинамічних процесів, який, на відміну від існуючих, представлений в ізопараметрично кінцево-елементному формулюванні на основі дискретного представлення рівняння нерозривності невстановленого руху рідини в інтегральній формі Гріна і модифікації диференціального рівняння Нав'є–Стокса шляхом введення штучної стисненості рідини в диференціальній формі надлишкового тиску, що дає змогу в цілому підвищити точність ідентифікації процесів функціонування ГВ та ГВУ машин.

В основі цих методів лежать вперше розроблені математичні моделі:

– ГВ та ГВУ машин на базі ІІ за допомогою стаціонарної неавтономної коливальної системи зі скінченим ступенем вільності на основі лінійних неоднорідних диференціальних рівнянь другого порядку, в яких, на відміну від існуючих, функція вільного члена представлена у вигляді лінеаризації функції збуджуючої сили, як характеристика використовуваного типу приводу, а лінеаризовані коефіцієнти виражають як пружні і дисипативні силові зв'язки елементів приводу, так і реологічні властивості технологічно оброблюваного середовища, що дає змогу визначати області стійкості роботи даних типів машин;

– вібраційних та ВУ систем, яка, на відміну від існуючих, представлена у формі функції одиничного стрибка Хевісайда та імпульсної перехідної функції у вигляді згортки інтегралу Лапласа від зображення оператора динамічної податливості, яка дозволяє повністю описати процес зміни відносної координати переміщення як у перехідних, так і в установлених режимах руху системи.

Ці математичні моделі базуються на вперше розробленій класифікації типів коливальних систем, яка, на відміну від існуючих, функціонально подана в параметричному вигляді умовами необхідності і достатності виникнення вібраційних та ВУ режимів руху виконавчого органу в поєднанні з інтегральною характеристикою фазової площини системи, що дозволяє синтезувати та ідентифікувати математичні моделі залежно від типу технологічних машин.

Удосконалено математичні моделі динаміки процесів та систем ГВ та ГВУ машин, у формі просторово-нестационарної постановки задачі, на базі систем нелінійних диференціальних рівнянь в частинних похідних Нав'є–Стокса і умови нерозривності для в'язких рідин та інтегральних рівнянь динамічних характеристик рухомих елементів ГПП в поєднанні із основними положеннями теорії пружності і пластичності на базі системи диференціальних рівнянь деформованого тіла, що, на відміну від існуючих, дало змогу в цілому підвищити точність ідентифікації математичних моделей ГВ та ГВУ машин.

Ключовими особливостями такої методології є використання вперше:

– запропонованого критерію визначення типу ГВ та ГВУ систем за їх режимом руху виконавчої ланки, який, на відміну від існуючих, базується на синтезі функцій зовнішньої імпульсної і гармонічної збуджуючих сил із використанням положень теорії стереомеханічного удару на базі лінійного неоднорідного диференціального рівняння другого порядку для консервативних стаціонарних неавтономних коливальних систем, що дає змогу синтезувати та ідентифікувати математичні моделі в залежності від типу визначених систем;

– розробленої математичної моделі системи оцінювання ефективності функціонування технологічних комплексів ГВ та ГВУ машин, яка, на відміну від існуючих, базується на експертних правилах, формалізованих у вигляді нечітких баз знань, що дає змогу визначати взаємозв'язок між параметрами стану підсистем технологічного комплексу з якісними показниками об'єкту технологічної обробки.

Практичне значення отриманих результатів визначається тим, що:

1. Розроблено узагальнені методики та засоби комп'ютерного моделювання процесів функціонування ГВ та ГВУ машин, що базуються на:

– системі підтримки прийняття рішень, яка автоматизує найбільш трудомісткі операції інтелектуальної діяльності при визначенні оцінки ефективності функціонування технологічних комплексів на базі ГВ та ГВУ машин. Особливостями системи є те, що вона дозволяє проводити ранжування станів технологічної системи, здійснювати аналіз чутливості прийнятого рішення до

варіації початкових даних та проводити збирання, оброблення й зберігання діагностичної інформації;

– інтегровано-розрахунковому програмному середовищі із використанням окремих програмних комплексів із застосуванням технології «клієнт-сервер», які реалізують відповідний чисельно-розрахунковий метод розв'язання математичних моделей із використанням методів імітаційного моделювання.

2. Розроблено методику експериментального дослідження робочих процесів у ГПІ а також технологічних характеристик оброблюваного середовища, яка дозволяє виконувати порівняльний аналіз із результатами чисельного моделювання, щоб отримати більш точну інформацію про роботу ГВ та ГВУ технологічних машин і визначати адекватність розроблених математичних моделей.

3. На основі результатів математичного моделювання розроблено методику проектного розрахунку ГПІ вібраційних та ВУ машин, за допомогою якої було спроектовано дослідний зразок ГПІ.

Наукові та практичні результати дисертації відображають узагальнення багаторічних досліджень, виконаних автором згідно з планами науково-дослідних робіт кафедр комп'ютерних наук і галузевого машинобудування ВНТУ. Результати дисертаційної роботи використовуються автором у лекційних курсах «Гідравліка, гідро та пневмоприводи», «Основи САПР», «Теорія механізмів і машин», «Дискретна математика», «Чисельні методи», «Моделювання систем», «Нечіткі моделі і методи обчислювального інтелекту», «Теорія ймовірності, ймовірнісні процеси та математична статистика», «Системний аналіз».

У вигляді рекомендацій та комплексу програм для комп'ютерного розрахунку результати досліджень впроваджено в конструкторському бюро ПАТ «Барський машзавод» (м. Бар, Вінницька область) і компанії Soft Xpansion GmbH & Co.KG (м. Бохум, Німеччина); результати роботи використано при проектуванні і виготовленні дослідного зразка на підприємстві ТОВ «АСК-МЕТ» (м. Вінниця), а також на підприємствах ТОВ «БУДФОНДІНВЕСТ» (м. Перемишляни, Львівська область) і ТОВ «Шляхбуд» (м. Вінниця) для визначення ефективних характеристик технологічних процесів на базі ГВ та ГВУ машин; результати дисертаційного

дослідження успішно використовуються для виконання науково-дослідних робіт на базі Інституту кібернетики ім. В. М. Глушкова НАН України (м. Київ).

Особистий внесок здобувача. Дисертація узагальнює результати довготривалих досліджень автора з проблем математичного моделювання динамічних процесів та систем вібраційних та ВУ технологічних машин на базі ГПП. Роботи [64]–[71] написані самостійно. В опублікованих роботах у співавторстві особисто дисертанту належить: [58] – математична модель коливання дисперсної системи, як форми представлення розвантажувального матеріалу вантажу при ВУ навантаженні; монографія [72] – розділи 1, 3 і підрозділи 2.2, 4.1, 4.2; монографія [73] – розділи 3, 5 і підрозділи 1.1, 2.5, 2.7, 4.1, 4.3; [74] – метод розв’язування стохастичної математичної моделі ГВ та ГВУ систем з ГПП у спектральній формі амплітудно-частотних характеристик; [75] – математична модель робочих процесів ГПП; [76] – рівняння ВУ систем; [77] – математична модель технологічного процесу вібротранспортування; [78] – чисельний метод реалізації математичної моделі гідродинамічних процесів, що базується на ізопараметричному кінцево-елементному формулюванні задачі; [79] – математична модель поверхневого ущільнення ґрунтів на базі механореологічної феноменології й узагальнених законів механіки; [80] – математична модель конвективного теплообміну; [81] – математична модель напружено-деформованого стану кузова автомобіля-самоскида; [82] – тривимірна розрахункова модель інерційного вібропрес-молота; [83] – система керування процесу охолодження; [84], [85] – оригінальна конструкція вібробуджувача ГПП; [86] – система класифікації приводів ГВ та ГВУ машин; [87] – аналіз робочих параметрів гідроімпульсного вібропреса; [88] – інформаційна технологія математичного моделювання напружено-деформованого стану конструкції автомобіля при ВУ навантаженні; [89] – критерій визначення оптимальних параметрів роботи гідроімпульсного вібропреса; [90] – математична модель процесу теплообміну в системі охолодження шпиндельного вузла; [91] – критерій оптимальності конструктивних параметрів вібробуджувача ГПП; [92] – критерій достовірності результатів чисельного моделювання; [93] – підхід на основі твердотільного і параметричного моделювання в САД-системі при розробці ГПП

віброударного пристрою; [94] – математична модель ударної взаємодії; [95] – метод розв’язування математичної моделі робочих процесів інерційного вібропрес-молота з електрогідравлічною системою керування ГП; [96] – критерій оптимізації технічних параметрів системи ГП інерційного вібропрес-молота; [97] – критерій ідентифікації режимів вібраційних та ВУ навантажень; [98] – математична модель динаміки процесів та систем ГВ та ГВУ машин у формі просторово-нестационарної постановки задачі на основі систем нелінійних диференціальних рівнянь в частинних похідних нерозривності і Нав’є–Стокса; [99] – математична модель руху виконавчого органу ГП пристрою для зондування ґрунтів; [100] – аналіз експериментальних даних процесу формоутворення заготовок з порошкових матеріалів; [101] – класифікація функції силового навантаження на вихідну робочу ланку вібраційних та ВУ машин; [102] – математична модель вібраційного і ВУ навантаження на дрібнодисперсні системи; [103] – розв’язок системи диференціальних рівнянь руху двомасового вібраційного живильника; [104] – розв’язок системи диференціальних рівнянь руху робочого органу вібромолота; [105] – класифікація технологічних машин за типом привода; [106] – підхід до конструювання на основі твердотільного, поверхневого і параметричного моделювання; [107], [108] – підхід до розробки тривимірної розрахункової моделі на основі принципів конструктивної параметризації; [109], [110] – система регулювання ГТ; [111] – конструктивна форма поверхні ущільнювального вузла; [112] – конструкція ГТ; [113] – математична модель навантаження на повздовжні тяги трьохточкової навіски; [114], [115] – математична модель фільтрування вологих дисперсних середовищ; [116] – конструкція ГТ; [117] – інформаційна технологія чисельного моделювання процесів горіння; [118] – математична модель оцінювання ефективності функціонування технологічного комплексу ГВ та ГВУ машин; [119] – математична модель напружено-деформованого стану кузова автомобіля-самоскида; [120] – математична модель гідродинамічних процесів у віброзбуджувачах; [121] – критерій стійкості роботи віброзбуджувачів; [122] – параметрична модель тривимірного об’єкта технічних комплексів; [123] – математична модель робочих процесів пневматичного ударного пристрою.

