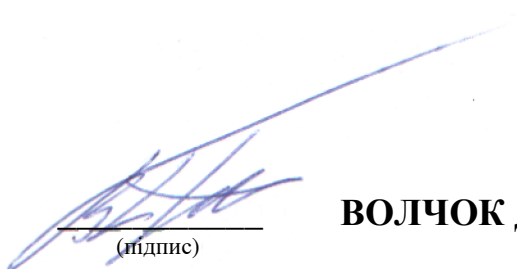


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ПРИДНІПРОВСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ БУДІВНИЦТВА ТА
АРХІТЕКТУРИ



(підпис)

ВОЛЧОК ДЕНИС ЛЕОНІДОВИЧ

УДК 539.3:624.07:517.9

**РОЗВИТОК МЕТОДІВ ТЕОРІЇ НЕЧІТКИХ МНОЖИН В ЗАДАЧАХ
БУДІВЕЛЬНОЇ МЕХАНІКИ ТА ОПТИМІЗАЦІЇ ПРОЕКТУВАННЯ
КОНСТРУКЦІЙ В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТЕЙ**

05.23.17 – будівельна механіка

РЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Дніпро – 2024

Дисертацією є рукопис _____.
(рукопис, монографія, сукупність статей)

Робота виконана в Придніпровській державній академії будівництва та архітектури
Міністерства освіти і науки України

Науковий консультант:
(за наявності)

доктор технічних наук, професор
Данішевський Владислав
Валентинович,
Придніпровська державна академія
будівництва та архітектури,
проректор з наукової роботи

Опоненти:

доктор технічних наук, професор **Зеленцов Дмитро Гегемонович**, Український державний хіміко-технологічний університет, завідувач кафедри інформаційних систем;

доктор технічних наук, професор **Дзюба Анатолій Петрович**, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, професор кафедри теоретичної та комп'ютерної механіки;

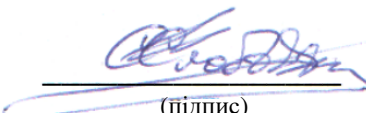
доктор технічних наук, професор **Курпа Лідія Василівна**, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри прикладної математики.

Захист відбудеться «19» квітня 2024 р. о 12-30 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.085.02 з присудження наукового ступеня доктора наук при Придніпровській державній академії будівництва та архітектури за адресою: 49005, м. Дніпро, вул. Архітектора Олега ПЕТРОВА, 24а, ауд. 202.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Придніпровської державної академії будівництва та архітектури (м. Дніпро, вул. Архітектора Олега ПЕТРОВА, 24а) та на сайті: <https://pgasa.dp.ua/dissertation/>.

Реферат розіслано «15» березня 2024 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
Д 08.085.02 д.т.н., проф.


(підпис)

Сергій СЛОБОДЯНЮК

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Сутність науково-прикладної проблеми, що розглядається в роботі, полягає в розробці узагальнених методів моделювання, оптимального проектування, аналізу технічних систем та їх елементів в умовах різномірної невизначеності випадкової, нечіткої, неточної природи та їх комбінацій.

Обґрунтування вибору теми дослідження. Коректні розв'язок і постановка проблеми розрахунку та оптимізації механічної систем або конструкції, на сучасному етапі розвитку комп'ютерних технологій, носить досить актуальний характер. Це пов'язано з тим, що з'являються нові технічні і алгоритмічні можливості для дослідників та інженерів розглянути раніше призупинені, або взагалі не розглянуті проблеми.

На особливу увагу заслуговують принципово нові підходи розрахунку конструкцій і споруд. Так, треба відзначити застосування теорії ймовірностей та теорії надійності в розрахунках споруд. Умовно такий підхід був названий ймовірнісно-статистичним (або просто статистичним). Довгий час вважалося: все, що потрібно для роботи з невизначеністю - це теорія ймовірностей. Однак, по мірі того, як змінювалося сприйняття людиною навколишнього світу, в деяких задачах адекватність теорії ймовірностей стала викликати сумніви. Основна суть цього підходу полягає в наступному. Величини, що входять в рівняння міцності, жорсткості, стійкості, коливань та інші, як-то: навантаження, характеристики властивостей матеріалу, геометричні характеристики форми конструкції, в тому числі геометрія перерізів елементів; граничні умови закріплення - розглядаються не як величини постійні, строго визначені (детерміновані), а як величини, що володіють відомою, іноді досить значною змінюваністю (розкидом, розсіюванням). З точки зору інформації, детерміновані величини відносять до типу даних з повною інформацією. В іншому випадку можливі варіації щодо даних з недовизначеною і невизначеною (неповною) інформацією. Вивчення таких величин для технічної системи (ТС) можливе на основі методів теорії ймовірностей, якщо природа зазначених вище параметрів носить випадковий характер, і методів теорії можливостей, якщо параметри описані нечітким чином. Як приклад випадкової величини наведемо вітрове навантаження і межу текучості сталі, модуль пружності описується нормальною функцією Гаусса. Прикладом нечіткої величини може бути точка прикладання навантаження: «навантаження прикладене приблизно в середині балки». Навіть такі, здавалося б постійні величини, як площа перерізу, момент опору, момент інерції, лінійні розміри деталі, в дійсності, є випадковими величинами (статистично змінними) внаслідок неминучих похибок виготовлення і вимірювання. Однак їх можна вважати також і нечіткими величинами. Тобто, поряд з ймовірнісно-статистичним підходом в будівельній механіці і проектуванні конструкцій вже активно розвивається важливий напрям досліджень - використання новітніх досягнень математики нечітких множин та теорії можливостей. Практичному застосуванню цих нових підходів повинна передувати велика дослідницька робота:

- по адаптації теорії нечітких множин та теорії можливостей в механіці;
- по нечіткому моделюванню;
- по розробці нових оптимізаційних моделей і методів їх реалізації в умовах

нечіткої інформації.

Визначивши, що на сучасному етапі розвитку методів м'яких обчислень неповна інформація характеризується відповідною невизначеністю (випадковістю реалізації якогось явища чи події, нечіткістю і неточністю вихідних і кінцевих даних проекту), треба зазначити, що підвищений інтерес до цього напрямку зростає також у зв'язку із швидким розвитком фундаментальних наук. Прикладні науки у сфері будівельної і машинобудівельної індустрії, безпеки споруд, військових технологій та інших напрямів теж стимулюють застосування сучасних математичних методів.

В сфері будівництва, яка є фундаментом розвитку економіки країни і роль якої стає особливо важливою при майбутньому відновленні, методи розрахунку споруд безперервно розвиваються. В останнє десятиліття інтенсивно розвивається багато важливих напрямів будівельної механіки, зокрема, питання динамічного розрахунку споруд, оптимального проектування, надійності. Методи розрахунку споруд і конструкцій корегуються з урахуванням сучасних досягнень в галузі матеріалознавства завдяки знаходженню матеріалів з новими властивостями та впровадженню нових технологій виробництва. Розрахунки на витривалість, стійкість, довговічність теж зазнають змін завдяки розвитку засобів сучасної обчислювальної техніки, математичних методів при розрахунку споруд та методів оптимального проектування і оцінки надійності конструкцій. Це дозволяє розв'язувати нові задачі та проблеми в тому числі в контексті толерантності складних ТС.

Треба зазначити, що сучасна сфера освіти також йде за трендами, які допомагають реалізувати цілі сталого розвитку (SDG), і програми підготовки в коледжах та університетах в країнах наших стратегічних партнерів корегуються відповідно до актуальних тенденцій. Так, програми з фізики «IB - Physics» Кембріджського університету, «A Level Physics for OCR» Оксфордського університету та відома Американська «Advanced Placement Physics» починаються з розгляду типів похибок, які можуть виникнути при вимірюванні під час досліджень, та невизначеностей. Розглядаються задачі щодо систематичних та випадкових похибок. Цікаво, що розглядаються найпростіші моделі поширення невизначеностей та методи оцінки кінцевого результату, у формі тієї невизначеності, яка розглядалась. Тобто розвиток методів м'яких обчислень співпадає, як з метою підвищення досягнень в STEM освіті, так і цілями сталого розвитку SDG 4: Якісна освіта, SDG 8: Гідна праця та економічне зростання, SDG 9: Промисловість, інновації та інфраструктура, SDG 11: Сталі міста та громади, SDG 12: Відповідальне споживання та виробництво.

Як бачимо, в сучасному світі значна увага приділяється формуванню розуміння, що зведена до детермінованих даних система не завжди в повній мірі відображає реальність. Включення різних типів невизначеності в математичні моделі та врахування впливу похибок, моделювання подальшого поширення невизначеностей дає більш адекватний результат для аналізу допустимості отриманих розв'язків, толерантності предмета дослідження до похибок або невизначеностей.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є розвиток наукового напрямку вирішення проблеми розрахунку, оптимального проектування будівельних

конструкцій та їх елементів (стержневих, оболонкових та континуальних систем) в умовах невизначеної інформації стохастичного, нечіткого та неточного виду, постановка нових задач із застосуванням та адаптацією методів м'яких обчислень, розробка методів реалізації та дослідження властивостей конструкцій за умови різних типів невизначеності.

Для досягнення цієї мети потрібно вирішити такі **завдання дослідження**:

1. Провести аналіз існуючих методів врахування невизначеності та їх досвід застосування в задачах будівельної механіки.

2. Для стержневих систем типу «балка» розробити графоаналітичний метод розрахунку задач на міцність та жорсткість, за умови коли дані та мета проектування задаються словесними квантифікаторами. Розробити метод побудови функції належності за допомогою розв'язання локальної оптимізаційної задачі та принципу узагальнення в α -рівневому підході. Розв'язати задачі аналізу балок за умови нечіткого завдання даних, провести аналіз впливу нечіткої невизначеності на очікуване значення. Для задачі розрахунку великих прогинів стержня розробити процедуру обчислення очікуваного значення відносного навантаження. Для фермових конструкцій розробити процедуру оцінки коефіцієнта надійності за умови нечіткої та стохастичної інформації. Розробити процедуру графоаналітичного методу для ферм. Використовуючи Декартів добуток, оцінити очікуване значення результату оптимального проектування при декількох невизначених параметрах. Оцінити вплив нечіткого модуля Юнга на оптимальний проект з використанням різних функцій належності, отримати його очікуване значення, розв'язавши обернену задачу. Побудувати процедуру оцінки впливу тріщини нечітких розмірів на оптимальні показники проекту. Для ферми, за умови додаткового обмеження щодо власної частоти коливань та при нечіткому завданні власної частоти та навантаження, провести дослідження впливу нечіткості на результат.

