

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

Я. В. Іванчук, Р. Д. Іскович-Лотоцький

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

Монографія

Вінниця
ВНТУ
2023

УДК 62-366.1:531.7:822

I-86

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 5 від 26.10.2023 р.)

Рецензенти:

Р. Н. Кветний, доктор технічних наук, професор

І. І. Назаренко, доктор технічних наук, професор

Іванчук, Я. В.

I-86

Методи та засоби математичного моделювання гідравлічних вібраційних і віброударних машин : монографія / Я. В. Іванчук, Р. Д. Іскович-Лотоцький. – Вінниця : ВНТУ, 2023. – 466 с.

ISBN 978-966-641-952-4

Монографія присвячена питанням розробки і дослідження ефективної узагальненої методології ідентифікації процесів функціонування гідравлічних вібраційних і віброударних машин. Представлені розроблені математичні моделі гідравлічних вібраційних і віброударних машин, а також запропоновано метод чисельного моделювання гідродинамічних процесів. Описані узагальнені методики та засоби комп'ютерного моделювання процесів функціонування гідравлічних вібраційних і віброударних машин. Детально розкрита методика експериментального дослідження робочих процесів у технологічному обладнанні на базі гідроімпульсного привода.

Розрахована на інженерів-спеціалістів, науковців інженерно-технічного спрямування, студентів та аспірантів технічних вузів.

УДК 62-366.1:531.7:822

ISBN 978-966-641-952-4

© Я. Іванчук, Р. Іскович-Лотоцький, 2023

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- АВ – автоколивальний віброзбуджувач
- АЦП – аналогово-цифровий перетворювач
- ВМ – вібраційна машина
- ВНТУ – Вінницький національний технічний університет
- ВПУ – віброударне поверхнєве ущільнення
- ВУ – віброударний
- ГВ – гідравлічний вібраційний
- ГВУ – гідравлічний віброударний
- ГП – гідроімпульсний привід
- ГПТ – генератор імпульсів тиску
- ГП – гідравлічний привід
- ЕВ – ексцентриковий віброзбуджувач
- ЕМ – електромагнітний
- ІВ – інерційна вібротрамбовка
- ІП – імпульсний привід
- ККД – коефіцієнт корисної дії
- ЛТПР – ламінарно-тербулентний перехідний режим
- ПВ – пульсаторний віброзбуджувач
- ПУ – поверхнєве ущільнення
- СВ – слідкуючий віброзбуджувач
- CAD – computer-aided design (система двомірного або тривимірного геометричного моделювання)
- CFD – computational fluid dynamics (система моделювання гідродинамічних процесів)
- FEM – finite element method (система моделювання напружено-деформованого стану твердих тіл)
- FSI – fluid structure interaction (система зв'язаних розрахунків взаємодії рідини і поверхонь деформованих тіл)

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	3
ВСТУП	7
1 АНАЛІЗ ГВ І ГВУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ МАШИН ТА ЇХ МЕТОДІВ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ	11
1.1 Область застосування вібраційних та ВУ технологічних машин	11
1.2 Математичні методи моделювання технологічних процесів із застосуванням вібраційних і ВУ технологічних машин	17
1.3 Оцінка та аналіз конструктивних та технологічних параметрів вібраційних і ВУ технологічних машин	26
1.4 Аналіз аналітичних методів математичного моделювання та розрахунку ГВ та ГВУ технологічних машин	45
2 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ТА СИСТЕМ ГВ І ГВУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ МАШИН	58
2.1 Висунення гіпотез стосовно математичного моделювання динамічних процесів та систем ГВ і ГВУ технологічних машин.....	58
2.2 Розроблення методу визначення типу вібраційних та ВУ систем за їх режимом руху виконавчої ланки	61
2.2.1 Вібраційний режим роботи	61
2.2.2 Віброударний режим роботи	64
2.2.3 Розроблення функціональної математичної моделі динаміки вібраційних та ВУ систем	73
2.3 Розроблення методики побудови універсальних математичних моделей ГВ та ГВУ машин	80
2.3.1 Побудова універсальних детермінованих математичних моделей ГВ машин	80
2.3.2 Побудова універсальних детермінованих математичних моделей ГВУ технологічних машин	95
2.3.3 Побудова універсальних стохастичних математичних моделей вібраційних технологічних машин	116
2.3.4 Побудова універсальних стохастичних математичних моделей ГВУ технологічних машин	120
2.4 Розроблення методу визначення області стійкості роботи імпульсних ГВ і ГВУ машин	126