Апробація матеріалів дисертації. Основні положення дисертації було оприлюднено і обговорено на таких конференціях: Міжнародна науково–технічна конференція студентів, аспірантів і молодих вчених «Прогресивні напрямки розвитку машино–приладобудівних галузей і транспорту» (м. Севастополь, 11–15 травня 2010 р.); XI і XIV Міжнародні науково–технічні конференції АС ПГП «Промислова гідравліка і пневматика» (м. Мелітополь, 15–17 вересня 2010 р., м. Одеса, 18–19 вересня 2013 р.); II Всеукраїнська міжвузівська науково–технічна конференція «Сучасні технології в промисловому виробництві» (м. Суми, 17–20 квітня 2012 р.); XVII Міжнародна науково–технічна конференція «Гідроаеромеханіка в інженерній практиці», (м. Черкаси, 17–20 квітня 2012 р.); 3–я Міжнародна науково–технічна конференція «Теорія та практика раціонального проектування, виготовлення і експлуатації машинобудівних конструкцій» (м. Львів, 7–9 листопада 2012 р.); 11–й Міжнародний симпозиум українських інженерів–механіків (м. Львів, 15–17 травня 2013 р.); IV Міжнародна науково–практична конференція «Теоретичні і експериментальні дослідження в технологіях сучасного матеріалознавства та машинобудування» (м. Луцьк, 3–7 червня 2013 р.); Міжнародна науково–технічна інтернет–конференція «Нові технології, обладнання, матеріали в будівництві і на транспорті» (м. Харків, 26–28 листопада 2014 р.); I і II Міжнародні науково–технічні інтернет–конференції «Гідро– та пневмоприводи машин – сучасні досягнення та застосування» (м. Вінниця, 22 грудня 2014 р. – 11 січня 2015 р., 15–16 листопада 2016 р.); 75 Міжнародна науково–практична конференція «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» (м. Дніпропетровськ, 14–15 травня 2015 р.); VII і X Міжнародні науково–практичні конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» (м. Чернігів: 24–27 квітня 2017 р.; 29–30 квітня 2020 р.); XVI–XVIII Міжнародні науково–технічні конференції «Вібрації в техніці та технологіях» (м. Вінниця, 26–27 жовтня 2017 р.; м. Львів, 11–12 жовтня 2018 р.; м. Київ, 24–25 жовтня 2019 р.); Conference Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2018, 1080850 (Wilga, Poland, 1 October 2018); III Всеукраїнська науково–технічна конференція «Створення, експлуатація і ремонт

автомобільного транспорту та будівельної техніки» (м. Полтава, 24–25 квітня 2019 р.); Міжнародна науково-практична конференція «Інформаційні технології та комп'ютерне моделювання» (м. Івано-Франківськ – м. Яремча, 20–25 травня 2019 р.); Міжнародна науково-практична конференція «Інтелектуальні системи та інформаційні технології» (м. Одеса, 19–24 серпня 2019 р.); XXXIX–XLIX науково-технічні конференції професорсько–викладацького складу, співробітників та студентів університету з участю працівників науково–дослідних організацій та інженерно–технічних працівників підприємств (м. Вінниця, 2010–2020 р.).

Публікації. За результатами виконаних теоретичних і експериментальних досліджень опубліковано 61 наукову роботу, з них 4 патенти України [109], [110]–[112], 1 свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір [113]; 2 монографії [72], [73], 5 статей у науковому періодичному виданні [117]–[121], проіндексованому у міжнародній наукометричній базі даних Scopus; 4 статті у наукових періодичних виданнях інших держав [115], [119]–[121]; 27 статей у наукових фахових виданнях України, що входять до переліку, затвердженого МОН України [58], [64], [66], [70], [74], [76]–[78], [84], [86]–[88], [90], [93], [95], [96], [98], [100]–[104], [108], [114], [117], [118], [122], 25 публікацій у збірниках міжнародних та вітчизняних науково-практичних і наукових конференцій [65], [67]–[69], [71], [75], [79], [80]–[83], [85], [89], [91], [92], [94], [97], [99], [105], [106], [107], [116], [119], [120], [123]. Одноосібні публікації складають 8 наукових робіт [64]–[71]. Англійською мовою – 5 публікацій [117]–[121].

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, шести розділів, висновків, посилання та одинадцяти додатків. Загальний обсяг роботи становить 578 сторінок, із них дисертації без додатків – 283 сторінки, 174 рисунки, 48 таблиць, посилання на літературні джерела включає 375 найменувань та займає 32 сторінки, а також 11 додатків на 219 сторінках.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. А. П. Бабичев, *Вибрационная обработка деталей*, 2-е изд. перераб. и доп. Москва: Машиностроение, 1974.
2. В. А. Бауман, и И. И. Быховский, *Вибрационные машины и процессы в строительстве*. Москва: Высш. школа, 1977.
3. В. Н. Челомей, редактор. *Вибрации в технике*: Справочник в 6-ти т. М: Машиностроение, 1981. Э. Э. Лавендел, редактор. Т. 4. *Вибрационные процессы и машины*, 1981.
4. J. Murin, V. Kompiš, and V. Kutiš, *Computational modeling and advanced simulations*. Dordrecht, Netherlands: Springer, 2011. DOI: 10.1007/978-94-007-0317-9.
5. Y. L. Pang, and D. M. Dai, *Simulation of Dynamic Compaction on Soft Soil Foundation. Advanced Materials Research*. pp. 989-994, pp. 2373–2376, 2014. doi: 10.4028/www.scientific.net/amr.989-994.2373.
6. М. Е. Иванов, И. Б. Матвеев, Р. Д. Искович-Лотоцкий, В. А. Пишенин, и И. В. Коц, *Гидропривод сваепогружающих и грунтоуплотняющих машин*. Москва: Машиностроение, 1977.
7. M. Petyt, *Introduction to finite element vibration analysis*. New York, USA: Cambridge University Press, 2010.
8. SABS Standards Division. *Mechanical vibration, shock and condition monitoring: Vocabulary*. Pretoria, South Africa: SABS Standards Division, 2009.
9. В. М. Ордынцев, *Математическое описание объектов автоматизации*. Москва: Машиностроение, 1965.
10. R. K. Schofield, and G. W. Scott Blair, *Proc. Roy. Soc. London*, A(138), 1932; A(707), 1932; 139, 1932; 557, 1933; 141, 1933; 72, 1933; 160, 1937.
11. I. E. Sears, “On the longitudinal impact of metal rods with rounded ends”, *Trans. Cambridge Philos. Soc.* vol. 21, no. 11, pp. 49-105, 1909.
12. А. М. Ашавский, А. Я. Вольперт, В. С. Шейнбаум, *Силовые импульсные системы*. Москва: Машиностроение, 1978.

13. Д. В. Хеерман, *Методы компьютерного эксперимента в статистической физике*. Москва: Наука, 1990.
14. А. А. Молчанов, *Моделирование и проектирование сложных систем*. Киев: Выща шк. Головное изд-во, 1988.
15. В. А. Шушкевич, *Основы электротензометрии*. Минск: Вышэйш. Школа; 1975.
16. Ш. А. Болгожин, В. К. Вороненко, Д. Б. Кожухмедов, и др., *Научно-технические основы электрификации горнодобывающих машин на рудниках*. Д. А. Кунаева ред. Алма-Ата: Наука, 1985.
17. Б. Г. Гольдштейн, *Ударно-вибрационные ручные машины. Вибрации в технике. Справочник*. Москва: Машиностроение, 1981, т. 4, с. 414-428.
18. С. О. Доброгурской, Ф. А. Соколов, и Е. И. Захарова, *Механизмы. Справочное пособие*. Москва: Машгиз., 1947.
19. F. K. Arndt, "Der Schlägeblauf in Kolben und Stange beim schlagenden Bohren", *Glückauf*, vol. 1, no. 24, 1960.
20. Bullock, L. Richard, and A. William, Hustrulid, *Underground mining methods: engineering fundamentals and international case studies*. Littleton, CO, USA: SME, 2001, pp. 38-45.
21. C. Fairhurst, *Computers, rock mechanics and rock engineering*. Oxford, USA: Pergamon Press, 1988.
22. B. Lundberg, *Some basics problems in percussive rock destruction*. Geteborg, Sweden, 1971.
23. J. Meier, "Entwicklungsstand des hydraulischen Bohrens und seine Möglichkeiten zur Verbesserung der Bohrarbeit", *Erzmetall*. vol. 29, no. 4, pp. 156–161, no. 6, pp. 283–286, 1976.
24. И. Б. Матвеев, *Гидропривод машин ударного и вибрационного действия*. Москва: Машиностроение, 1974.
25. Р. Д. Іскович-Лотоцький, *Основи теорії розрахунку та розробка процесів і обладнання для віброударного пресування*. Вінниця, Україна: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2006.

26. Р. Обертюх, "Разработка методики проектного расчета и создание новой конструкции вибропресса для прессования металлопорошковых заготовок в капсулах при возвратно-винтовом движении вибростола", дис. канд. тех. наук., Москва, 1986.

27. М. Е. Иванов, И. В. Коц, и И. Б. Матвеев, "Математическая модель гидропривода возвратно-поступательного действия, управляемого клапаном-пульсатором". *Гидропривод и гидроннеавтоматика: Респ. межвед. научн. – техн. сб.* К, № 17, с. 4–59, 1981.

28. М. М. Вірник, Р. Д. Іскович-Лотоцький, та Н. Р. Веселовська, *Вібраційні та віброударні процеси і машини у ливарному виробництві*. Вінниця, Україна: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2007.

29. И. В. Севостьянов, и Я. В. Иванчук, «Использование пружинных манометров для исследования быстропротекающих динамических процессов в среде неоднородных жидких систем». *Ежемесячный научно-технический и производственный журнал*, № 5, с. 35–40, 2014.

30. В. И. Бабицкий, и В. Л. Крупенин, *Колебания в сильно нелинейных системах*. Москва: Наука, 1985.

31. Н. Н. Боголюбов, и Ю. А. Митропольский, *Асимптотические методы в теории линейных колебаний*. Москва: ГИФМЛ, 1963.

32. Н. Н. Боголюбов, *Теория возмущений в нелинейной механике*. Сборник трудов ин-та строительной механики АН СССР, 1950.

33. Ю. А. Митропольский, *Проблемы асимптотической теории нелинейных колебаний*. Москва: Наука, 1964.

34. В. И. Бабицкий, *Теория виброударных систем*. Москва: Наука, 1978.

35. В. Л. Бидерман, *Прикладная теория механических колебаний*. Москва: Высшая школа, 1972.

36. И. И. Блехман, *Вибрационная механика*. Москва: Физматлит; 1994.

37. А. А. Кобринский, и А. Е. Кобринский, *Виброударные системы*. Москва: Наука, 1973.

38. В. Л. Рагульскене, *Виброударные системы*. «Минтис», Вильнюс, 1974.