Для статично невизначених стержневих систем, при розв'язанні яких права частина канонічного рівняння подана нечітко, запропонувати метод оцінки невизначеності. Дослідити питання проектування пружин в умовах неповної інформації.

3. Для ізотропної оболонки, стисненої поздовжньою силою, розробити метод реалізації моделі з обмеженнями на шанси, для можливого пошуку оптимістичного чи песимістичного значення цільової функції. Розробити процедуру нечіткого подієвого програмування для такої оболонки, провести чисельні експерименти. Розробити процедуру пошуку максимального значення осьової сили при нечітких даних в задачі невизначеного програмування. Розробити геометричну процедуру пошуку можливості реалізації ситуації, коли обмеження та цілі подані нечітко. Розробити методи реалізації задач при неточних даних з верхнім та нижнім наближенням. Розробити процедуру пошуку навантаження при стохастичних даних. Запропонувати обчислювальні підходи реалізації оптимізаційної задачі в умовах завдання випадково-нечіткої і нечітко-випадкової інформації.

4. Для ортотропної армованої циліндричної оболонки під дією зосередженої сили та в умовах трьох граничних станів розробити метод розв'язання оберненої задачі в умовах нечіткого завдання навантаження. Розробити процедури та методи розв'язання прямої задачі визначення максимального навантаження стиснутої

ортотропної оболонки за наявності невизначеностей стохастичної, нечіткої та неточної природи. Дослідити вплив нечітких та випадкових даних на результат вагової оптимізації. Запропонувати процедуру знаходження шансу виконання події, порівняти вплив різномірної невизначеності.

5. Для циліндричної ортотропної оболонки із склопластику за умови одного граничного стану розглянути методи реалізації задачі вагової оптимізації в стохастичному, нечіткому середовищі. Запропонувати методи для розв'язання задачі оцінки максимального значення осьової сили при заданих крутному моменті та зовнішньому тиску при нечітких геометричних характеристиках.

6. Провести аналіз залізобетонної попередньо-напруженої балки довжиною 33 м, яка використовувалась при будівництві Центрального мосту в м. Дніпро щодо її чутливості до нечітких даних.

7. Розробити оптимізаційну математичну модель для розрахунку та проектування шаруватих гумовокордових оболонок обертання за умови завдання початкових даних в нечіткій формі. Спроекувати оптимальну геометрію конструкції найбільшої в світі шини 40.00-57 з оптимальними експлуатаційними характеристиками.

8. Впровадити нові підходи роботи з невизначеністю до навчального процесу та в реальне проектування.

Об'єкт дослідження – поведінка технічних систем, таких як: стержень, ізотропна оболонка, ортотропна оболонка, реальних складних технічних нелінійних систем в умовах неповної інформації.

Предмет дослідження – розробка технології та методів розв'язання задач аналізу, синтезу, оптимального проектування з позиції методів м'яких обчислень.

Методи дослідження. Для розв'язання поставлених оптимізаційних задач та задач аналізу в умовах невизначеної інформації використовуються: метод Монте-Карло, метод динамічного програмування, метод локальних варіацій. Формалізація невизначеності відбувається з використанням методів м'яких обчислень в залежності від типу невизначеності. Достовірність результатів забезпечується використанням апробованих методів розрахунку стержневих, оболонкових ізотропних та ортотропних конструкцій та перевіркою збіжності розрахунків детермінованих задач.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у впровадженні нових підходів і методів «м'яких обчислень» в задачах будівельної механіки та будівництва, розробці відповідних методів реалізації нових задач.

Вперше:

- Систематизовано та надано розвиток адаптованих методів м'яких обчислень для розв'язання задач будівельної механіки. Розроблено нові узагальнені підходи, що формують нове сприйняття класичних і нових задач в сфері будівництва, надаючи можливість оцінити границі можливої похибки, вплив різномірної невизначеності, оцінити очікуване значення.

- Розроблено оптимізаційні моделі і методи їх реалізації в умовах нечіткої, неточної, випадково-нечіткої, нечітко-випадкової інформації про вихідні дані або/та про бажані результати в задачах будівництва та будівельної механіки.

- Обґрунтована необхідність включення в класичні детерміновані задачі

розрахунку урахування невизначеності різних типів. Доведено доцільність проведення розрахунків на толерантність щодо впливів невизначеності як для складних нелінійних систем, так і простих лінійних.

- Досліджено відмінність результатів за різними теоріями невизначеності для задач будівельної механіки, що дає розуміння впливу самої теорії.

- Чисельно доведено, що помилки, неточність визначення величин механіки і геометричних характеристик мають тенденцію до меншого впливу на кінцевий результат, ніж помилки проектування і виготовлення для досліджених технічних систем.

- Розв'язано за допомогою нових підходів нетипові задачі проектування, аналізу, оптимального пошуку. Серед таких задач пошук уразливих місць конструкції та «невеликих» впливів, що призводять до руйнувань; це має також військове застосування при усуненні слабких місць споруди.

- На базі розроблених нових моделей і методів впроваджено принципово нові підходи при проектуванні в будівництві, де те, що ми бажаємо отримати, формулюється в термінах лінгвістичних змінних. Отримані в роботі результати є базою для впровадження відповідних програмних модулів обробки невизначених даних до програмних комплексів в сфері будівництва для задач проектування та оптимізації.

Набули подальший розвиток:

- Математична модель розрахунку контактної взаємодії шаруватих гумовокордових оболонок була вбудована до моделі оптимального проектування в умовах нечітких даних, що дозволяє проводити моделювання в умовах, які більш адекватно відображають об'єкт дослідження - шарувату гумовокордову оболонку обертання, реальним фізичним, механічним та експлуатаційним умовам. Новий підхід дає можливість розв'язати задачі, які раніше розв'язати не вдавалось.

- Класичні підходи до розрахунку стержневих, оболонкових та континуальних систем, які завдяки формалізації невизначеності, більш адекватно відображають реальний об'єкт в розрахункову схему та модель розрахунку, аналізу, оптимізації.

Практичне значення отриманих результатів.

Застосування нечітких множин в механіці конструкцій:

- Дає адекватність опису реальних вихідних даних з урахуванням можливих помилок, неточності вимірювання, виготовлення щодо величини навантажень і місця їх застосування, механічних характеристик і інших параметрів стану, розрахункових схем.

- Дозволяє проводити відповідний аналіз напружено-деформованого стану (НДС) технічних систем при невизначеному завданні вихідних даних.

- Дозволяє виявляти закономірності впливу вихідних нечітких параметрів даних технічної системи на точність отримання результатів, толерантність, чутливість, стійкість. Проектувати з урахуванням майбутнього очікуваного стану конструкції.

- Надає нові підходи для розрахунку коефіцієнтів запасу технічних систем в умовах невизначеності.

- Надає нові підходи до задач проектування, коли цілі проектування задаються в термінах приблизного очікуваного результату, тобто при формулюванні мети та

обмежень задач невизначеним чином.

- Дозволяє апріорно включати отримані моделі в математичну модель проектувального розрахунку.

- Як практичний результат моделювання реальних конструкцій в умовах невизначеності, запроєктовано оптимальну геометрію найбільшої в світі шини 40.00-57, що має військове та цивільне призначення. Технології для виготовлення таких шин є лише в 5 країнах світу. В даний момент часу в Україні відновлення цієї галузі є показником тих високих технологій, які відрізняють країни зі стійкою економікою від інших. Оскільки в нашій країні багато родовищ з відкритим способом видобутку, то ці проблеми можна віднести до набуття безпекової незалежності України.

- Проведено аналіз толерантності, чутливості попередньо-напруженої залізобетонної мостової балки, де було виявлено, що навіть мала нечіткість у завданні частоти може викликати руйнування балки. Така балка є досить розповсюдженою при виготовленні мостів в Україні, тому при подальшому проектуванні слід врахувати таку її особливість.

Особистий внесок здобувача. Основні результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно. Роботи [11, 17, 18, 20, 36, 47] надруковані без співавторів. Матеріали, що опубліковані у співавторстві і використані в дисертації, одержані здобувачем особисто:

- В роботах [3, 44] результати розрахунків попередньо-напруженої залізобетонної балки за умови невизначених параметрів, адаптація операцій з нечіткими числами, аналіз «толерантності» системи.

- В роботах [1, 4, 11, 12, 13, 14, 34, 36, 37, 39, 40, 41, 42, 43, 47] постановки задач для стержневих систем в умовах невизначеностей нечіткого, неточного та стохастичного характеру та отримані результати. В роботах [1, 4, 36, 37] методи реалізації задачі оптимального проектування ферми при нечіткому моделюванні, врахування нечітко-випадкових параметрів, оцінка коефіцієнта надійності по навантаженню, метод отримання очікуваного модуля пружності матеріалу ферми розв'язанням оберненої задачі, перевірка збіжності в задачах з фермою. В [11, 14, 41, 42] формування області допустимих розв'язувань ферми з урахуванням тріщини, оцінка ресурсу елемента конструкції з тріщиною в нечітких умовах, оптимальне детерміноване та нечітке проектування ферми із тріщиною. В роботах [12, 43] для складної ферми впровадження процедур нечіткого моделювання, перевірка збіжності з використанням програмного комплексу МКЕ.

- В роботах [13, 34] методи графічного пошуку можливості реалізації події та знаходження відповідних параметрів виконання нечітких умов проектування балок, результати нечіткого аналізу балок в [14]. В роботі [47] підходи оцінки невизначеності для статично невизначених рам, моделювання яких потребує розв'язання системи лінійних алгебраїчних рівнянь, за критерієм мінімізації значення квадрату нев'язки, а також результати та аналіз моделювання в нечітких умовах.

- В роботі [15] аналіз результатів прямої та двоїстої детермінованої задачі для криволінійних стержневих систем, розв'язання задачі в умовах невизначеної інформації.

- В роботах [7, 8, 9, 19, 22, 23, 24, 45] постановки, розв'язки та аналіз результатів в задачах для ізотропної оболонки в умовах трьох граничних станів за умови невизначеності даних, перевірка збіжності результатів до детермінованих. Розробка методів неточного моделювання в [7], нечіткого в [8] та стохастичного в [9] та змішаного нечітко-випадкового, випадково-нечіткого в [19, 45] для прямої задачі. Розробка методу розв'язання задачі пошуку шансу виконання події в [22] для нечітких даних та геометрична інтерпретація в [23]. Метод розв'язання оберненої задачі з обмеженнями на шанс в [24].

- В роботах [2, 5, 6, 16, 38, 46] постановки, розв'язки та аналіз результатів в задачах для ортотропної оболонки в умовах трьох граничних станів за умови невизначеності даних, перевірка збіжності результатів до детермінованих. В [2, 5, 38] розробка методів обчислення імовірнісної, нечіткої, неточної міри невизначеності, розробка процедур прямої задачі визначення максимального навантаження в умовах невизначеності. В [6, 16, 46] розробка методів пошуку оптимальних функцій належності та очікуваних значень для різних інформаційних ситуацій в оберненій задачі за умови нечіткої та стохастичної [16, 46] інформації.