3 МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ТА СИСТЕМ ГВ І ГВУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ МАШИН	137
3.1 Обґрунтування доцільності математичного моделювання ГВ та ГВУ технологічних машин на базі положень гідродинаміки і механіки твердого тіла	137
3.2 Розроблення адекватних математичних моделей ГВ та ГВУ технологічних машин	143
3.2.1 Математична модель технологічного процесу транспортування вібраційним конвеєром	143
3.2.2 Математична модель технологічного процесу поверхневого ущільнення ґрунтів інерційною вібротрамбовкою	157
3.2.3 Математична модель технологічного процесу руйнування гірської породи навісним ВУ пристроєм	167
3.2.4 Математична модель технологічного процесу занурення паль навісним ВУ пристроєм	182
3.3 Розроблення методики оцінювання ефективності функціонування технологічного комплексу поверхневого ущільнення ґрунтів на базі інерційної вібротрамбовки	199
4 МАТЕМАТИЧНИЙ МЕТОД ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ГІДРОДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ У СИСТЕМАХ ПРИВОДІВ ГВ ТА ГВУ МАШИН	241
4.1 Розроблення методу чисельного розв'язування рівняння нерозривності в диференціальній формі	242
4.2 Розроблення методу чисельного розв'язування рівняння Нав'є-Стокса	244
4.3 Модифікація математичного методу чисельного розв'язування системи рівнянь гідродинаміки	250
4.3.1 Модифікація математичного методу чисельного розв'язування системи рівнянь гідродинаміки для турбулентного режиму руху робочої рідини	250
4.3.2 Модифікація математичного методу чисельного розв'язування системи рівнянь гідродинаміки для пристінних шарів робочої рідини	255
4.3.3 Модифікація математичного методу чисельного розв'язування руху шарів робочої рідини в області зазору	257

5 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ І СИСТЕМ ГВ ТА ГВУ МАШИН	259
5.1 Розроблення експериментального стенда ІВ на базі ГП.....	260
5.2 Розроблення методики експериментальних досліджень	268
5.3 Експериментальні дослідження закономірностей зміни робочих режимів ГП інерційної вібротрамбовки	272
5.4 Експериментальні дослідження закономірностей поверхневого ущільнення ґрунтів інерційною вібротрамбовкою.....	280
6 РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДИКИ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ЇЇ ЗАСТОСУВАННЯ ДО РОЗВ'ЯЗАННЯ ПРИКЛАДНИХ ЗАДАЧ	293
6.1 Розроблення методики комп'ютерного моделювання динамічних процесів і систем ГВ та ГВУ машин	294
6.2 Практична реалізація розроблених математичних моделей динамічних процесів і систем ГВ та ГВУ технологічних машин	308
6.2.1 Аналіз достовірності результатів математичного моделювання	324
6.2.2 Аналіз ефективності результатів моделювання динамічних процесів і систем ГВ та ГВУ технологічних машин	383
6.3 Аналіз адекватності використання розроблених рівнянь гідродинаміки для моделювання режимів течії робочої рідини	387
6.4 Аналіз результатів впровадження дисертаційної роботи	392
ВИСНОВКИ	397
ЛІТЕРАТУРА	400
ДОДАТКИ	434
Додаток А. Принципові та конструктивні схеми ГВ і ГВУ технологічних машин	435
Додаток Б. Параметри математичних моделей для чисельного моделювання у функціонально програмованому середовищі Matlab. Simulink	448
ДОДАТОК В. Розробка методики проектного розрахунку гідроімпульсного приводу ГВ і ГВУ машин та аналіз ефективності розроблених математичних моделей	453

ВСТУП

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].