39. K. Magnus, K. Popp, and W. Sextro, *Schwingungen: Eine Einführung in die physikalischen Grundlagen und die theoretische Behandlung von Schwingungsproblemen*. Wiesbaden, Deutschland: Vieweg+Teubner Verlag. GWV Fachverlage. Wiesbaden, 2008.
40. G. Van Shothorst, *Modelling of Long-Stroke Hydraulic Servo-Systems of Flight Simulator Motion Control and System Design*. Delft, Netherlands: Technische Universiteit Delft, 1997.
41. J. D. Loeb, *De la mécanique lineaire a la mécanique non-lineaire*. Ann. Telecommun, 1950.
42. S. F. Masri. *Damper system identification and damage detection*. Los Angeles, Calif., USA: University of Southern California, Viterbi School of Engineering, 2005.
43. D. M. Egle, K. E Soder, and United States., Langley Research Center., & University of Oklahoma. *A theoretical analysis of the free vibration of discretely stiffened cylindrical shells with arbitrary end conditions*. Washington. D.C: National Aeronautics and Space Administration, 1969.
44. D. L. Sikarskie, P. D. Stein PD, and M. A. Vable, “A mathematical model of aortic valve vibration”, *Journal of Biomechanics*. vol. 17, no. 11, pp. 831-837, 1984.
45. Е. В. Воскресенский, *Асимптотические методы: теория и приложения*. Саранск, Россия: СВМО, 2001.
46. Н. В. Бутенин, Ю. И. Неймарк, и Н. Л. Фуфаев, *Введение в теорию нелинейных колебаний*, 2-е изд., испр. Москва: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит, 1987.
47. К. В. Фролов, «*Колебание машин с ограниченной мощностью источника энергии и переменными параметрами*», в *Нелинейные колебания и переходные процессы в машинах*. Москва: Наука, 1972.
48. Р. Д. Іскович-Лотоцький, Р. Р. Обертюх РР, та М. Р. Архипчук, *Генератори імпульсів тиску для керування гідроімпульсними приводами вібраційних та віброударних технологічних машин*. Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008.
49. П. Ф. Овчинников, *Виброреология*. Киев: Наук. думка, 1983.
50. Я. В. Іванчук, та Р. Д. Іскович-Лотоцький, *Гідравліка, гідро- та пневмоприводи. Частина 1. Основні закони, рівняння та визначення*. Вінниця: ВНТУ, 2019.

51. Т. М. Башта, и Б. Б. Некрасов, *Гидравлика, гидромашины и гидроприводы*. Москва: Машиностроение, 1982.
52. Г. Корн, и Т. Корн, *Справочник по математике для научных работников и инженеров*. Москва: Наука, 1974.
53. Ю. И. Чупраков, *Гидропривод и средства гидроавтоматики*. Москва: Машиностроение, 1979.
54. В. Н. Хорин, *Объемный гидропривод забойного оборудования*, 3-е изд., перераб. и доп. Москва: Недра, 1980.
55. А. И. Лурье, *Операционное исчисление и его приложение к задачам механики*, 2-е совершенное перераб. изд. Ленинград: Гостехтеоретиздат, 1950.
56. М. Рейнер, *Реология*. Москва: Наука, 1965.
57. И. Ф. Гончаревич, *Виброреология в горном деле*. Москва: Наука, 1977.
58. Р. Д. Искович-Лотоцкий, Я. В. Иванчук, та Я. П. Веселовський, «Основи резонансно-структурної теорії віброударного розвантаження транспортних засобів». *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна*, № 5(53), с. 109–118, 2014. DOI: 10.15802/stp2014/30458.
59. Е. Ф. Аврамчук, А. А. Вавилов, С. В. Емельянов, и др., *Технология системного моделирования*. Москва: Машиностроение, Берлин: Техник, 1988.
60. В. Н. Волкова, и А. А. Денисов, *Основы теории систем и системного анализа*. Санкт-Петербург, Россия: Издательство СПбГТУ, 1999.
61. J. Yen, and R. Langari, *Fuzzy logic: Intelligence, control, and information*. Upper Saddle River, N.J: Prentice Hall, 1999.
62. А. Н. Тихонов, и А. А. Самарский, *Уравнения математической физики*. Москва: Наука, 1966.
63. V. P. Singh, *Entropy theory in hydraulic engineering: An introduction*. Reston, Virginia, USA: American Society of Civil Engineers, 2014.
64. Я. В. Иванчук, «Математичний метод визначення стійкості коливальних систем під дією зовнішнього вібраційного навантаження». *Технічні науки та*

технології: науковий журнал, № 2(12), с. 25–33, 2018. doi:10.25140/2411-5363-2018-2(12)-25-33.

65. Я. В. Іванчук, «Моделювання робочих процесів віброударної установки для руйнування гірських порід», на *XLVII Науково-технічна конференція підрозділів Вінницького національного технічного університету*. Вінниця: ВНТУ, 2018, с. 3628-3630. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://conferences.vntu.edu.ua/public/files/1/vntu_2018_netpub.pdf.

66. Я. В. Іванчук, «Математичне моделювання технологічного процесу руйнування гірської породи віброударним пристроєм з гідроімпульсним приводом». *Праці Одеського політехнічного університету*, № 3(56), с. 5-18, 2018. doi:10.15276/ору.3.56.2018.01.

67. Я. В. Іванчук, «Математичне моделювання технологічного процесу руйнування гірської породи віброударним пристроєм», на *III Всеукраїнська науково-технічна конференція «Створення, експлуатація і ремонт автомобільного транспорту та будівельної техніки»*, Полтава: Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, 2019, с. 15-20.

68. Я. В. Іванчук, «Математичний метод чисельного моделювання гідродинамічних процесів», на *Міжнар. науково-практ. конф. «Інформаційні технології та комп'ютерне моделювання»*, Івано-Франківськ, 2019, с. 269-272.

69. Я. В. Іванчук, «Математичний метод оцінки технологічних параметрів формоутворення заготовок з порошкових матеріалів», на *Міжнар. науково-практ. конференції «Інтелектуальні системи та інформаційні технології»*, Одеса, 2019, с. 77-82.

70. Я. В. Іванчук, Mathematical modeling for the technological process of surface soil compaction by the inertial vibratory rammer. *Збірник наукових праць. Серія: Галузеве машинобудування, будівництво*. Полтава: ПолтНТУ, № 1(52), с. 15–24, 2019. doi: 10.26906/znp.2019.52.1666.

71. Я. В. Іванчук, «Математичний метод визначення стійкості коливальних систем під дією зовнішніх віброударних навантажень», на *XVIII міжнар. науково-техн. конф. «Вібрації в техніці та технологіях»*, Київ, 2019, с. 82-85.

72. Р. Д. Іскович-Лотоцький, та Я. В. Іванчук, *Вібраційні та віброударні пристрої для розвантаження транспортних засобів*. Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2012. 156 с.

73. Р. Д. Іскович-Лотоцький, Я. В. Іванчук, та О. В. Зелінська, *Технологія моделювання оцінки параметрів формоутворення заготовок з порошкових матеріалів на вібропресовому обладнанні з гідроімпульсним приводом*. Вінниця: ВНТУ, 2018.

74. Н. Р. Веселовська, О. В. Зелінська, та Я. В. Іванчук, «Загальні принципи побудови і дослідження детермінованих моделей вібраційних та віброударних машин з гідроімпульсним приводом», *Вібрації в техніці та технологіях*. № 4(91), с. 21–28, 2018.

75. Я. В. Іванчук, та Я. П. Веселовський, «Моделювання робочих процесів гідроімпульсного привода з однокаскадним клапаном пульсатором», на *XLVI наук.-техн. конф. підрозділів Вінницького національного технічного університету*, Вінниця: ВНТУ, 2017, с. 3048-3050. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://conferences.vntu.edu.ua/public/files/1/vntu_2017_netpub.pdf.

76. Н. Р. Веселовська, О. В. Зелінська, О. Ф. Гнатюк, та Я. В. Іванчук, «Моделювання робочих режимів вібраційних та віброударних машин», *Техніка, енергетика, транспорт АПК*, № 1(104), с. 56–63, 2019.

77. Я. В. Іванчук, Р. Д. Іскович-Лотоцький, І. В. Коц, та І. В. Севостьянов, «Математичне моделювання технологічного процесу завантаження судна вібраційним конвеєром», *Судостроение и морская инфраструктура*, № 2(10), с. 81–92, 2018. doi:10.15589/SMI20180208.

78. Я. В. Іванчук, А. А. Яровий, та К. О. Коваль, «Метод чисельного моделювання гідродинамічних процесів», *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*, № 1(44), с. 37–45, 2019.

79. Я. В. Іванчук, Р. Д. Іскович-Лотоцький, А. А. Яровий, та К. О. Коваль, «Математичне моделювання технологічного процесу поверхневого ущільнення ґрунтів інерційною вібротрамбовкою», на *I Міжнародній науково-технічній*

конференції *Перспективи розвитку машинобудування та транспорту – 2019*, Вінниця, 2019, с. 241-243.

80. Р. Д. Іскович-Лотоцький, Н. Р. Веселовська, Я. В. Іванчук, та Я. П. Веселовський, «Розрахунок температурних полів в робочих зонах піролізної установки», на *IV Міжнародній науково-практичній конференції. Теоретичні і експериментальні дослідження в технологіях сучасного матеріалознавства та машинобудування*, Луцьк: Луцький національний технічний університет, 2013, с. 60-64.

81. Р. Д. Іскович-Лотоцький, Я. В. Іванчук, та Я. П. Веселовський, «Дослідження напружено-деформованого стану кузова автомобіля-самоскида при віброударному розвантаженні вантажу», на *3-й Міжнародній науково-технічній конференції. Теорія та практика раціонального проектування, виготовлення і експлуатації машинобудівних конструкцій*, Львів:КІНПАТРІ ЛТД, 2012, с. 118.

82. Р. Д. Іскович-Лотоцький, Я. В. Іванчук, Я. П. Веселовський, та В. В. Снігур, «Інерційний вібропрес-молот», на *XVIII Міжнародній науково-технічній конференції АС ППП. Промислова гідравліка і пневматика*, Вінниця: ГЛОБУС-ПРЕС, 2017, с. 87.

83. Р. Д. Іскович-Лотоцький, Я. В. Іванчук, Я. П. Веселовський, та В. І. Повстенюк, «Піролізна установка утилізації медичних відходів з додатковим очищенням атмосферних викидів», на *II Всеукраїнській міжвузівській науково-технічній конференції. Сучасні технології в промисловому виробництві*, Суми: СумДУ, 2012, с. 97–98.

84. Р. Д. Іскович–Лотоцький, та Я. В. Іванчук, «Віброударний пристрій для розвантаження кузовів самоскидів», *Вібрації в техніці і технологіях*, № 4(56), с. 14–17, 2009.

85. Р. Д. Іскович-Лотоцький, Я. В. Іванчук, та Б. В. Крижанівський, «Застосування віброударного гідроімпульсного приводу для розвантаження транспортних засобів», на *Міжнародній студентській науковій конференції. Прогресивні напрямки розвитку машино-приладобудівних галузей і транспорту*, Севастополь: СевНТУ, 2010, с. 56 – 58.