- В роботі [21] перевірка збіжності за детермінованою процедурою пошуку оптимального обсягу матеріалу ортотропної оболонки за умови одного граничного стану. Постановка, розробка методів реалізації і розв'язки для стахостичної і нечіткої задачі оптимізації.

- В роботах [10, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 35, 48, 49, 50] до особистого внеску відносяться формулювання нових задач варіантного проектування гумово-кордових оболонок, складання розрахункової схеми, результати чисельних розрахунків НДС та експлуатаційних показників оболонок, аналіз результатів, нові конструкції оболонок шин. В роботах [25, 26, 32, 48] для шин 29.5-25 та 15.5R38 знаходження найкращих параметрів для забезпечення найкращих експлуатаційних показників оболонок. В роботах [27, 49] для оболонок 21.00-33 та 21.00-35 поліпшення конструкції та побудова нестационарних температурних режимів експлуатації. В [31] для шини 205/70R14 постановка та розв'язання задачі з наїздом на перешкоду. В [33] постановка та розв'язання контактної задачі при обжимі оболонки 33.00-51 на стендовий барабан. В роботах [28, 30, 50] нова конструкція шини 40.00-57, як результат варіантного та масштабного моделювання. В роботах [10, 35] формулювання нових задач оптимального проектування оболонок в нечітких умовах, розробка адаптованої до нових задач математичної моделі, нова оптимальна конструкція шини 40.00-57, результати розрахунків експлуатаційних показників нової шини.

- В спільних роботах, що додатково відображають наукові результати дисертації [51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60] здобувач приймав участь в постановці задач та аналізі отриманих результатів.

Усі наукові праці, що склали основу докторської дисертації були опубліковані та апробовані після захисту кандидатської дисертації. У поданій докторській дисертації результати кандидатської дисертації Волчка Д.Л., крім випадків посилань, не використовуються.

Вважаю необхідним висловити слова подяки своїм вчителям, це проф. Бараненко В.О. та проф. Кваша Е.М. Завдяки їх наставництву стала можливою

реалізація наведених в роботі нових наукових напрямів.

Апробація матеріалів дисертації. Результати дисертаційної роботи доповідались і одержали позитивні оцінки на наукових конференціях, форумах і семінарах: III освітній форум академічної спільноти «*Готуємо фахівців для відбудови України*» (м. Дніпро, 2023 р.); Всеукр. наук.-практ. форум «*Переможемо – Відбудуємо*» (м. Дніпро, 2022 р.); Друга міжн. наук.-техн. конф. пам'яті академіка В.І. Моссаковського «*Актуальні проблеми механіки суцільного середовища і міцності конструкцій*» (м. Дніпро, 2019 р.); Actes du 2 colloque international francophone en Ukraine «*"Langues, sciences et pratiques"*» (Dnipro, 2018); International Symposium «*Stability of structures XV symposium*» (Zakopane, Poland, 2018); Міжнародної наук.-практ. конф. «*Сучасні методи і проблемно-орієнтовані комплекси розрахунку конструкцій і їх застосування у проектуванні і навчальному процесі*» (м. Київ, 2018 р.); Міжнародна конф. «*XIX міжнародна конференція з математичного моделювання, присвячена 250 – річчю з дня народження Жана Батиста Жозефа Фур'є*» (м. Херсон, 2018 р.); Міжн. наук.-тех. конф. «*Динаміка, міцність та моделювання в машинобудуванні*» (м. Харків, 2018 р.); Міжн. наук.-тех. конф. «*Сучасні проблеми механіки та математики*», (м. Львів, 2018); RCEPB «*Innovative and clean solutions for the built environment*» (Bucarest, Romania, 2018); Міжнародна наук.-практ. конф. «*Сучасні методи і проблемно-орієнтовані комплекси розрахунку конструкцій і їх застосування у проектуванні і навчальному процесі*» (м. Київ, 2017 р.); Міжнародна конф. «*XVIII міжнародна конференція з математичного моделювання, присвячена 100 – річчю з дня народження академіка Ю.О. Митропольського*» (м. Херсон, 2017 р.); VIII Всеукраїнська наук.-практ. конф. «*Інформатика та системні науки*» (м. Полтава, 2017 р.); RCEPB «*Strategies of professional associations and public institutions for implementation of EU directives*» (Bucarest, 2016); GAMM «*The 82nd Annual Scientific Conference of the International Association of Applied Mathematics and Mechanics*» (Graz, Austria, 2011); ESMS «*8th European Solid Mechanics Conference*» (Graz, Austria, 2012); GAMM «*The 81st Annual Scientific Conference of the International Association of Applied Mathematics and Mechanics*» (Karlsruhe, Germany, 2010); Міжвузівський науково-технічному семінар «*Динаміка, стійкість та міцність конструкцій*» (2021). Матеріали дисертації щорічно доповідались на Українсько-Польському науковому семінарі «*Theoretical Foundations of Civil Engineering*» з 2005 по 2014 рік включно в рамках договору про міжнародне науково-технічне співробітництво між Warsaw University of Technology та ПДАБА.

Матеріали дисертації у повному обсязі доповідались на засіданнях фахового семінару ПДАБА (2023) та наукового семінару «*Математичне моделювання та оптимізація складних систем*» УДХТУ (2024), пройшли експертизу на факультеті цивільної інженерії Warsaw University of Technology (2024) та отримали позитивну оцінку.

Публікації. Основні положення, результати та висновки дисертаційної роботи відображено в 60 наукових публікаціях, з яких **основні наукові результати: 33** статті (29 у наукових фахових виданнях України (7 включені до міжнародної наукометричної бази Web of Science) та 4 статті у зарубіжних наукових періодичних виданнях (2 включені до міжнародних наукометричних баз Scopus та

Web of Science, та 2 до бази Copernicus)); **апробація** результатів дисертації в **17 тезах** доповідей; **10** праць, які **додатково** відображають наукові результати дисертації серед яких: 2 публікації включені до наукометричної бази Web of Science та 1 до Scopus, три патенти.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з анотації, вступу, семи розділів, висновків, списку використаних джерел і 3-х додатків. Повний обсяг дисертаційної роботи – 392 сторінки, у тому числі обсяг основного тексту – 287 сторінок (12 авторських аркушів). Дисертація містить 100 таблиць, 156 рисунків. Список використаних джерел включає 276 найменувань на 27 сторінках. Додатки викладено на 45 сторінках.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами.

1. Грант: Alexander von Humboldt Foundation (Institutional academic cooperation programme, grant no. 3.4-Fokoop-UKR/1070297).

2. Стипендіальна програма "Eugen Ionescu" Університетської Агенції Франкофонії (AUF) ініційована Урядом Румунії в 2015-2016 роках за темою дослідження "Calcul des elements constructifs a condition que les donnees initiales sont incompletes".

3. TEMPUS SEHUD № 530197-Tempus-1-2012-1-IT-TEMPUS-JPCR "Architecture and Sustainable Development Based on Eco-Humanistic Principles & Advanced Technologies without Losing Identity" 2012-2017 р. (сертифікат виданий директором департаменту міждисциплінарного дизайну у штучному середовищі Кембріджського університету)

4. Експерт міжнародного проекту «Atlas de l'expertise» з 2018 р.

5. Держбюджетна тема з номером держреєстрації 0116U00649 «Міцність, жорсткість, стійкість і коливання однорідних і неоднорідних стержнів, пластин, оболонок та композиційних конструкцій, включаючи об'єкти біологічного походження» в 2016-2020 роках, виконавець.

6. Держбюджетна тема з номером держреєстрації 0121U109643 «Механіка тонкостінних конструкцій, неоднорідних матеріалів та біологічних тканин» в 2021-2023 роках, виконавець.

7. Проект EffectFact № 101008140 в рамках H2020 програми MSC Action: RISE-2022.

8. Проект The BRIDGE №101127884 (ERASMUS-EDU-2023-CBHE).

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** наведено сутність науково-практичної проблеми, обґрунтовано актуальність теми, показано зв'язок з науковими програмами, сформульовано мету і завдання дослідження, наукову новизну та практичне значення отриманих результатів. Висвітлено особистий внесок здобувача в наукових працях, опублікованих у співавторстві. Подано відомості про апробацію матеріалів дисертації та публікації.

В **першому** розділі наведено аналіз літератури, що обґрунтовує необхідність розвитку методів теорії нечітких множин в задачах будівельної механіки та оптимального проектування конструкцій (ОПК). Сформульовано основні тези відмінності між випадковістю і нечіткістю. Випадковість пов'язана з

невизначеністю, що стосується належності чи неналежності деякого об'єкту до нерозпливчастої безлічі. Поняття ж розпливчастість (нечіткість) відноситься до класів (об'єктів), в яких можуть бути різної градації ступеня належності, проміжні між повною належністю і неналежністю об'єктів до даного класу. Ступінь розсіювання тієї чи іншої величини характеризується відповідною функцією - функцією розподілу, щільністю випадкової величини в теорії ймовірностей і функція належності в теорії можливостей, верхнім і нижнім наближенням в теорії «неточних множин». Навіть відповідно до академічного тлумачного словнику української мови ці поняття відрізняються за змістом. Так, шанс - це ймовірна можливість здійснення чого-небудь, а можливість - засіб, умова, необхідні для здійснення чого-небудь. Можливий – це такий, який може статися, мислимий, здійснений, допустимий. Стан теорії ОПК та задач будівельної механіки в умовах неповної інформації дозволяє зазначити, що поки що найбільше застосування знайшла теорія ймовірностей. Без розв'язання залишається багато задач в яких початкова інформація, обмеження або цілі, а можливо і їх комбінація, виражені нечітким, неточним чином. Потребують розвитку постановки і розв'язання задач будівельної механіки, в яких відбувається злиття теорії ймовірностей з теоріями нечітких та неточних множин, що дозволяє більш адекватно описувати деякі критерії, обмеження, умови функціонування щодо оптимізаційних моделей, а як наслідок отримувати очікувані результати більш наближені до дійсних.