Однією із проблем при проектуванні ІП є суттєва нерівномірність споживання потужності через явно виражену імпульсну роботу ГВ та ГВУ машин [6–8]. 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 ІП, необхідно додатково враховувати реологічні властивості оброблюваного середовища [9–15], що свідчить про принципову складність математичного опису фізичних процесів. Таким чином, сучасні ГВ та ГВУ машини на базі ІП 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: І. Е. Sears [11], Ш. А. Болгожин [16], Ф. К. Arndt [17], С. Fairhurst [18], J. Meier [19], стало можливим розробка у ВНТУ оригінальних конструкцій вібраційних та ВУ машин на базі ГІП. Основний внесок у розвиток теоретичних основ розрахунку та розробки технологічних процесів і обладнання на основі ГІП зробили такі вчені, як І. Б. Матвеев [20], Р. Д. Іскович-Лотоцький [21], Р. Р. Обертюх [6], В. А. Пішенін [15], І. В. Коц [22], М. М. Вірник [23], Л. К. Поліщук [24], І. В. Севостьянов [25] та ін.

Великий вплив на динаміку роботи ГВ та ГВУ машин мають фізичні параметри енергоносія (робоча рідина) [26]. Це змушує розробляти математичні моделі на базі штучної динамічної моделі із приведеними коефіцієнтами для коливальної системи [27, 28], 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 [29-31], що спричиняє накопичення надлишкових, нереалізованих вібраційною і ВУ системою технологічних рухів [32]. Досвід показує, що ефективним є постановка нової задачі математичного моделювання ГВ та ГВУ машин в просторово-нестационарній формі, яка вимагає розробки нових більш повних і адекватних математичних моделей [33].

Використання детермінованого підходу до математичного опису технологічних процесів на основі ГВ та ГВУ машин [34] 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 [35, 36] із застосуванням положень теорії нечіткої логіки [37, 38], що вимагає розробки нових алгоритмів синтезу виробничих об'єктів в нечіткому середовищі.

У монографії визначена та розв'язана актуальна науково-прикладна проблема розробки єдиної методології математичного та комп'ютерного моделювання процесів функціонування ГВ і ГВУ машин з урахуванням особливостей цього класу об'єктів для забезпечення високої ефективності проектування відповідного типу технологічних систем.

У першому розділі проведено аналіз особливостей ГВ та ГВУ 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 ГВ та ГВУ 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 ГВ та ГВУ систем.

У другому розділі на основі аналізу взаємозв'язку множин конструктивних параметрів ГВ та ГВУ машин обґрунтовано

системний підхід до побудови математичних моделей динамічних процесів та систем. Встановлено закономірності ідентифікації вібраційних та ВУ 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 ГВ та ГВУ технологічних машин. Висунуті гіпотези стосовно визначення області стійкості роботи ГПТ із застосуванням критерію стійкості Гурвіца.

У третьому розділі обґрунтовано використання просторово-нестационарної постановки задачі для удосконалення математичної моделі динаміки процесів та систем ГВ і ГВУ 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 ІВ 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 ІВ для поверхневого ущільнення ґрунтів, які дозволили розробити методику експериментального дослідження робочих процесів в ГПТ, 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 ГВ і ГВУ машин, на основі інтегровано-розрахункового програмного середовища із використанням технології «клієнт-сервіс». Розроблено рекомендації для проєктних розрахунків головних параметрів ГТ. Виконано аналіз адекватності та ефективності розроблених математичних моделей.

Автори висловлюють особливу подяку доктору технічних наук, членові-кореспонденту Національної академії педагогічних наук України, професору Кветному Роману Наумовичу за допомогу та сприяння в отриманні основних результатів наукових досліджень і написанні монографії в цілому.

Наукове видання

**Іванчук Ярослав Володимирович
Іскович-Лотоцький Ростислав Дмитрович**

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

Монографія

Рукопис оформив *Я. Іванчук*

Оригінал-макет підготовлено в редакційно-видавничому відділі ВНТУ

Підписано до друку 20.11.2023 р.
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman. Ум. др. арк. 26,91.
Наклад 22 пр. Зам. № В2023-10.

Вінницький національний технічний університет,
Редакційно-видавничий відділ,
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, ГНК, к. 114
press.vntu.edu.ua;
email: irvc.vntu@gmail.com

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано ФОП Барановська Т. П.,
21021, м. Вінниця, вул. Порика, 7.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 4377 від 31.07.2012 р.