86. Р. Д. Іскович–Лотоцький, та Я. В. Іванчук, «Аналіз використання гідроімпульсних вібророзвантажувальних пристроїв на автомобільному транспорті», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 6, с. 228–231, 2011.

87. Р. Д. Іскович-Лотоцький, І. В. Севостьянов, Я. В. Іванчук, та В. С. Любин, «Визначення робочих параметрів гідроімпульсного вібропреса для потокового віброударного зневоднення вологих дисперсних матеріалів», *Промислова гідравліка і пневматика*, № 4(38), с. 57-65, 2012.

88. Р. Д. Іскович-Лотоцький, Я. В. Іванчук, та Я. П. Веселовський, «Дослідження напружено-деформованого стану кузова автомобіля-самоскида при віброударному розвантаженні вантажу». *Машинознавство*, № 9–10, с. 51-55, 2012.

89. Р. Д. Іскович-Лотоцький, І. В. Севостьянов, Я. В. Іванчук, та В. С. Любин, «Визначення робочих параметрів гідроімпульсного вібропреса для потокового віброударного зневоднення вологих дисперсних матеріалів», на *XVII Міжнародній науково-технічній конф. Гідроаеромеханіка в інженерній практиці*, Черкаси: АПБ ім. Героїв Чорнобиля, 2012, с. 140.

90. Р. Д. Іскович-Лотоцький, Я. В. Іванчук, та Є. І. Івашко, «Моделювання процесу теплообміну в шпindelьному вузлі установки для розпилення вольфраму», *Вісник східноукраїнського національного університету ім. В. Даля*, ч. 1, № 2(191), с. 63–68, 2013.

91. Р. Д. Іскович-Лотоцький, та Я. В. Іванчук, «Оптимізація параметрів вібробуджувача гідроімпульсних приводів», на *XIV Міжнародній науково-технічній конференції АС ППП. Промислова гідравліка і пневматика*, Одеса, Вінниця: «ГЛОБУС-ПРЕС», 2013, с. 101.

92. Р. Д. Іскович-Лотоцький, Я. В. Іванчук, та Я. П. Веселовський, «Моделювання робочих процесів віброударного пристрою для розвантаження кузовів-самоскидів транспортних засобів», на *Міжнародній науково-технічній інтернет-конференції. Гідро- та пневмоприводи машин – сучасні досягнення та застосування*, Вінниця: ВНТУ, 2014, с. 54–55.

93. Р. Д. Іскович-Лотоцький, Я. В. Іванчук, та Я. П. Веселовський, «Застосування гібридного моделювання при розробці гідроімпульсного приводу

віброударного пристрою для розвантаження кузовів-самоскидів транспортних засобів», у *Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту*, Харків, 2014, № 148(1), с. 95–101.

94. Р. Д. Іскович-Лотоцький, І. В. Коц, та Я. В. Іванчук, «Моделювання робочих процесів гідроімпульсного пристрою для руйнування гірських порід», на *XVII Міжнародній науково-технічній конференції. Вібрації в техніці та технологіях*, Львів: Національний університет «Львівська політехніка», 2018, с. 58-59.

95. Р. Д. Іскович-Лотоцький, В. П. Міськов, та Я. В. Іванчук, «Математичне моделювання робочих процесів інерційного вібропрес-молота з електрогідравлічною системою керування гідроімпульсного приводу для формоутворення заготовок з порошкових матеріалів», *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки*, № 3(237), с. 176-180, 2016.

96. Р. Д. Іскович-Лотоцький, Я. В. Іванчук, та Я. П. Веселовський, «Оптимізація конструктивних параметрів інерційного вібропрес-молота», *Вісник машинобудування та транспорту*, № 2, с. 43–50, 2016.

97. Р. Д. Іскович-Лотоцький, Я. В. Іванчук, та Я. П. Веселовський, «Основні теоретичні положення робочих режимів вібраційного та віброударного обладнання з гідроімпульсним приводом», на *II Міжнародній науково-технічній конференції. Гідро- та пневмоприводи машин – сучасні досягнення та застосування*, Вінниця: Барановська ТП; 2016, с. 95-97.

98. Р. Д. Іскович-Лотоцький, Я. В. Іванчук, та Я. П. Веселовський, «Моделювання робочих процесів гідроімпульсного приводу з однокаскадним клапаном пульсатором», *Вібрації в техніці та технологіях*, № 3(86), с. 10-19, 2017.

99. Р. Д. Іскович-Лотоцький, Я. В. Іванчук, та Є. І. Івашко, «Моделювання робочих процесів гідроімпульсного приводу навісного обладнання для зондування ґрунтів», на *XVI Міжнародній науково-технічній конференції. Вібрації в техніці та технологіях*, Вінниця: ВНТУ; 2017; с. 147-149.

100. Р. Д. Іскович-Лотоцький, Я. В. Іванчук, та Є. І. Івашко, «Дослідження параметрів процесу формоутворення заготовок з порошкових матеріалів на

вібропресовому обладнанні», *Вісник НТУ «ХП»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях, № 9(1285), с. 31-37, 2018. doi: 10.20998/2413-4295.2018.09.04.

101. Р. Д. Іскович-Лотоцький, Я. В. Іванчук, та Є. О. Кобилянський, «Вібраційне та віброударне навантаження при механічних випробуваннях деталей та вузлів машин». *Сучасні технології в машинобудуванні, транспорті та будівництві*. *Вісник кременчуцького національного університету ім. М. Остроградського*, ч. 1, № 2(109), с. 60 – 65, 2018. DOI: 10.30929/1995-0519.2018.2.

102. Р. Д. Іскович-Лотоцький, Я. В. Іванчук, та Я. П. Веселовський, «Моделювання процесу оброблення дрібнодисперсних деревинних матеріалів під дією вібраційного і віброударного навантаження». *Науковий вісник НЛТУ України: збірник наукових праць*. Львів, № 28(5), с. 124-129, 2018. DOI: 10.15421/40280526.

103. Р. Д. Іскович–Лотоцький, І. В. Коц, Я. В. Іванчук, та Є. І. Івашко, “Моделювання руху двомасового вібраційного живильника на базі гідроімпульсного привода”. *Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*. Кропивницький: КНТУ, № 31, с. 3–9, 2018.

104. Р. Д. Іскович-Лотоцький, Я. В. Іванчук, та Є. І. Івашко, “Математичне моделювання зусилля на робочому органі вібромолота з гідроімпульсним приводом”, у *Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини: збірник наукових праць Київського національного університету будівництва і архітектури*. Київ, № 91(2018), с. 5–12, 2018. DOI: 10.26884/gbdmm1891.0101.

105. Р. Д. Іскович-Лотоцький, Я. В. Іванчук, та Є. І. Івашко, “Перспективні напрямки ґрунтоущільнювальних машин”, на *75 Міжнародній науково-практичній конференції. Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту*, Дніпропетровськ: ДИИТ, 2015, с. 281-282.

106. Р. Д. Іскович-Лотоцький, Я. В. Іванчук, та Я. П. Веселовський, “Гібридне моделювання двокаскадного клапана–пульсатора гідроімпульсного привода”, на *VII Міжнародній науково-практичній конференції. Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем*, Чернігів: ЧНТУ; 2017, т. 1, с. 195-196.

107. Р. Д. Іскович-Лотоцький, Я. В. Іванчук, та Я. П. Веселовський, “Застосування гібридного моделювання при розробці гідроімпульсного привода віброударного пристрою для розвантаження кузовів-самоскидів транспортних засобів”, на *Міжнародній науково-технічній інтернет-конференції. Нові технології, обладнання, матеріали в будівництві і на транспорті*, Харків: Влавке, 2014, с. 43-45.

108. Р. Д. Іскович-Лотоцький, Н. Р. Веселовська, Я. В. Іванчук, Є. І. Івашко, Я. П. Веселовський, “Гібридне моделювання вузлів установки для розпилення порошків металів”, у *Міжвузівський збірник наукових праць "НАУКОВІ НОТАТКИ"*. Луцьк, № 41(2), с. 40 – 44, 2013.

109. Р. Д. Іскович-Лотоцький, та Я. В. Іванчук, “Гідроударник”, *МПК E 21 B1/00, № 10469*, Лист. 15, 2005.

110. Р. Д. Іскович-Лотоцький, Я. В. Іванчук, та О. В. Околюшко, “Пристрій для розвантаження і очищення кузова піскорозтрушувальної машини”, *МПК B 65 G 67/32, № 45423*, Жовт. 10, 2009.

111. Р. Д. Іскович-Лотоцький, Я. В. Іванчук, та Є. І. Івашко, “Ущільнення шпindelного вузла”, *МПК F 16 G 15/447, № 89403*, Квіт. 25, 2014.

112. Р. Д. Іскович-Лотоцький, Я. В. Іванчук, О. Д. Манжілевський, та І. В. Севостьянов, «Навісний віброударний пристрій з гідравлічним приводом для занурення паль», *МПК E02D 7/00, №141392*, Квіт. 10, 2020.

113. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 85540. “Комп’ютерна програма «Розрахунок зусилля на повздовжніх тягах трьохточкової навіски» / Р. С. Белзецький, Я. В. Іванчук, А. В. Корпало (Україна); Міністерство економічного розвитку і торгівлі України. – Дата реєстрації 08.02.2019 р.

114. І. В. Севостьянов, та Я. В. Іванчук, “Реологічні моделі та рівняння вологих дисперсних матеріалів під час їх віброударного інерційного навантаження”, *Вісник НТУУ "КПІ". Серія Машинобудування*, № 65, с. 63–70, 2012.

115. И. В. Севостьянов, и Я. В. Иванчук, “Теоретические исследования процессов потокового фильтрования влажных дисперсных сред в пищевой

промышленности”, *MOTROL. Commission of motorization and energetics in agriculture*, № 15(4), с. 90-96, 2013.

116. Р. Д. Іскович-Лотоцький, І. В. Коц, Я. В. Іванчук, та О. Д. Манжілевський, “Навісний інерційний вібротолот”, на *III Міжнародній науково-технічній конференції. Гідро- та пневмоприводи машин – сучасні досягнення та застосування*, Вінниця: ВНТУ, 2019, с. 58-61.

117. R. D. Iskovych–Lototsky, Y. V. Ivanchuk, and Y. P. Veselovsky, “Simulation of working processes in the pyrolysis plant for waste recycling”, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Engineering technological systems*, № 1,8(79), с. 11–20, 2016. doi: 10.15587/1729-4061.2016.59419.

118. R. D. Iskovych-Lototsky, O. V. Zelinska, Y. V. Ivanchuk, and N. R. Veselovska, “Development of the evaluation model of technological parameters of shaping workpieces from powder materials”, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Engineering technological systems*, № 1,1(85), с. 9-17, 2017. doi: 10.15587/1729-4061.2017.59418.