У **другому** розділі показано що для невизначеної події доцільно використовувати узагальнене поняття «шансу» виконання $Ch(A) \geq \beta$ із заздалегідь заданим рівнем невизначеності β . Поняття міри виконання невизначеної події (1) повинно включати такі міри невизначеності як імовірнісна міра, міра можливості і міра неточності:

$$Ch(A) = \begin{cases} Prob(g_j(x, \xi) \leq 0), \text{ для випадкових даних;} \\ Pos(g_j(x, \xi) \leq 0), \text{ для нечітких даних;} \\ Tr(g_j(x, \xi) \leq 0), \text{ для неточних даних.} \end{cases} \quad (1)$$

Сформульовано інформацію про можливі критерії якості оптимального проекту, можливі обмеження та дані, що в подальших розділах роботи застосовано при розгляді задач оптимізації в сфері будівництва та будівельної механіки. В розділі наводиться загальний опис математичних моделей та методів реалізації моделей, що були застосовані при розгляді об'єктів оптимізації стержневих, оболонкових та континуальних систем. Так як головним чином робота концентрується на впровадженні теорії нечітких множин та симбіозному використанні з іншими теоріями м'яких обчислень, то в розділі наведено означення нечіткої множини та її основні елементи. Нечітка множина A (2) в непустому просторі X має назву множини впорядкованих пар (кортежей):

$$A: \{\mu_A | x; x \in X\}, \quad (2)$$

де $\mu_A: X \rightarrow [0,1]$ є так звана *функція належності* деякого елементу x множини X (універсум). Вона характеризує ступінь, з яким елемент x належить деякій множині A .

Показано функції належності, найбільш поширені з яких на рис. 1 та їх математичний опис (3). Відповідний підбір функцій належності, зазвичай, знаходиться поза теорією нечітких множин.

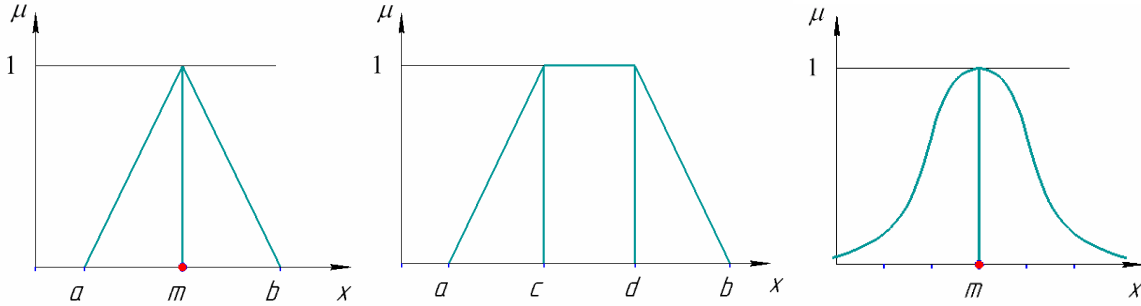


Рисунок 1 – Поширені функції належності: трикутна, трапеція та Гауса

$$\mu_A(x) = \begin{cases} \frac{x-a}{m-a}, & \text{if } a \leq x < m \\ 1, & \text{if } x = m \\ \frac{b-x}{b-m}, & \text{if } m < x \leq b \\ 0 & \end{cases} \quad \mu_A(x) = \begin{cases} \frac{x-a}{c-a}, & \text{if } a \leq x \leq c \\ 1, & \text{if } c \leq x \leq d \\ \frac{b-x}{b-d}, & \text{if } d \leq x \leq b \\ 0 & \end{cases} \quad \mu_A(x) = \begin{cases} 0, & x \rightarrow \infty \\ e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}}, & a \leq x \leq b \\ 0, & x \rightarrow -\infty. \end{cases} \quad (3)$$

Наведено опис деяких операцій над нечіткими множинами, таких як: декомпозиція, операція перетину двох нечітких множин, операція об'єднання, Декартовий добуток. Для найбільш поширених функцій належності (трикутного та Гаусового виду) розглянуто порядок визначення границь множин α -рівнів (4):

$$X_L(\alpha) = m\alpha + (1-\alpha)a; \quad X_R(\alpha) = m\alpha + (1-\alpha)b; \quad \alpha \in [0,1];$$

$$X_L(\alpha) = m - \sigma\sqrt{-2\ln\alpha}; \quad X_R(\alpha) = m + \sigma\sqrt{-2\ln\alpha}, \quad 0 < \alpha \leq 1. \quad (4)$$

Задачі за умови невизначеної інформації пропонується звести до таких моделей математичного програмування як: нечітка модель очікуваного значення; з можливісними обмеженнями; модель нечіткого подійного програмування; модель з різномірною невизначеністю, а саме: нечітко-випадкового та випадково-нечіткого виду; модель неточної оптимізації з нечіткими інтервальними границями вихідних параметрів; нечітка модель імітаційного програмування. Щодо оптимізації конструкцій в умовах невизначеної інформації в роботі знайшли застосування методи: Монте-Карло, метод динамічного програмування, метод локальних варіацій, метод множників Лагранжа, графоаналітичний метод.

Показано етапи технології розв'язання задач при нечіткому моделюванні: фазифікація; розрахунок, аналіз або оптимізація; дефазифікація. При використанні теорії ймовірностей та неточних множин будемо також мати три етапи, але вони будуть реалізовані з використанням методів властивих для відповідного виду невизначеності.

У **третьому** розділі показано застосування нових підходів на прикладі стержневих систем. Так при проектуванні простої шарнірної балки, що навантажена розподіленим навантаженням, використано графоаналітичний метод пошуку можливості реалізації події. Було введено функції Φ_0, Φ_1, Φ_3 що відображають через параметр висоти поперечного перерізу бажаний обсяг та обмеження за умови

завдання навантаження (рис. 2) та обсягу нечітким чином. Результату $Q = (\Phi_0 \cap \Phi_3) \wedge (\Phi_0 \cap \Phi_1)$ задовольняє точка С (рис. 3) для якої $\mu = 0,7097 \rightarrow h = 13 \text{ см}$.

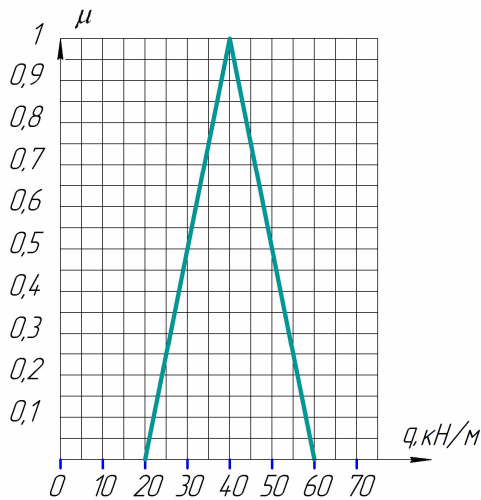


Рисунок 2 – Нечітке навантаження

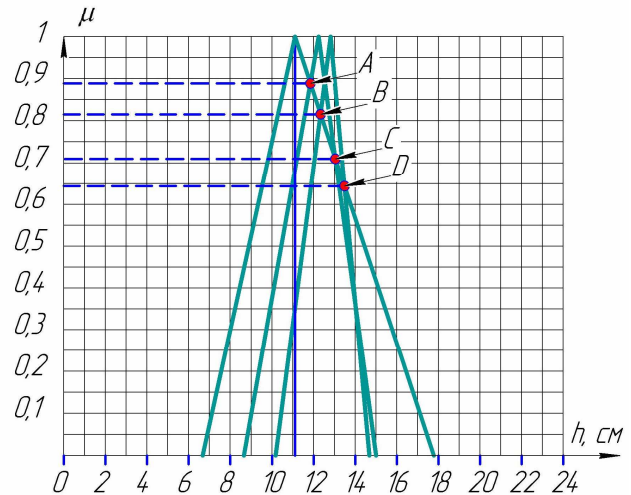


Рисунок 3 – Суміщення нечітких чисел

Проектувальний розрахунок повинен відповідати умовам міцності та жорсткості. Для випадку $q_1 = 34 \text{ кН/м}$, $h = 13 \text{ см}$ умови міцності та жорсткості виконуються:

$$\sigma = \frac{3ql^2}{4bh^2} = \frac{3 \cdot 34 \cdot 9 \cdot 10^4}{4 \cdot 15 \cdot 169} 10^{-1} = 90,5 < 120 \text{ МПа}, \quad f = \frac{5 \cdot 34 \cdot 81 \cdot 10^8}{32 \cdot 15 \cdot 2 \cdot 10^6 \cdot 2197} = 0,653 \leq 0,8 \text{ см}.$$

Для випадку $q_2 = 46 \text{ кН/м}$ умови міцності та жорсткості не виконуються.

Для статично невизначеної балки, що закріплена жорстко одним кінцем і шарнірно оперта іншим показано приклад задачі визначення згинального моменту M_{max}^P в точці прикладення навантаження і реактивного моменту M_R при нечітких даних щодо сили та її положення. Відповідні результати впливу розкиду початкових даних на відхилення від точних значень наведено на рис. 4.

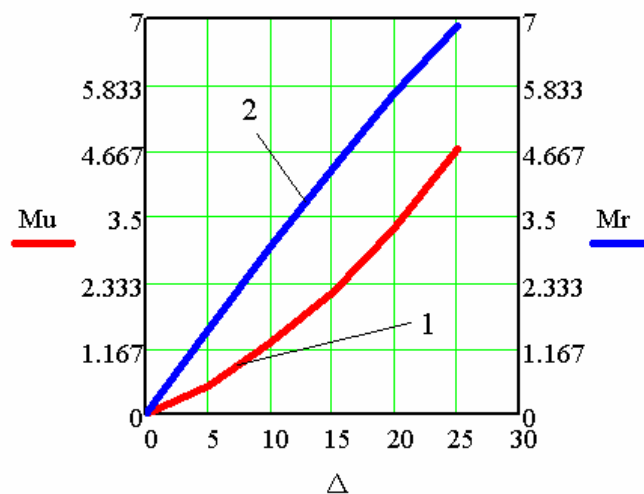


Рисунок 4 – Залежність впливу розкиду $\Delta = m - a$ і $\Delta = b - m$ (%) початкових даних на відхилення дефазифікованих значень (%):

1 – момент M_u , 2 – момент M_R

Треба відзначити, що із збільшенням розкиду параметрів нечіткості σ , a_c , b_c збільшується за модулем значення реактивного моменту та зменшується значення згинального моменту.

Для пружної шарнірної балки під дією зосередженого навантаження P , прикладеного на відстані a від лівої опори, реалізовано проект, коли для сили $P(a_p, m_p, b_p)_\Delta$ і обсягу $V(a_v, m_v, b_v)_\Delta$ взяті функції належності трикутного виду. Для двох прикладів через параметр ширини перерізу записані функції $\Phi_0(V) = b = V / hl$,

$\Phi_1(P) = b = \frac{6Pl\alpha\beta}{h^2[\sigma]}$, $\Phi_2(P) = b = \frac{4Pl^3(\alpha\beta)^2}{Eh^3[y]}$ та знайдено розв'язки (рис. 5).

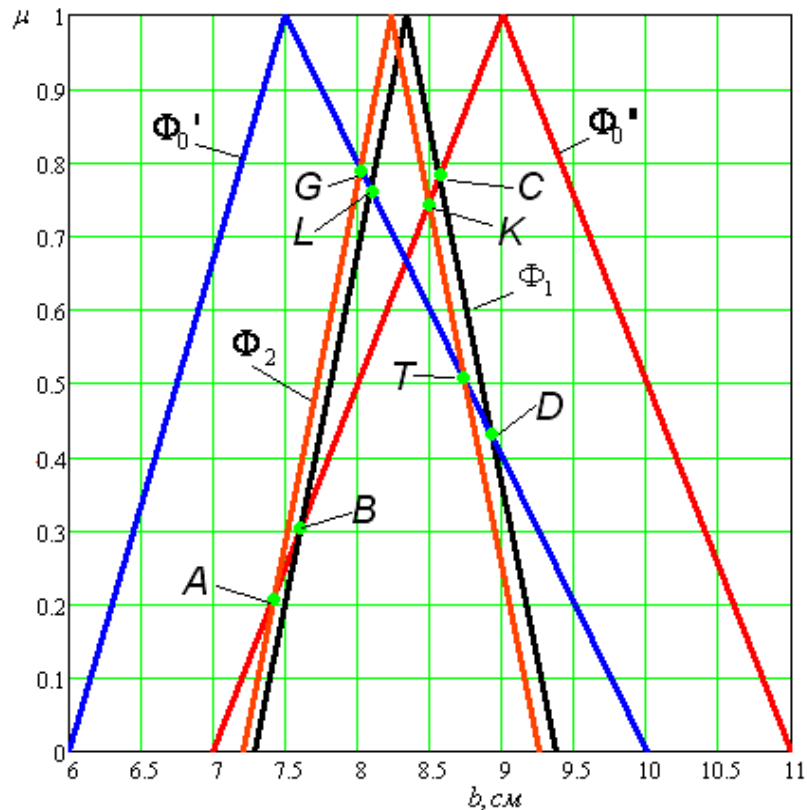


Рисунок 5 – Розв'язання для двох прикладів

Аналіз розв'язків показав, що для $\mu^* = 0.52$ підстановка $b = 8.7 \text{ см}$ і $P^* = 76 \text{ кН}$ в умови обмежень їх не порушує: $\sigma = 145.6 < 160 \text{ МПа}$; $y = 13.5 < 15 \text{ мм}$. Друга інформаційна ситуація для $\mu^* = 0.31$, за умови виконання обмежень, дає розв'язок $P^* = 73.8 \text{ кН}$; $V^* = 7.85 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3$;

Для статично невизначеної балки защемленої по кінцях розглянуто два випадки: величина навантаження P "близько до 20 кН" для першої та "трохи більше, ніж 20 кН" для другої інформаційної ситуації. Місце застосування "біля середини балки" ($l = 6 \text{ м}$, $m_p = 20 \text{ кН}$, $m_c = 3 \text{ м}$). Результати наведені на рис. 6 та рис. 7 відповідно для першої та другої ситуацій.

Для задачі аналізу поведінки гнучких стержнів в умовах нечітких даних, матеріал яких узгоджується із законом Гука, класичний підхід передбачає інтегрування нелінійного диференціального рівняння:

$$\frac{d^2\varphi}{ds^2} = -\bar{P} \sin \varphi; \quad 0 \leq s \leq 1; \quad \bar{P} = \frac{P}{EI}, \quad (5)$$

де: P - зосереджена сила; φ - кут нахилу дотичної в поточній точці пружної лінії до осі Oy ; s - довжина дуги пружної лінії, яка відраховується від її початку; EI - жорсткість стержня

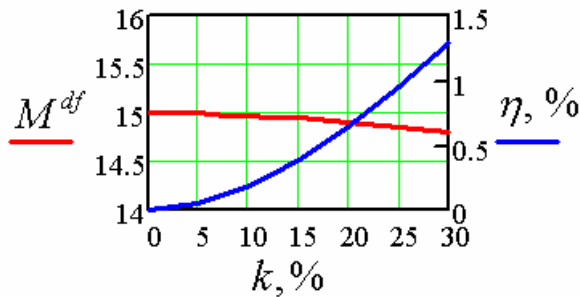


Рисунок 6 – Графік залежності величини дефазифікованого значення M^{df} та його відхилення η від M^{det} залежно від ступеня розмитості

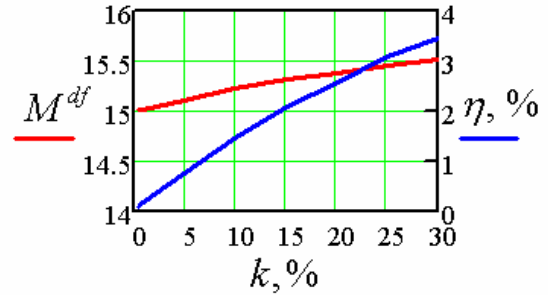


Рисунок 7 – Графік залежності величини дефазифікованого значення M^{df} та його відхилення η від M^{det} залежно від ступеня розмитості

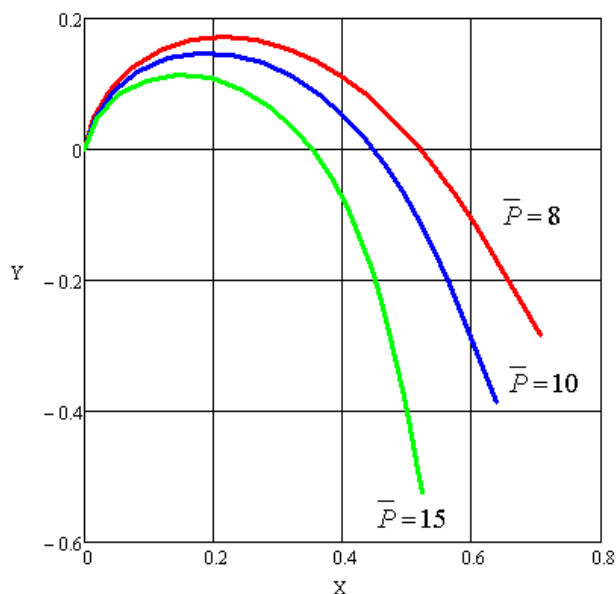
Координати точок пружної лінії стержня визначаються за такими формулами:

$$y(s) = \int_0^s \cos \varphi ds; \quad x(s) = \int_0^s \sin \varphi ds; \quad 0 \leq s \leq 1. \quad (6)$$

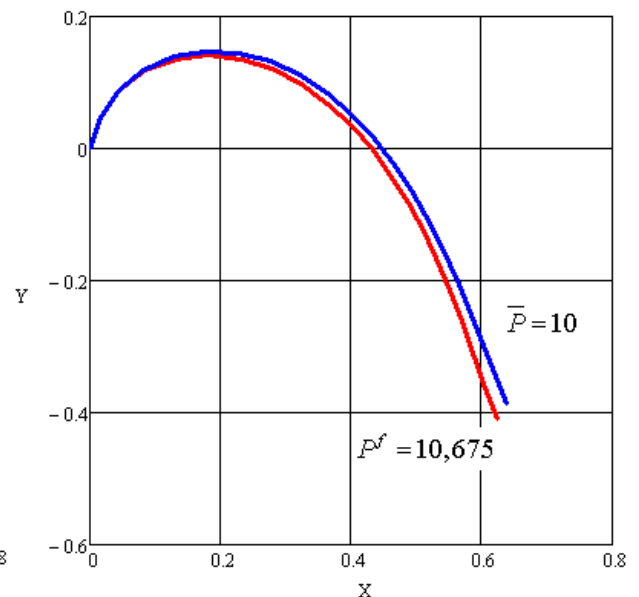
Для розв'язання задачі (5) мінімізація функціоналу здійснено за методом динамічного програмування. Інтеграл замінено кінцевою сумою:

$$\int_0^1 \left[\frac{1}{2} (\varphi^1)^2 + \bar{P} \cdot \cos \varphi \right] ds \approx \sum_{i=1}^N \left[\frac{1}{2} \left(\frac{\varphi_{i+1} - \varphi_i}{\Delta s} \right)^2 + \bar{P} \cdot \cos \varphi_i \right] \Delta s. \quad (7)$$

Для випадку $\bar{P}(8,10,15)_\Delta$ маємо результати на рис. 8.



а)



б)

Рисунок 8 – Картина деформованого стану тонкого стержня:
а) нечітка інтерпретація навантаження; б) дефазифікація навантаження

В розділі показано підходи визначення коефіцієнту надійності для ферм у випадках нечіткої та стохастичної інформації. Для 4-х елементної ферми (рис. 9) розв'язано ряд задач. Перша, це пошук можливості реалізації нечітких задач проектування (нечіткого бажаного об'єму) для трьох випадків графоаналітичним способом (рис. 10). Нечітке обмеження від навантаження запишеться у вигляді нечіткої площі $A_1 = \frac{0}{50.4} + \frac{1}{60} + \frac{0}{66.6}$.