119. R. D. Iskovych-Lototsky, Y. V. Ivanchuk, N. R. Veselovska, S. Wojciech, and S. Samat, “Automatic system for modeling vibro-impact unloading bulk cargo on vehicles”, *Proc. SPIE 10808. Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2018*, 1080860, 2018 Oct 1. doi: 10.1117/12.2501526.

120. R. D. Iskovych-Lototsky, Y. V. Ivanchuk, Y. P. Veselovsky, K. Gromaszek, and A. Oralbekova, “Automatic system for modeling of working processes in pressure generators of hydraulic vibrating and vibro-impact machines”, *Proc. SPIE 10808, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2018*, 1080850, 2018 Oct 1. doi: 10.1117/12.2501532.

121. R. Iskovich-Lototsky, I. Kots, Y. Ivanchuk, Y. Ivashko, K. Gromaszek, A. Mussabekova, and M. Kalimoldayev, “Terms of the stability for the control valve of the hydraulic impulse drive of vibrating and vibro-impact machines”, *Przeglad Elektrotechniczny*, vol. 4, no. 19, pp. 19-23, 2019. doi: 10.15199/48.2019.04.04.

122. Р. Д. Іскович-Лотоцький, та Я. В. Іванчук, “Застосування гібридного моделювання при розробці установок для утилізації відходів”, *Технологічні комплекси. Науковий журнал*, № 1, 2(5, 6), с. 122-126, 2012.

123. О. Д. Манжілевський, Р. Д. Іскович-Лотоцький, В. Д. Стасюк, Я. В. Іванчук, та А. А. Яровий, “Математичне моделювання робочих процесів пневматичного ударного пристрою”, на *I Міжнародній науково-технічній конференції. Перспективи розвитку машинобудування та транспорту – 2019*, Вінниця: ТД Едельвейс і К", 2019, с. 252-254.

124. В. Д. Кармазин, *Техника и применение вибрирующего слоя*. Киев, 1977.

125. И. Г. Шаталова, Н. С. Горбунов, и В. И. Лихтман, *Физико-механические основы вибрационного уплотнения порошковых материалов*. Москва: Наука, 1965.

126. J. Israelachvili, *Intermolecular and Surface Forces*, London: Academic Press, 1985-2004.

127. Н. Н. Павлова, и Л. А. Шрейнер, *Разрушение горных пород при динамическом нагружении*. Москва: Недра, 1964.

128. Y. S. Guo, Y. Zhang, and M. K. Cheng, “Hammer Rod Optimization of Large Tonnage Air Hammer”, *Applied Mechanics and Materials*, pp. 81–84, 2014. doi: 10.4028/www.scientific.net/amm.644-650.81.

129. Р. Д. Іскович-Лотоцький, та Я. В. Іванчук, “Дослідження динаміки процесу віброударної головки бурильної установки з гідроімпульсним приводом”, *Вібрації в техніці та технологіях*, № 1(43), с. 49–51, 2006.

130. Б. Л. Глушак, С. А. Новиков, А. И. Рузанов, и А. И. Садырин, *Разрушение деформируемых сред при импульсных нагрузках*. Нижний Новгород, Россия: Нижегородский ун-т, 1992.

131. Д. Д. Баркан, “Экспериментальные исследования погружения в почву свай, шпунта и труб”. *Механизация строительства*, № 5, с. 31-36, 1952.

132. И. Ф. Гончаревич, *Вибрация – нестандартный путь: вибрация в природе и технике*. Москва: Наука, 1986.

133. И. Ф. Гончаревич, и К. В. Фролов, *Теория вибрационной техники и технологии*. Москва: Наука, 1981.

134. Е. Е. Бибик, *Реология дисперсных систем*. Ленинград: Изд-во ЛГ, 1981.
135. S. Wang, M. Tomović, and H. Liu, *Commercial aircraft hydraulic systems*, 2016.
136. Н. А. Цытович, *Механика грунтов*. Москва: Высшая школа, 1979.
137. А. М. Ашавский А. Я. Вольперт, и В. С. Шейнбаум, *Силовые импульсные системы*. Москва: Машиностроение, 1978.
138. W. Hao, C. Ping, L. Yang, and M. Tianshou, “Effect of Axial Vibration on Sliding Frictional Force between Shale and 45 Steel”, *Shock and Vibration*. pp. 1-13, 2018. doi: 10.1155/2018/4179312/.
139. Л. И. Барон, и И. Е. Хмельковский, *Разрушаемость горных пород свободным ударом*. Москва: Наука, 1971.
140. N. A. Perestiuk. *Differential equations with impulse effects: Multivalued right-hand sides with discontinuities*. Berlin, Deutschland: De Gruyter, 2011.
141. Б. Л. Глушак, В. Ф. Куропатенко, и С. А. Новиков, *Исследование прочности материалов при динамических нагрузках*. Новосибирск, Россия: Наука, 1992.
142. И. И. Быховский, *Основы вибрационной техники*. Москва: Машиностроение, 1979.
143. У. К. Вильсон, *Вибрационная техника*. Москва: Машгиз, 1963.
144. О. Д. Алимов, В. К. Манжосов, и В. С. Еремьянц, *Удар. Распространение волн деформаций в ударных системах*. Москва: Наука, 1985.
145. D. I. Zolotarevskaya, “Mathematical simulation and calculation of the soil compaction under dynamic loads”, *Eurasian Soil Science*, № 44(4), pp. 407–416, 2011. DOI: 10.1134/s1064229311040144.
146. В. Н. Челомей, редактор. *Вибрации в технике: Справочник*. В 6-ти т. Москва: Машиностроение, 1978. В. В. Болотин, редактор. Т. 1. *Колебание линейных систем*, 1978.
147. В. Н. Потураев, В. П. Франчук, и А. Г. Червоненко, *Вибрационные транспортирующие машины: Основы теории и расчета*. Москва: Машиностроение, 272 с.

148. A. Preumont, *Vibration control of active structures: An introduction*, 2018. doi: 10.1007/0-306-48422-6.
149. P. Walzel, and F. Landwehr, “Simulation of Particle Movement on Vibrating Conveyors”, *Chemical Engineering & Technology*, № 22(12), pp. 994-997, 2002.
150. Д. Бленд, *Теория линейной вязкоупругости*. М: Мир, 1965.
151. А. Зоммерфельд, *Механика деформируемых сред*. М, 1954.
152. В. В. Иващенко, “Влияние инерционного нагружения на процесс вибрационного уплотнения порошковых материалов”, *Порошковая металлургия*, № 5, с. 18–21, 1972.
153. New South Wales., Manly Hydraulics Laboratory., & Sydney Water. *Hydraulic modelling of head loss in under-pressure cut-in connections for Sydney Water Corporation*. Manly Vale. N.S.W: Manly Hydraulics Laboratory, 2004.
154. S. Ringwelski, Verein Deutscher Ingenieure. *Numerische Modelle für die aktive Schwingungs- und Schallreduktion und deren Verifikation*. Düsseldorf, Deutschland: VDI Verlag, 2011.
155. Н. Н. Малинин, *Прикладная теория пластичности и ползучести*. Учебн. для студентов вузов. 2-е изд., перераб. и доп. Москва: Машиностроение, 1975.
156. D. Schramm, M. Hiller, and R. Bardini, *Vehicle dynamics: Modeling and simulation*, 2018.
157. І. І. Назаренко, *Прикладні задачі теорії вібраційних систем*, 2-е видання. Київ, Україна: Слово, 2010.
158. І. І. Назаренко та ін., *Основи теорії взаємодії робочих органів будівельних машин із напружено-деформованим середовищем*. Київ, Україна: Леся, 2011.
159. Я. Г. Пановко, *Введение в теорию механического удара*. Москва: Наука, 1977.
160. Я. Г. Пановко, *Введение в теорию механических колебаний*. Москва: Наука, 1980.
161. Л. К. Поліщук, *Динаміка вмонтованого гідроприводу конвеєрів мобільних машин*. Вінниця, Україна: ВНТУ, 2018.

162. Н. А. Кильчевский, *Теория соударения твердых тел*. Киев: Наукова думка, 1969.
163. M. Krausz, *Methode zur Abschätzung der Ergebnisqualität von modularen Gesamtfahrzeugsimulationsmodellen*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2017.
164. Р. Ф. Ганиев, и В. О. Кононенко, *Колебания твердых тел*. Москва: Наука, 1976.
165. J. F. Steffe, I. O. Mohamed, and E. W. Ford, “Pressure drop across valves and fittings for pseudoplastic fluids in laminar flow”, *Trans. ASAE*, vol. 27, pp. 616–619, 1984.
166. Р. Ф. Ганиев, и Л. Е. Украинский, *Динамика частиц при воздействии вибрации*. Киев: Наукова думка, 1975.
167. О. И. Протасов, *Теоретические основы механического разрушения горных пород*. Москва: Недра, 1985.
168. X. He, C. Xu, K. Peng, and G. Huang, “Simultaneous Identification of Rock Strength and Fracture Properties Via Scratch Test”, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, vol. 50(8), pp. 2227–2234, 2017. doi: 10.1007/s00603-017-1224-0.
169. А. А. Вавилова, редактор. *Имитационное моделирование производственных систем*. Москва: Берлин: Машиностроение: Техника, 1983.
170. Р. И. Нигматулин, *Основы механики гетерогенных сред*. Москва: Наука, 1978.
171. С. М. Кузнецов, ”Технологическая механика процесса забивки сваи в грунт дизель-молотом”, дис. канд. техн. наук, Омск: Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия, 2003.
172. В. М. Белолипецкий, и Ю. И. Шокин, *Математическое моделирование в задачах охраны окружающей среды*. Новосибирск, Россия: ИНФОЛИО-пресс, 1997.
173. О. О. Ситник, и С. Ю. Протасов, “Метод визначення імпульсної реакції динамічної ланки з періодично змінними параметрами”, *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, № 4. с. 63-66, 2013.