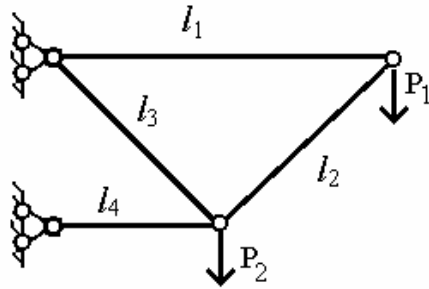


Рисунок 9 – Розрахункова схема ферми:

$$l_1 = 1000\sqrt{2} \text{ мм}, \quad l_2 = l_3 = 1000 \text{ мм}, \\ l_4 = 500\sqrt{2} \text{ мм}$$

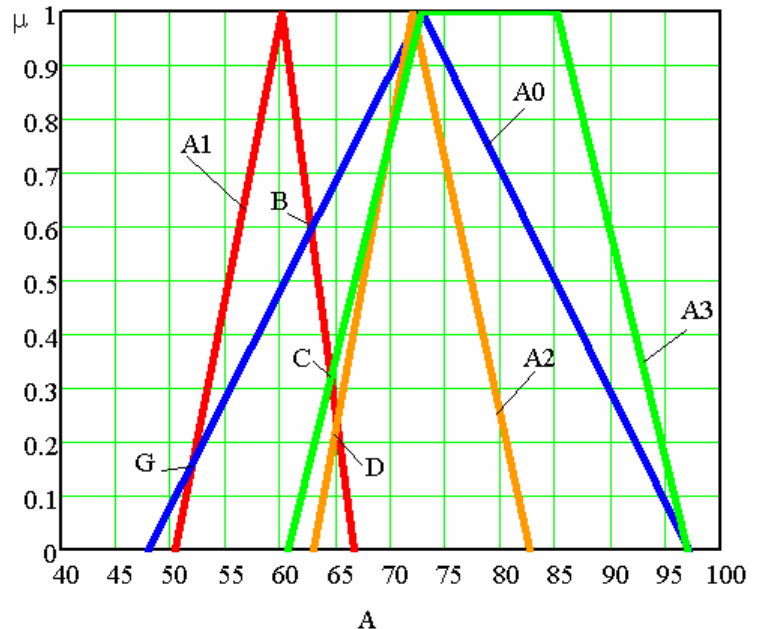


Рисунок 10 – Графічне розв'язання задачі

Для першого випадку $V(200000; 300000; 400000)_\Delta$ маємо $A_0 = \frac{0}{48} + \frac{1}{72.8} + \frac{0}{97.1}$ та максимальну можливість $\mu_B = 0.65$ для $A_B^* = 63 \text{ мм}^2$ (об'єм $V^* = 259623 \text{ мм}^3$). Для другого випадку $V(260000; 300000; 340000)_\Delta$, маємо $A_2 = \frac{0}{63} + \frac{1}{72.8} + \frac{0}{82.5}$ та для $\mu_D = 0.22$ площа склала $A_D^* = 65 \text{ мм}^2$ (обсяг $V^* = 267865 \text{ мм}^3$). Для третьої інформаційної ситуації бажаний об'єм $V(250000; 300000; 350000, 400000)$ та площа $A_3 = \frac{0}{60.7} + \frac{1}{72.8} + \frac{1}{85} + \frac{0}{97}$, отримаємо для $\mu_C = 0.33$ площу $A_C^* = 64 \text{ мм}^2$ ($V^* = 263744 \text{ мм}^3$).

Нечітке моделювання ферми (рис. 9) виконано з використанням методу динамічного програмування. Збіжність ітераційної процедури доведено (для 6 ітерацій та точності $\lg \varepsilon = -7$ маємо $V = 259865 \text{ мм}^3$). Для випадку завдання навантаження «трохи більше, ніж 2 кН»:

$$P_i = \frac{1}{2} + \frac{0.8}{2.04} + \frac{0.4}{2.12} + \frac{0.2}{2.16} + \frac{0}{2.2}; \quad i = 1, 2$$

$$\text{утворено нечіткі множини значень об'ємів ШСС} \quad V_p^* = \frac{1}{V_1^*} + \frac{0.8}{V_2^*} + \frac{0.4}{V_3^*} + \frac{0.2}{V_4^*} + \frac{0}{V_5^*};$$

$V_j^* = V_j^*(P_1, P_2); \quad j = 1, 2, \dots, 5$. Розглянуто три задачі. Для першої маємо нечітке

$P_1 = \tilde{2} \text{ кН}$, і детерміноване $P_2^{\text{det}} = 2 \text{ кН}$. Результат $V_p^* = \frac{1}{259903} + \frac{0.8}{263850} + \frac{0.4}{271737} + \frac{0.2}{275677.6} + \frac{0}{279615.8}$. Для другої задачі задається детерміноване $P_1^{\text{det}} = 2 \text{ кН}$ та нечітке $P_2 = \tilde{2} \text{ кН}$. Результат $V_p^* = \frac{1}{259903} + \frac{0.8}{261151.9} + \frac{0.4}{263604} + \frac{0.2}{264862} + \frac{0}{266121.8}$. Для випадку $P_1 = \tilde{2} \text{ кН}$, $P_2 = \tilde{2} \text{ кН}$ нечітка множина будується за допомогою Декартова добутку $P = \frac{1}{(2,2)} + \frac{0.8}{(2,2.04)} + \frac{0.4}{(2,2.12)} + \frac{0.2}{(2,2.16)} + \frac{0.8}{(2.04,2)} + \frac{0.8}{(2.04,2.04)} + \frac{0.4}{(2.04,2.12)} + \frac{0.2}{(2.04,2.16)} + \frac{0.4}{(2.12,2.12)} + \frac{0.4}{(2.12,2.04)} + \frac{0.4}{(2.12,2)} + \frac{0.2}{(2.12,2.16)} + \frac{0.2}{(2.16,2)} + \frac{0.2}{(2.16,2.04)} + \frac{0.2}{(2.16,2.12)} + \frac{0.2}{(2.16,2.16)}$. Результати дефазифікації в табл. 1.

Таблиця 1 – Дефазифіковані площі перерізів та об'єму ферми

№ задачі	P_1 , кН	%	P_2 , кН	%	V^{def} , мм ³	%	A_1^{def} , мм ²	A_2^{def} , мм ²	A_3^{def} , мм ²	A_4^{def} , мм ²
1	$\tilde{2}$	10	2	-	264506	1.8	40.53	57	80.4	98.6
2	2	-	$\tilde{2}$	10	261352	0.6	39.83	56.02	79.93	97.71
3	$\tilde{2}$	10	$\tilde{2}$	10	267238	2.9	40.83	57.45	81.44	99.8
det	2	-	2	-	259903	0	39.72	55.86	79.85	97.06

Для ферми (рис. 9) наведена процедура проектування при навантаженні нечітко-випадкового характеру. Вектор нечіткого навантаження $P = \{P_1, P_2\}$ задається випадковим чином: 1) $P = (\tilde{2}; \tilde{2})$ - подія D_1 з імовірністю q_1 ; 2) $P = (\tilde{2}; 0)$ - подія D_2 з імовірністю q_2 . Випадкові події утворюють повну групу подій і тому $q_1 + q_2 = 1$. Для кожного навантаження відповідно виконується за процедурою динамічного програмування оптимізаційний розрахунок і подальша дефазифікація, в результаті якої отримують дефазифіковані значення об'ємів $V_1^{\text{def}}(\tilde{2}, \tilde{2}) = 267238 \text{ мм}^3$ з імовірністю q_1 ; $V_2^{\text{def}}(\tilde{2}, 0) = 197746 \text{ мм}^3$ з імовірністю q_2 . Дерандомізація отриманих результатів здійснюється за правилом обчислення математичного сподівання, тобто $V^{\text{der}} = V_1^{\text{def}} q_1 + V_2^{\text{def}} q_2$. Надано ілюстрацію підходу.

Запропоновано процедуру визначення очікуваного модуля пружності. Вона складається з трьох етапів. На першому етапі визначаються нечітка множина - оптимальний об'єм V^{def} при нечіткому завданні модуля E . На другому етапі визначається дефазифіковане значення $V_{\text{det}}^{\text{def}}$. На третьому - числове розв'язання рівняння $E^* = \arg\{V(E) - V_{\text{det}}^{\text{def}} = 0\}$, де V - є визначеним значенням об'єму за допомогою методу ДП при детермінованому значенні E . Розглянуто шість інформаційних ситуацій (рис. 11) та отримано очікувані модулі пружності

$E^* = 204.19 \text{ кН} / \text{мм}^2$, $E^* = 205.72 \text{ кН} / \text{мм}^2$, $E^* = 204.96 \text{ кН} / \text{мм}^2$, $E^* = 205 \text{ кН} / \text{мм}^2$,
 $E^* = 206.23 \text{ кН} / \text{мм}^2$, $E^* = 203.58 \text{ кН} / \text{мм}^2$ відповідно ($1 \text{ кН} / \text{мм}^2 = 1 \text{ ГПа}$).

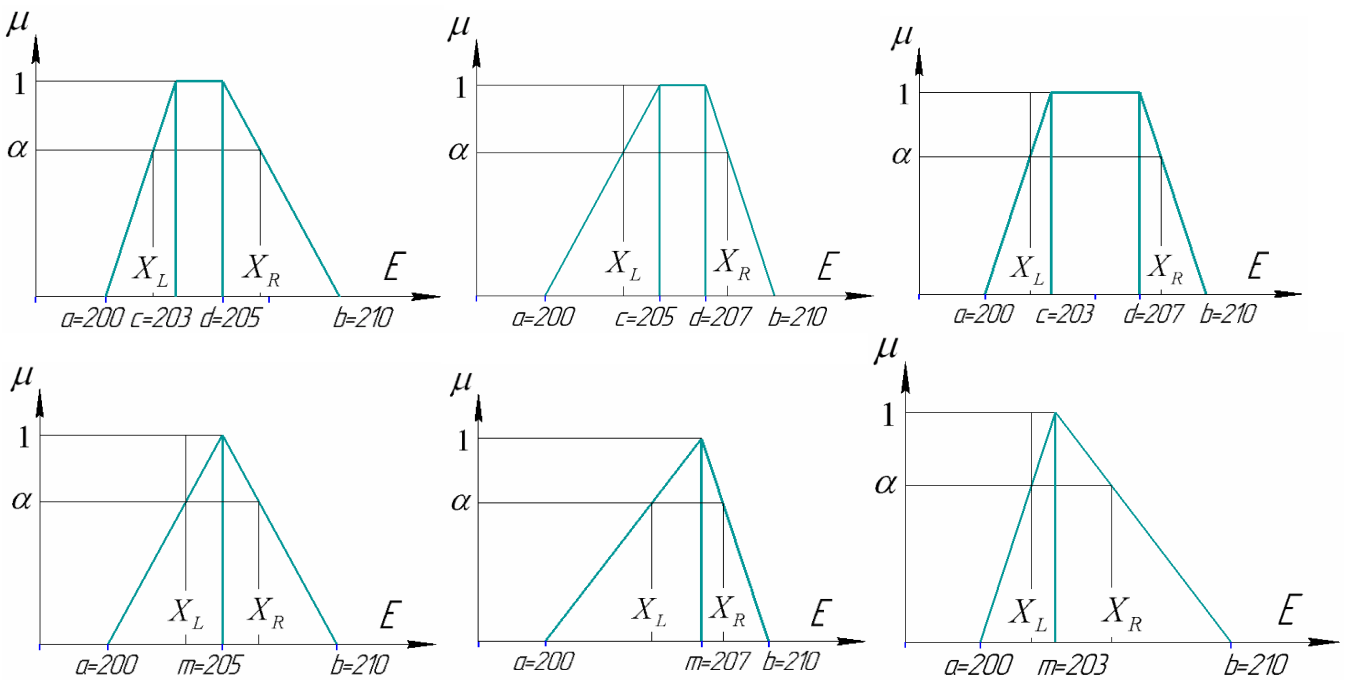


Рисунок 11 – Інформаційні ситуації щодо модуля пружності, ГПа.