174. A. Li, F. Dai, N. Xu, G. Gu, and Z. Hu, “Analysis of a Complex Flexural Toppling Failure of Large Underground Caverns in Layered Rock Masses”, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2019. doi: 10.1007/s00603-019-01760-5.
175. Y. W. Cao, X. J. Huang, L. Y. Ma, S. Qiu, and S. X. Gui, “Finite Element Analysis to Vibratory Drum – Soil Model of Vibratory Roller”, *Applied Mechanics and Materials*, pp. 94-96. 2011. doi:10.4028/www.scientific.net/amm.94-96.2005.
176. B. Kenneally, O. M. Musimbi, J. Wang, and M. A. Mooney, “Finite element analysis of vibratory roller response on layered soil systems”, *Computers and Geotechnics*, vol. 67, pp. 73–82, 2015. doi: 10.1016/j.compgeo.2015.02.015.
177. Е. В. Александров, и В. Б. Соколинский, *Прикладная теория и расчеты ударных систем*. Москва: Наука, 1969.
178. П. Жермен, *Механика сплошных сред*. Москва: Высшая школа, 1983.
179. А. П. Бабичев, В. Б. Трунин, и Ю. В. Самодумский, *Вибрационные станки для обработки деталей*, Москва: Машиностроение, 1984.
180. В. Н. Баранов, и Ю. Б. Захаров, *Электрогидравлические и гидравлические вибрационные механизмы*, 2-е изд., перераб. и доп. Москва: Машиностроение, 1977.
181. Е. И. Абрамов, и К. А. Колесниченко, *Элементы гидропривода: Справочник*, 2-е изд., перераб. и доп. Київ: Техніка, 1977.
182. Р. Д. Искович-Лотоцкий, та Я. В. Иванчук, “Застосування вібраційного гідроімпульсного приводу в сільськогосподарському виробництві”, у *Збірник наукових праць Вінницького державного аграрного університету. Серія: Технічні науки*. Вінниця, 2006, № 1, с. 175–178.
183. Р. Д. Искович-Лотоцкий, и И. Б. Матвеев, *Вибрационные процессы: Обзор*. Москва: НИИМаш, 1979.
184. Р. Д. Искович-Лотоцкий, И. Б. Матвеев, Р. Р. Обертюх, и Н. Н. Вирнык, “Гидроимпульсный привод”, в *Гидропривод и гидроннеавтоматика: Респ. межвед. научн.-техн. сб.*, Киев, 1982, № 18, с. 56-60.
185. П. М. Заика, *Вибрационные зерноочистительные машины. Теория и расчет*. Москва: Машиностроение, 1967.

186. И. Ф. Гончаревич, и А. В. Докукин, *Динамика горных машин с упругими связями*, Москва: Наука, 1975.
187. Y. Mori, *Mechanical vibrations: Applications to equipment*, London, UK: ISTE, Ltd. Hoboken. NJ, USA: Wiley, 2017.
188. А. И. Москвитин, *Электрические машины возвратно-поступательного движения*. Москва: Изд-во АН СССР, 1950.
189. Н. Н. Моисеев, *Математические модели системного анализа*. Москва: Наука, 1981.
190. В. С. Шкаликов, *Измерение параметров вибрации и ударов*. Москва: Из-во стандартов, 1980.
191. D. Spreemann, and Y. Manol, *Electromagnetic Vibration Energy Harvesting Devices: Architectures, Design, Modeling and Optimization*. Dordrecht, Netherlands: Springer Netherlands, 2012.
192. V. M. Shatokhin, V. N. Sobol, W. Wyjciek, A. Mussabekova, and D. Baitussupov, “Dynamical processes simulation of vibrational mounting devices and synthesis of their parameters”, *Przeglad Elektrotechniczny*, vol. 4(19), pp. 86-92, 2019. doi: 10.15199/48.2019.04.15.
193. В. А. Лещенко, *Гидравлические следящие поводы станков с программным управлением*, Москва: Машиностроение, 1976.
194. H. Ulbrich, and L. Ginzinger, *Motion and Vibration Control*. Dordrecht, Netherlands: Springer Netherlands, 2009. doi: 10.1007/978-1-4020-9438-5.
195. V. A. Rao, V. Ramamurty, and M. N. Siddhanty, “Performance hydraulic vibration machine”, *Mech. Eng. Division*, vol. 51(1), pp. 29–32, 1970.
196. Р. Д. Искович-Лотоцкий, та Я. В. Иванчук, “Вібраційний гідроциліндр”. *МПК F 15 B 15/26. №9583*, Серп. 8, 2005.
197. C. Debeleac, and S. Nastac, “Stochastic Approaches of Nonlinear Model-Based Simulations for Vibratory Compaction Process”, *PAMM*, vol. 14(1), pp. 749–750, 2014. doi: 10.1002/pamm.201410357.
198. A. A. Shabana, *Theory of vibration: An introduction*. Cham, Switzerland: Springer, 2019.

199. Э. Э. Лавендел, *Синтез оптимальных вибромашин*. Рига: Зинатне, 1970.
200. Г. Корн, и Т. Корн, *Справочник по математике для научных работников и инженеров*. Москва: Наука, 1974.
201. И. М. Бабаков, *Теория колебаний*. Москва: Наука, 1968.
202. I. D. Smith, “High frequency hydraulic vibrators”, *J. Mech. Engineering Science*, vol. 13(6), pp. 380–383, 1971.
203. Г. Ван-Трис, *Синтез оптимальных нелинейных систем управления*. Москва: Мир, 1964.
204. И. Г. Малкин. *Методы Ляпунова и Пуанкаре в теории нелинейных колебаний*, изд. 2-е испр. Москва, Россия: Удиториаал УРСС, 2004.
205. Ю. И. Иориш, *Виброметрия. Измерение вибраций и ударов. Общая теория, методы и приборы*, Москва: Машиностроение, 1963.
206. W. J. Palm, *Mechanical vibration*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley, 2007.
207. Р. Д. Искович-Лотоцький, та Я. В. Іванчук, “Вібраційний високочастотний пристрій для розвантаження і очищення кузовів автомобілів-самоскидів”, *МПК В 65 G 67/32. № 22795*, Квіт. 25, 2007.
208. В. О. Повідайло, *Вібраційні процеси та обладнання*. Львів: Нац. ун-т «Львівська політехніка», 2004.
209. В. Ф. Пантелеев. “Исследование гидросистемы периодического нагружения с клапанами-пульсаторами”, дисс. канд. наук., Москва, 1978.
210. И. И. Блехман, и Г. Ю. Джанелидзе, *Вибрационное перемещение*. Москва: Наука, 1964.
211. P. Woś et al., “Dindorf Modeling and Identification of the Hydraulic Servo Drive”, *EPJ Web of Conferences*. no. 213. p. 02100, 2019. doi: 10.1051/epjconf/201921302100.
212. О. В. Берестнев, А. М. Гошак и др., *Аналитические методы в динамике приводов*. Минск: Наука і техніка, 1992.
213. А. А. Андронов, А. А. Витт, и С. Э. Хайкин, *Теория колебаний*, 2-е изд. перераб. и испр. Москва: Наука, 918 с.

214. Н. В. Азбелев, В. П. Максимов, и Л. Ф. Рахматуллина, *Введение в теорию функционально-дифференциальных уравнений*. Москва: Наука, 1991.
215. J. S. Wu, *Analytical and numerical methods for vibration analyses*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons Inc, 2013. doi: 10.1002/9781119137207.
216. В. Н. Ашихмин, М. Б. Гитман, И. Э. Келлер и др., *Введение в математическое моделирование*, П. В. Трусков, Ред. Москва, Россия: Университетская книга, Логос, 2007.
217. P. Trompette, Axisa, and Francois, *Modelling of Mechanical Systems: Structural Elements*. Butterworth-Heinemann, 2005.
218. А. А. Ильюшин, и Б. Е. Победря, *Основы математической теории термовязкоупругости*. Москва: Мысль. 1970.
219. В. Г. Айнштейн, и А. П. Баскаков, редактор, *Псевдооживление*. Москва: Химия, 1991.
220. Ю. Г. Лега, О. О. Сытник, В. Ф. Юзвенко, и О. В. Подгорный, *Моделирование процессов в технических системах*. Черкаси, Украина: ЧДТУ, 2004.
221. И. А. Прошин, Д. И. Прошин, и Р. Д. Прошина, *Математическое моделирование в исследованиях автоматизированных систем управления*. Пенза, Россия: ПГТА, 2010.
222. В. Б. Струтинський, *Математичне моделювання процесів та систем механіки*. Житомир: ЖІТІ, 2001.
223. Т. А. Романова, П. О. Краснов, С. В. Качин и др., *Теория и практика компьютерного моделирования нанобъектов: справочное пособие*. Красноярск, Россия: ИПЦ КГТУ, 2002.
224. В. П. Франчук, “Принципы приведения технологической нагрузки к системе с дискретными параметрами”, *Вібрації в техніці та технологіях. Всеукраїнський науково-технічний журнал*, № 4(64), с. 5-11, 2011.
225. В. М. Дубовий, та Р. Н. Кветний, *Основы застосування ЕОМ в інженерній діяльності*. Київ, Україна: ІСДО, 1994.
226. Г. Л. Хмеловский, О. С. Кроль, и Ю. М. Сурнин, *Основы автоматизации технологического проектирования*. Київ: УМК Минвуза УССР, 1989.

227. В. Н. Челомей, редактор, *Вибрации в технике: Справочник*. В 6-ти т. Москва: Машиностроение, 1978. В. В. Болотин, редактор. *Т. 1. Колебание линейных систем*, 1978.
228. J. P. Wolf, and A. J. Deeks, *Foundation vibration analysis: A strength-of-materials approach*. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2004.
229. Я. И. Герасимов и др., *Курс физической химии*. Т. 1. Я. И. Герасимов, Ред., 2-е изд. Москва: Химия, 1970.
230. В. Н. Челомей, редактор, *Вибрации в технике: Справочник*. В 6-ти т. М: Машиностроение, 1978. В. В. Болотин, Ред., *Т. 1. Колебание линейных систем*; 1978.
231. Б. Ван дер Поль Б, и Х. Бреммер, *Операционное исчисление на основе двухстороннего преобразования Лапласа*. М: Иностранная литература, 1952.
232. В. И. Крылов, и Н. С. Скобля, *Методы численного преобразования Фурье и обращения преобразования Лапласа*. Москва: Наука, 1974.
233. А. И. Голубенцев, *Интегральные методы в динамике*. Киев: Техніка, 1967.
234. Э. Ландау, *Введение в дифференциальное и интегральное исчисление*. Москва: Иностранная литература, 1948.
235. Р. Беллман. *Теория устойчивости решений дифференциальных уравнений*. Москва: Иностранная литература, 1954.
236. В. А. Бидерман, *Теория механических колебаний*. Москва: Высш. школа, 1980.
237. A. L. F. R. E. D., WICKS, *Shock & vibration, aircraft/aerospace, and energy harvesting*, Vol. 9, Place of publication not identified: SPRINGER INTERNATIONAL PU, 2016.
238. Н. А. Кильчевский, *Динамическое контактное сжатие твердых тел. Удар*. Київ: Наукова думка, 1976.
239. В. П. Паламодов, *Линейные дифференциальные операторы с постоянными коэффициентами*. Москва: Наука, 1967.
240. Д. Р. Меркин, *Введение в теорию устойчивости движения*. СПб, Россия: Лань, 2003.

241. В. Вольтера, *Теория функционалов, интегральных и интегро-дифференциальных уравнений*. Москва: Наука, 1982.
242. А. А. Самарский, *Введение в численные методы*, 2-е изд., перераб. и доп. Москва: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987.
243. A. Reinicke, *Mechanical and hydraulic aspects of rock-proppant systems: Laboratory experiments and modelling approaches*. Potsdam, Deutschland: Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ; 2011. doi: 10.2312/GFZ.b103-11098.
244. C. Lalanne, *Mechanical shock*. London, U.K.: ISTE, Ltd; Hoboken, N.J.: Wiley, 2014.
245. И. Н. Коваленко, и А. А. Филиппова, *Теория вероятностей и математическая статистика*, 2-е изд., перераб. и доп. Москва: Высш. Школа, 1982.
246. А. И. Чуличков, *Математические модели нелинейной динамики*. Москва: Физматлит, 2000.
247. В. Б. Соклинский, *Машины ударного разрушения*. М: Машиностроение, 1962.
248. И. В. Крагельский, и А. В. Алисина, редактор, *Трение, изнашивание и смазка*. Москва: Машиностроение, 1979. Т. 1., 1987. Т. 2.
249. В. Н. Челомей, редактор. *Вибрации в технике: Справочник*. В 6-ти т. Москва: Машиностроение, 1979. И. И. Блехман, редактор. Т. 2. *Колебание нелинейных механических систем*, 1979.
250. И. И. Вульфсон, и М. З. Козловский, *Нелинейные задачи динамики машин*. Москва: Машиностроение, 1968.
251. С. Б. Приходько, “Метод точної лінеаризації деяких класів нелінійних стохастичних диференціальних рівнянь”, *Математичне моделювання*, № 2(25), с. 9-12, 2011.
252. В. О. Кононенко, *Колебательные системы с ограниченным возбуждением*. Москва: Наука, 1964.
253. M. Ram, and J. P. Davim, *Mathematics applied to engineering*. London, United Kingdom: Academic Press, 2017.

254. T. Thümmel, *Experimentelle Mechanismendynamik: Messung, Modellierung, Simulation, Verifikation, Interpretation und Beeinflussung typischer Schwingungsphänomene an einem Mechanismenprüfstand*. Düsseldorf, Deutschland: VDI-Verl, 2012.
255. І. І. Назаренко, *Машины для виробництва будівельних матеріалів*. Київ, Україна: КНУБА, 1999.
256. А. Ф. Верлань, и В. С. Сизиков, *Интегральные уравнения: методы, алгоритмы, программы*. Киев: Наукова думка, 1986.
257. В. И. Тараканов, и С. А. Лысенкова, “Параметрический резонанс при импульсном нагружении”, в *Тр. СурГУ, сер. физ.-техн. науки*, 2006, № 25. с. 62-70.
258. T. I. Fossen, and H. Nijmeijer, *Parametric resonance in dynamical systems*. New York, NY, USA: Springer; 2012. DOI: 10.1007/978-1-4614-1043-0.
259. К. Н. Шмаргунов, *Электрические отбойные молотки – конструкции, расчет и испытания*, Москва: ОНТИ, 1937.
260. С. П. Стрелков, *Введение в теорию колебаний*. Москва: Гостехиздат, 1950, 2-е изд. перераб. и доп. Москва: Наука, 1964.
261. В. М. Шатохин, *Анализ и параметрический синтез нелинейных силовых передач машин*. Харьков, Украина: Нац. техн. ун-т. «Харьк. Политехн. ин-т», 2008.
262. П. М. Алабужев, Б. Н. Стахановский, и И. Я. Шпигельбурд, “Введение в теорию удара”. Новосибирск: НЭТИ, 1970.
263. Л. И. Седов, *Механика сплошных сред*. Т. 2. Москва: Наука, 1984.
264. О. С. Ланець, *Основи розрахунку та конструювання вібраційних машин. Книга 1. Теорія та практика створення вібраційних машин з гармонічним рухом робочого органа*. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2018.
265. K. Nendel, and T. Risch, “Two-dimensional movement patterns of vibratory conveyors”. *Logistics Journal Referierte Veröffentlichungen*, 2010. doi: 10.2195/lj_nendel_risch_2672.
266. W. Tustin, and D. Jariwala, *Random vibration & shock testing: Measurement, Analysis and calibration*. Santa Barbara, Calif., USA: Equipment Reliability Institute, 2005.

267. В. С. Пугачев, и В. С. Сеницын, *Стохастические дифференциальные системы*. Москва: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1985.
268. А. П. Филиппов, *Колебания деформируемых систем*, 2-е изд. перераб. и доп. Москва: Машиностроение, 1970.
269. R. K. Miller, “Asymptotic behavior of solutions of nonlinear differential equations”, *Trans. Amer. Math. Soc*, pp. 115, 1965.
270. Б. А. Севостьянов, *Курс теории вероятностей и математической статистики*. Москва: Наука, 1982.
271. В. А. Садовничий, *Теория операторов*. Москва: Из-во МГУ, 1986.
272. А. В. Александров, и В. Д. Потапов, *Основы теории упругости и пластичности*. Москва: Высшая школа, 1990.
273. Т. Г. Стрижак, *Минимаксный признак устойчивости*. Препринт. Ин-т электродинамики АН УССР. Киев, Украина, 1998.
274. Г. Н. Дубошин, *Основы теории устойчивости движения*. Москва: МГУ, 1952.
275. P. Novák, *Introduction to hydraulic modelling: Principles, methods, and applications*. London, New York: Spon, 2010.
276. T. Oliver, T. Kalken, C. Johnson, R. Ganeshalingham, Canterbury NZ, and DHI Water and Environment (Firm), *Waimakariri Flood Protection Project: Hydraulic modelling*. Christchurch, N. Z.: Environment Canterbury, 2007.
277. Б. І. Мокін, В. Б. Мокін, та О. Б. Мокін, *Математичні методи ідентифікації динамічних систем*. Вінниця: ВНТУ, 2010.
278. H. Rahnejat, and S. Rothberg, “Multi-body dynamics: Monitoring and simulation techniques-III”, in *International Symposium on Multi-body Dynamics: Monitoring and Simulation Techniques*, London: Professional Engineering Pub., 2004.
279. Н. С. Ахметов, *Общая и неорганическая химия*, 4-е изд., испр. Москва, Россия: Высш. шк., Академия, 2001.
280. P. H. Oosthuizen, *Introduction to compressible fluid flow*. Boca Raton, Florida, USA: CRC Press/Taylor & Francis Group, 2014.

281. Н. Е. Кочин, И. А. Кибель, и Н. В. Розе, *Теоретическая гидромеханика*. Часть 1. Москва, 1963.
282. Л. Э. Эльсгольц, *Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление*. Москва: Наука, 1969.
283. О. А. Ладыженская, *Математические вопросы динамики вязкой несжимаемой жидкости*. Москва: Физматлит, 1961.
284. О. М. Белоцерковский, *Численное моделирование в механике сплошных сред*. Москва, Россия: Наука, 1994.
285. П. Бенерджи, и Р. Баттерфилд, *Метод граничных элементов в прикладных науках*. Москва: Мир, 1984.
286. С. М. Белоносов, и К. Т. Черноус, *Краевые задачи для уравнений Навье–Стокса*. Москва: Наука, 1985.
287. П. Бредшоу, *Введение в турбулентность и ее измерение*. Москва: Мир, 1974.
288. Y. S. Guo, Y. Zhang, and M. K. Cheng, “Hammer Rod Optimization of Large Tonnage Air Hammer”. *Applied Mechanics and Materials*, vol. 81–84, pp. 644-650, 2014. doi: 10.4028/www.scientific.net/amm.644-650.81.
289. Г. Е. Пухов, *Приближенные методы математического моделирования, основанные на применении дифференциальных преобразований*. Киев: Наукова думка, 1988.
290. V. Zviadauri, “Vibratory Movement of the Friable Material in the Conditions of Combined Vibrations of the Working Member”, *Applied Mechanics and Materials*, vol. 446-447, pp. 562-565, 2014. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.446-447.562.
291. М. Р. Спасский, и Е. Д. Шукин, “Модель вибрационно-уплотняемой дисперсной среды”. *Коллоидный журнал*, № 35, с. 897-905, 1970.
292. Л. Г. Лойцянский, *Механика жидкости и газа*, 6-е изд., перераб. и доп. Москва: Наука, 1987.
293. Р. Темам, *Уравнения Навье–Стокса. Теория и численный анализ*. Москва: Мир, 1981.
294. С. А. Чаплыгин, *Механика жидкости и газа*. Москва: Наука, 1976.

295. Л. Д. Ландау, и Е. М. Лифшиц, *Гидродинамика*. Москва: Наука, 1988.
296. Р. Д. Искович-Лотоцкий, Я. В. Иванчук, и Я. П. Веселовский, “КОМПАС 3D + FlowVision: моделирование рабочих процессов в пиролизной установке для утилизации отходов”, *isicad.ru*, № 140(03), с. 1-8, 2016.
297. В. В. Кафаров, и М. Б. Глебов, *Математическое моделирование основных процессов химических производств*. Москва: Высшая школа, 1991.
298. В. А. Членов, и Н. В. Михайлов, *Виброкипящий слой*. Москва: Наука, 1977.
299. Г. М. Островский, *Прикладная механика неоднородных сред*. Санкт-Петербург, Россия: Наука, 2000.
300. А. А. Яровий, *Методи та засоби організації високопродуктивних паралельно-ієрархічних обчислювальних систем із рекурсивною архітектурою*. Вінниця, Україна: ВНТУ, 2016.
301. Л. С. Лейбензон, *Краткий курс теории упругости*. Москва, Ленинград: ГИТТЛ, 1942.
302. А. Н. Аверкин, И. З. Батыршин, А. Ф. Блишун, В. Б. Сипов, и В. Б. Тарасов, *Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта*. Д. А. Поспелов, ред. Москва: Наука, 1986.
303. Р. Е. Kloeden, “Fuzzy dynamical systems”, *Fuzzy Sets and Systems*. vol. 7, pp. 275-296, 1982.
304. Д. Н. Хорафас, *Системы и моделирование*. Москва: Мир, 1967.
305. В. М. Ям и др., “Вибрационное прессование огнеупорных масс”, *Огнеупоры*, № 10, с. 1-7, 1973.
306. О. Д. Панкевич, та С. Д. Штовба, *Діагностування тріщин будівельних конструкцій за допомогою нечітких баз знань*. Вінниця, Україна: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005.
307. С. Д. Штовба, *Проектирование нечетких систем средствами MATLAB*. Москва, Россия: Горячая линия-Телеком, 2007.
308. В. В. Борисов, В. В. Круглов, и А. С. Федулов, *Нечеткие модели и сети*. Москва, Россия: Горячая линия-Телеком, 2007.