Розглянуто задачу оцінки ресурсу елемента ферми з тріщиною та оптимального проектування такої ферми. Розглянемо три випадки завдання нечіткого числа довжини тріщини $a_0(6.1;7.6;9.1)_\Delta$, $a_0(7;7.6;8.5)_\Delta$, $a_0(7.4;7.6;8)_\Delta$. Етап дефазифікації нечітких чисел дозволяє отримати прогнозовані значення кількості циклів навантаження, відповідно $N^{def} = 80271$, $N^{def} = 81513$, $N^{def} = 81532$. Для ферми показана збіжність процедури (рис. 12) та вплив довжини тріщини на оптимальний об'єм (рис. 13) за умови врахування в обмеженнях критерію Ірвіна лінійної механіки руйнування.

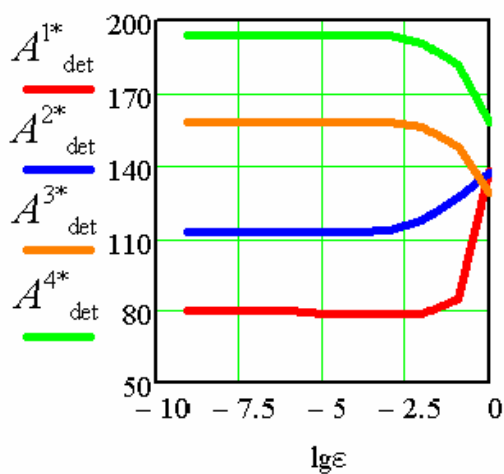


Рисунок 12 – Збіжність площ перерізів стержнів A_{det}^1 , A_{det}^2 , A_{det}^3 , A_{det}^4 (мм^2) від заданої точності ε

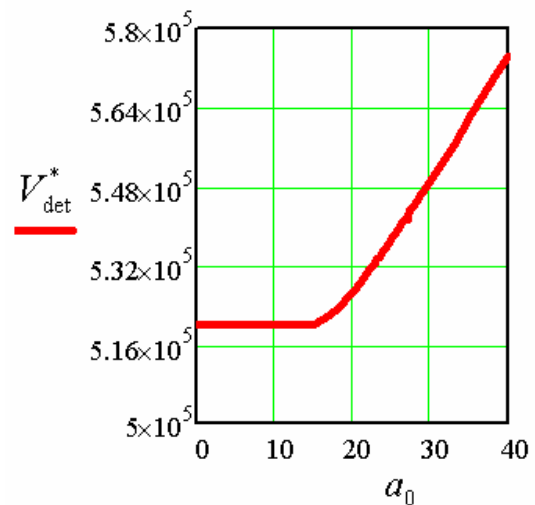


Рисунок 13 – Вплив довжини тріщини a_0 , (мм) на характеристику оптимального проекту V_{det}^* , мм^3

Вплив довжини тріщини на характеристики оптимального проекту на рис. 14 та нечітка реалізація задачі на рис. 15.

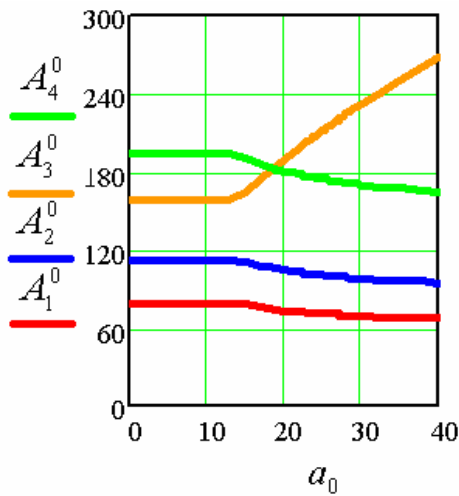


Рисунок 14 – Вплив довжини тріщини a_0 , (мм) на площі перерізів, мм²

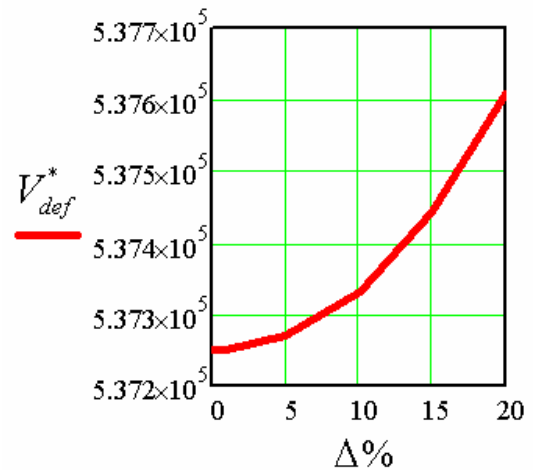


Рисунок 15 – Вплив нечіткої довжини тріщини на величину оптимального об'єму матеріалу, мм³

Для чисельного прикладу моделювання ферми рис. 16 бажаний обсяг V_0 є нечіткою множиною A , яка згенерована трикутною функцією $\mu_A(x)$ з $a = 1.8 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$; $b = 2.7 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ та 10 рівнями з інтервалу $[0,1]$ з кроком $\Delta\mu = 0.1$. В результаті нечіткого моделювання отримаємо нечітке число горизонтального переміщення вузла 3 (рис. 17).

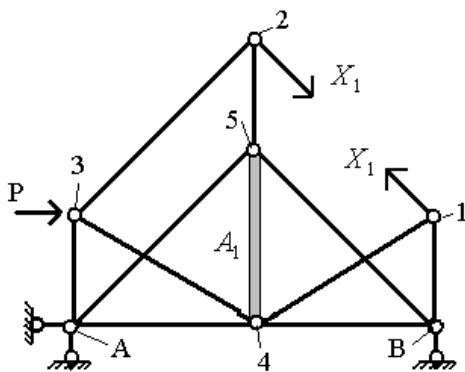


Рисунок 16 – Основна система складної статично визначеної ферми

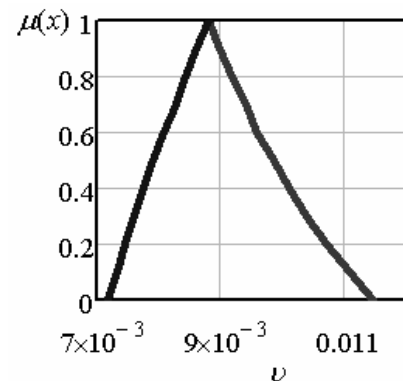


Рисунок 17 – Нечітке переміщення вузла 3 у напрямку дії зовнішньої сили, м

Операція дефазифікації реалізується за методом центру $\nu^{def} = 8.845 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, або за методом Б. Лю $\nu^{def} = 8.902 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. Порівнюючи з детермінованими значеннями вихідних даних $\nu^{det} = 8.82 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ робимо висновок, що наявність невизначеності незначним чином збільшує значення переміщення.

Для задачі оптимального проектування пружної шарнірно-стержневої системи (рис. 18) - балочної ферми довжиною L мінімального обсягу з урахуванням умов міцності і власних коливань показано збіжність процедури динамічного програмування (рис. 19) та залежність переміщення від частоти власних коливань (рис. 20).

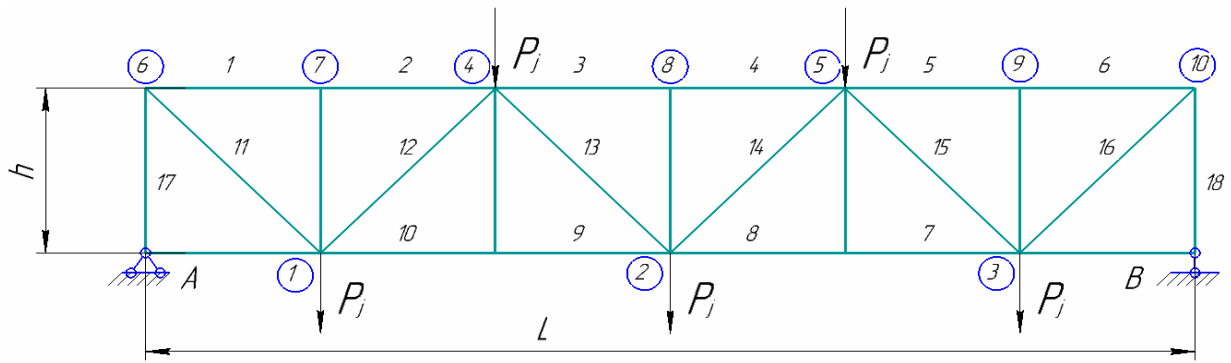
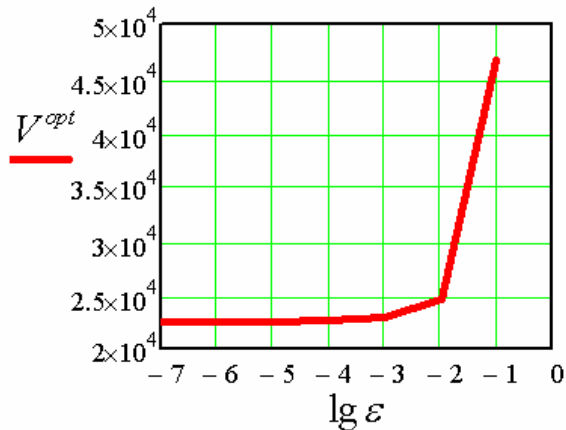
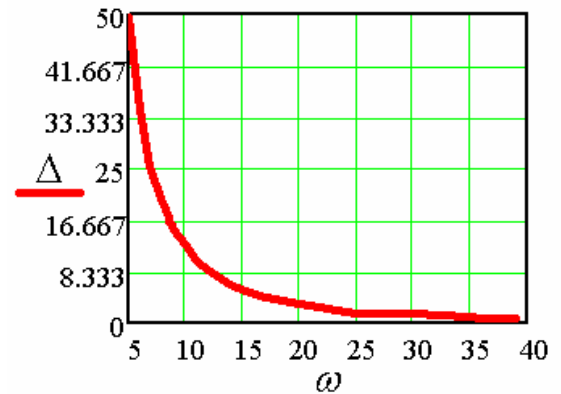
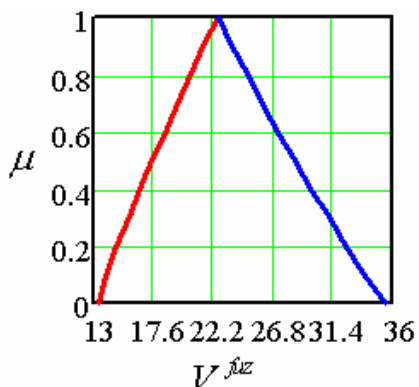
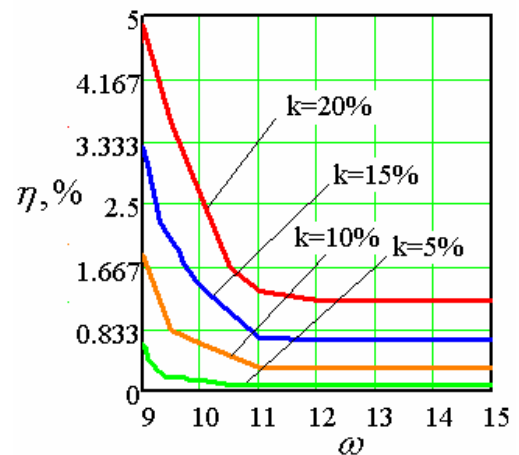


Рисунок 18 – Розрахункова схема ШСС

Рисунок 19 – Збіжність обчислювальної процедури ДП залежно від точності ε Рисунок 20 – Залежність переміщення Δ від частоти власних коливань ω

Нечітка постановка передбачає, що нечіткими є $\tilde{P}_4 = \tilde{P}_5 = \tilde{10} \cdot 10^3 \text{ кН}$ та значення частоти власних коливань $\omega_0 = \tilde{12} \text{ Гц}$. Для нечітких чисел $\tilde{P}_i(a, m, b)$; $i = 4, 5$ та $\tilde{\omega}_0(a, m, b)$ взята трикутна функція належності. Як результат маємо функцію належності нечіткого об'єму (рис. 21) та вплив коефіцієнта нечіткості даних ($k, \%$) на розмитість результату ($\eta, \%$) залежно від частоти ω на рис 22.