309. О. П. Ротштейн, *Интеллектуальні технології ідентифікації: нечіткі множини, генетичні алгоритми, нейронні мережі*. Вінниця, Україна: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 1999.
310. Л. Г. Раскин, и О. В. Серая, *Нечеткая математика. Основы теории. Приложения*. Харьков, Украина: Парус, 2008.
311. Дж. Форсайт, М. Мальнольт, и К. Моулер, *Машинные методы математических вычислений*. Москва: Мир, 1980.
312. A. Guediri, and D. Ben Attous, “Application of fuzzy ensembles for optimal distribution of power in electrical networks”, *Journal of Fundamental and Applied Sciences*, vol. 3(1), с. 1–13, 2011. doi: 10.4314/jfas.v3i1.1.
313. T. J. Ross, *Fuzzy logic with engineering applications*. Chichester, West Sussex, England: Wiley, 2017.
314. А. Кофман, *Введение в теорию нечетких множеств*. Москва: Радио и связь, 1982.
315. А. Ахо, Дж. Хопкрофт, и Дж. Ульман *Структуры данных и алгоритмы*, Москва, Россия: Вильямс, 2007.
316. В. Д. Рудь, “Якісний аналіз схем віброформування сипучих матеріалів”, *Наукові нотатки*, № 11, с. 245-248, 2002.
317. Y. L. Pang, and D. M. Dai, “Simulation of Dynamic Compaction on Soft Soil Foundation”, *Advanced Materials Research*. pp. 989-994, 2014. doi: 10.4028/www.scientific.net/amr.989-994.2373.
318. Н. Kobus, *Technische Akademie Symposium on Scale Effects in Modelling Hydraulic Structures & International Association for Hydraulic Research. (1985). Symposium on Scale Effects in Modelling Hydraulic Structures: Esslingen am Neckar*, Germany, Stuttgart: Inst. für Wasserbau. 1984.
319. Р. Столл, *Множества. Логика. Аксиоматические теории*. Москва: Просвещение, 1968.
320. М. Böswald, *Updating of local non-linear stiffness- and damping parameters in large order finite element models by using vibration test data. 7 Tabellen*. Köln. Dt. Zentrum für Luft- und Raumfahrt, 2005.

321. В. Б. Струтинський, та Н. Р. Веселовська, *Технологія моделювання динамічних процесів та систем*. Вінниця: Власюк О, 2007.
322. Х. Гулд, та Я. Тобочник, *Компьютерное моделирование в физике*. Москва: Мир; 1990.
323. А. П. Карташев, и Б. Л. Рождественский, *Обыкновенные дифференциальные уравнения и основы вариационного исчисления*. Москва: Наука, 1976.
324. Y. Ivanchuk, K. Koval, and A. Halianovska, "The algorithm for simulation of a nonlinear dynamic lorence system", *Proc. XII International Scientific-Practical Conference "Internet-Education-Science-2020" dedicated to the 25-th anniversary of the Computer Science Department*, 2020 May 26-29, P. 123-124.
325. Ю. М. Блитштейн, С. И. Мешков, В. Г. Чебан, и А. Н. Чигарев, *Распространение волн в вязкоупругих средах*. Кишинев: Штиинца, 1977.
326. Р. Ф. Нагаев, *Периодические режимы вибрационного перемещения*. Москва: Наука, 1978.
327. F. M. White, *Fluid mechanics*. New Delhi, India: McGraw-Hill Education (India), 2017.
328. J. Watton. *Modelling, monitoring and diagnostic techniques for fluid power systems*. (Springer e-books.) London: Springer, 2007.
329. Г. Шлихтинг, *Теория пограничного слоя*. Москва: Наука, 1974.
330. J. J. Wang, and C. Jiaotong, *Hydraulic fracturing in earth-rock fill dams*. Oxford, USA: CRC Press/Taylor & Francis Group, 2014, 251 p.
331. К. Бребия, Ж. Телес, и Л. Вроубел, *Методы граничных элементов*. Москва: Мир, 1987.
332. Р. Н. Кветний та ін., *Різницеві методи та сплайни в задачах багатовимірної інтерполяції*. Вінниця, Україна: Універсум-Вінниця, 2009.
333. Р. Д. Рихтмайер, и К. Мотрон, *Разностные методы решения задач*. Москва: Наука, 1975.
334. W. BJ. Zimmerman, *Process modelling and simulation with finite element methods*. New Jersey, USA: World Scientific, 2005.

335. C. H. Yew, X. Weng X, *Mechanics of hydraulic fracturing*. Waltham, MA, USA: Gulf Professional Publishing: Elsevier, 2015.
336. D. C. Wilcox, *Turbulence modeling for CFD*. DCW Industries, Inc, 1994.
337. M. Zu-yan, *Mechanical Design and Manufacture of Hydraulic Machinery*. Florence, Italy: Routledge, 2018.
338. W. M. Norrison, “Principle and Application Flow Divider Valves Hydraulics”, *Hydraulics Power Transmission*, vol. 10, pp. 91-103, 1962.
339. W. D. Comb, *The Physics of Fluid Turbulence*. Oxford, USA: Clarendon Press, 1992.
340. W. Yulin, L. S. Shengcai, H. S. Liu, and Z. Q. Dou, *Vibration of hydraulic machinery*. Place of publication not identified: Springer, 2015. doi: 10.1007/978-94-007-6422-4.
341. П. Роуч, *Вычислительная гидродинамика*. Москва: Мир, 1980.
342. Northern River Basins Study (Canada), and B. Aitken, *Hydraulic modelling of the Peace-Athabasca Delta under modified and natural flow conditions*. Edmonton, Canada: Northern River Basins Study, 1995.
343. Э. Дулан, Дж. Миллер, и У. Шилдерс, *Равномерные численные методы решения задач с пограничным слоем*. Москва: Мир, 1983.
344. С. В. Жлуктов, А. А. Аксёнов, и П. И. Карасёв, “Моделирование байпасного ламинарно-турбулентного перехода в рамках $k-\epsilon$ подхода”. *Компьютерные исследования и моделирование. Вычислительная аэро- и гидродинамика*, № 6(6), с. 879-888, 2014.
345. С. В. Жлуктов, А. А. Аксёнов, С. А. Харченко, И. В. Москалёв, Г. Б. Сушко, и А. С. Шишаева, “Моделирование отрывных течений в программном комплексе FlowVision-НРС”, *Вычислительные методы и программирование*, № 11, с. 234-245, 2010.
346. Б. В. Кармугин, Г. Г. Стратиневский, и Д. А. Мендельсон, *Клапанные уплотнения пневмогидроагрегатов*. Москва: Машиностроение, 1983.
347. P. L. Wallace, and Wellington (N. Z.: Region), *River Edge Consulting. Hutt River mouth extraction: Hydraulic modelling*. Wellington, N. Z: River Edge Consulting, 2010.

348. Е. А. Волков, *Численные методы*, 2-е изд., испр. Москва: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987.
349. G. Takcs, and V. Rohal-Ilkiv, *Model predictive vibration control: Efficient constrained MPC vibration control for lightly damped mechanical structures*. London, U.K.: Springer, 2011.
350. Б. И. Крюков, *Вынужденные колебания существенно нелинейных систем*. Москва: Машиностроение, 1984.
351. І. В. Коц, та В. В. Петрусь, *Насоси з гідравлічним приводом для перекачування високов'язких, агресивних та абразовмісних середовищ*. Вінниця, Україна: ВНТУ, 2012.
352. Р. Н. Кветный, *Вероятностное моделирование измерительных информационных систем*. Київ: УМК ВО, 1990.
353. В. В. Ключев, *Приборы и системы для измерения вибрации, шума и удара: Справочник в 2-х кн.*, В. В. Ключева, ред. Москва: Машиностроение, 1978.
354. В. С. Канарчук, *Надійність машин*. Київ, Україна: Либідь, 2003.
355. Е. С. Левшина, и П. В. Новицкий, *Электрические измерения физических величин: (Измерительные преобразователи)*. Ленинград: Энергоатомиздат. Ленинградское отделение, 1983.
356. В. И. Мудров, и В. Л. Кушко, *Методы обработки измерений*. Москва: Советское радио, 1976.
357. М. Л. Дайчик, Н. И. Пригоровский, и Г. Х. Хуршудов, *Методы и средства натурной тензометрии: Справочник*. Москва: Машиностроение, 1989.
358. Б. М. Щеголев. *Математическая обработка наблюдений*. Москва: Наука, 1969.
359. J. M. Burgers, *First report on viscosity and plasticity*. Amsterdam, Netherlands: Nordeman Publ, 1935.
360. Р. Н. Кветный. *Методи комп'ютерних обчислень*. Вінниця, Україна: ВДТУ, 2001.
361. M. Zu-yun, *Mechanical Design and Manufacture of Hydraulic Machinery*. Florence Routledge. Hydraulic Machinery Ser. London, U.K.: Springer, 2018.

362. A. Tondl, *Autoparametric resonance in mechanical systems*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2000.
363. Y. Yang, G. S. Li, H. Q. Liu, Y. X. Jie, W. X. Ding, D. L. Brower, and X. Zhu, “Design of vibration compensation interferometer for Experimental Advanced Superconducting Tokamak”, *The Review of Scientific Instruments*, no. 85, pp. 11, 2014.
364. В. Ф. Ситнік, та В. Ф. Орленко, *Імітаційне моделювання*. Київ, Україна: КНЕУ, 1998.
365. D. H. Zanette, “Self-sustained oscillations with delayed velocity feedback”, *Papers in Physics*. vol. 29, no. 0, 2017. doi: 10.4279/pip.090003.
366. M. Thomas, and F. Laville, *Simulation des vibrations mécaniques par Matlab, Simulink et Ansys*, 2017.
367. B. F. Shorr, *The Wave Finite Element Method*. Berlin, Deutschland: Heidelberg Springer Berlin Heidelberg, 2004.
368. О. Зенкевич. *Метод конечных элементов в технике*. Москва: Мир, 1975.
369. Д. Г. Мэтьюз, и Д. Ф. Куртис, *Численные методы использование MATLAB*, 3-е изд. Москва, Россия: Вильямс, 2001.
370. H. B. Wilson, L. H. Turcotte, and D. Halpern, *Advanced mathematics and mechanics applications using MATLAB*. Boca Raton, Florida, USA: Chapman & Hall/CRC, 2003.
371. Г. Стренг, и Дж. Фикс, *Теория метода конечных элементов*. Москва: Мир, 1977.
372. P. P. Wang, D. Ruan, and E. E. Kerre, *Fuzzy logic: A spectrum of theoretical & practical issues* (Springer e-books.). Berlin, Germany: Springer, 2007.
373. H. Xia, G. Roeck, and J. M. Goicolea, *Bridge vibration and controls: New research*. Hauppauge. N.Y, USA: Nova Science Publisher's, 2012.
374. E. Tobisch, *Nonlinear resonance analysis: Theory, computation, applications*. New York, USA: Cambridge University Press, 2011.
375. H. C. Magel, U. Schnell, and Hein KRG, “Simulation of detailed chemistry in a turbulent combustion flow”, in *Twenty-Sixth Symposium (International) on Combustion*. The Combustion Institute, pp. 67-74, 1996.