Рисунок 21 – Функція належності нечіткої величини, 10^3 см^3 Рисунок 22 – Розмитість результату від коефіцієнта нечіткості та частоти власних коливань, Гц

Нечітко-випадкова невизначеність завдання навантаження виражена в наступному. Подія B_1 : у вузол 4 додане навантаження $\tilde{P}_4$, задане нечітким чином, з

ймовірністю p_1 . Подія B_2 , яка полягає в тому, що нечітке навантаження $\tilde{P}_5$ прикладене у вузол 5 з ймовірністю p_2 . Події $C_1 = B_1 B_2$, $C_2 = B_1 \overline{B_2}$, $C_3 = \overline{B_1} B_2$, $C_4 = \overline{B_1} \overline{B_2}$ реалізуються з ймовірностями $q_1 = p_1 p_2$, $q_2 = p_1(1 - p_2)$, $q_3 = p_2(1 - p_1)$, $q_4 = (1 - p_1)(1 - p_2)$ відповідно. При таких числових даних: $P_1 = P_2 = P_3 = 10^4 \text{ кН}$, $\tilde{P}_4 = 10^4 \text{ кН}$, $\tilde{P}_5 = 10^4 \text{ кН}$, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$, $\omega = 12 \text{ Гц}$, $p_1 = 0.7$, $p_2 = 0.8$ та ступеня розмитості $k = 10\%$ отримаємо величину обсягу $V^{dr} = 20640 \text{ см}^3$

Для задач аналізу поведінки прямолінійних стержневих систем, нев'язкою буде величина Z - квадрат різниці між розв'язанням СЛАР $AX = d$ при правих частинах, визначених Декартовим добутком, і чітким розв'язанням СЛАР при модальних значеннях m_i нечіткої величини d_i ($i = 1, 2, 3$), а саме:

$$Z(d) = \sum_{j=1}^n (r_{ij} d_j^* - X(m_i))^2, \quad i = 1, 2, 3. \quad (8)$$

Відшукування розв'язку СЛАР виконується за допомогою оберненої матриці $X = A^{-1} d^*$, елементи якої позначимо через r_{ij} , $A^{-1} = \{r_{ij}\}$; $i, j = 1, 2, \dots, n$. А d^* сформулюємо з комбінації значень величини d_i . Для чисельного прикладу рис. 23 основна система буде рис. 24.

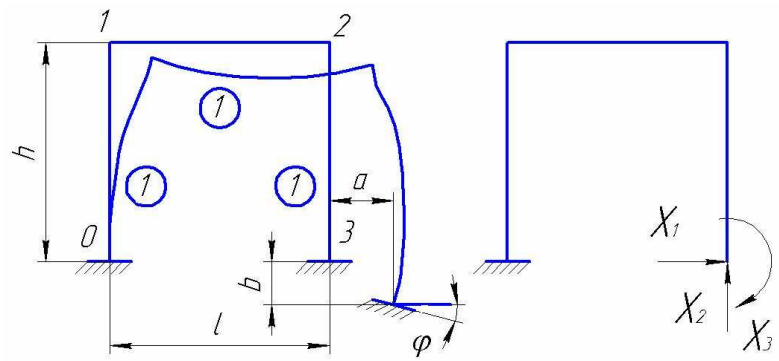


Рисунок 23 – Розрахункова схема рами Рисунок 24 – Основна система

Задавши праві частини СЛАР числом трикутного типу $d_1 = a = (0,018; 0,02; 0,022) \text{ м}$, $d_2 = b = (0,016; 0,02; 0,024) \text{ м}$, $d_3 = \phi = (0,018; 0,02; 0,022) \text{ рад}$, при значенні нев'язки 0,99 максимальне відхилення моменту від детермінованого склало 26%, а при 1,467 максимальне відхилення 38%.

Для задачі проектування пружини запропоновано аналітичні розв'язки прямої та двоїстої задачі методом множників Лагранжа. Наведені числові ілюстрації при детермінованих даних. Нечітке моделювання проведемо для інформаційної ситуації $m_\omega = 5$; $a = 4.5$; $b = 5.5 \text{ Гц}$ (функція належності трикутна), число звій дорівнює 10, а число дискретів інтервалу $[0,1]$ дорівнює M . В числових розрахунках приймалось $M = 10$. Отримаємо такі множини W_{fuzzy}^* та d_{fuzzy}^* :

$$W_{fuzzy}^* = \frac{0}{36.71} + \frac{0.1}{37.54} + \frac{0.2}{38.36} + \frac{0.3}{39.20} + \frac{0.4}{40.05} + \frac{0.5}{40.91} + \frac{0.6}{41.77} + \frac{0.7}{42.65} + \frac{0.8}{43.53} +$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{0.9}{44.43} + \frac{1}{45.33} + \frac{0.9}{46.24} + \frac{0.8}{47.15} + \frac{0.7}{48.09} + \frac{0.6}{49.03} + \frac{0.5}{49.97} + \frac{0.4}{50.93} + \frac{0.3}{51.89} + \frac{0.2}{52.87} + \\
& \quad + \frac{0.1}{53.85} + \frac{0}{54.84} . \\
d_{fuzzy}^* &= \frac{0}{1.261} + \frac{0.1}{1.275} + \frac{0.2}{1.289} + \frac{0.3}{1.303} + \frac{0.4}{1.317} + \frac{0.5}{1.331} + \frac{0.6}{1.345} + \frac{0.7}{1.359} + \frac{0.8}{1.373} + \\
& + \frac{0.9}{1.387} + \frac{1}{1.401} + \frac{0.9}{1.415} + \frac{0.8}{1.429} + \frac{0.7}{1.443} + \frac{0.6}{1.457} + \frac{0.5}{1.475} + \frac{0.4}{1.485} + \frac{0.3}{1.499} + \frac{0.2}{1.513} + \\
& \quad + \frac{0.1}{1.527} + \frac{0}{1.541} .
\end{aligned}$$

Етап дефазифікації чисел W_{fuzzy}^* і d_{fuzzy}^* виконується за методом центру. Отримаємо $W_{def}^* = 46.34 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$, $d_{def}^* = 1.42 \text{ мм}$. Порівняння отриманих результатів з розв'язками $W_{det}^* = 45.33 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$ і $d_{det}^* = 1.40 \text{ мм}$ при детермінованому значенні $\omega_0 = 5 \text{ Гц}$ дає такі відносні похибки $\varepsilon_w = 2.24\%$, $\varepsilon_d = 1.43\%$. Тобто врахування нечіткості призводить до збільшення параметру W_{det}^* і параметру d_{det}^* .

У четвертому розділі розглядаються постановки задач оптимізації, методи та результати синтезу ізотропної оболонки в умовах невизначеності даних. Об'єктом дослідження виступає циліндрична кругова оболонка стиснена силою P^* , що має фізичні обмеження міцності оболонки на стиснення і стійкості, які являють собою наближені вирази критичних зусиль при шарнірному обпиранні оболонки в припущені достатньої зсувної жорсткості в трансверсальній площині і площині оболонки, для шарнірно обпертого стержня з кільцевим поперечним перерізом, тобто

$$g_1(x) = P_{cr}^l \geq P^*; \quad g_2(x) = P_{cr}^g \geq P^*; \quad g_3(x) = P_R \geq P^*. \quad (9)$$

В співвідношеннях (9) введено такі позначення:

$$P_R = C\delta R; \quad C = 2\pi\sigma_T; \quad P_{cr}^l = D\delta^2; \quad D = 2\pi E / \sqrt{3(1-\mu^2)}; \quad P_{cr}^g = B\delta R^3; \quad B = \pi^3 E / L^2;$$

де: L - довжина твірної циліндра; E, μ - відповідно модуль Юнга і коефіцієнт Пуассона; σ_T - величина границі текучості матеріалу оболонки, R - радіус, δ - товщина.

Перша розглянута задача відноситься до оптимізації з обмеженнями на шанс виконання події. Взято $\mu = 0,3$; $\rho = 8,01 \cdot 10^{-3} \text{ кг/см}^3$; $\sigma_0 = 162 \text{ МПа}$; $R^- = 40 \text{ мм}$; $R^+ = 60 \text{ мм}$; $n = 10^6$; $m = 10^2$; $N = 20 \div 50$; $\delta^- = 0,1 \text{ мм}$; $\delta^+ = 0,3 \text{ мм}$ та нечіткі числа $\tilde{P}_0, \tilde{E}_0, \tilde{L}_0$ з трикутною функцією належності. $\tilde{P}_0(a, b, c): (a = 8 \cdot 10^3 \text{ Н}; b = 10 \cdot 10^3 \text{ Н}; c = 13 \cdot 10^3 \text{ Н}); \tilde{E}_0(a, b, c): (a = 76,6 \text{ ГПа}, b = 81,6 \text{ ГПа}, c = 85,6 \text{ ГПа}); \tilde{L}_0(a, b, c): (a = 2,4 \text{ м}, b = 3 \text{ м}, c = 3,5 \text{ м})$. Для задачі оптимізації було використано метод Монте-Карло. Суть підходу полягає у здійсненні N циклів, в кожному з яких формуються випадковим чином вектори $u = \{ u_1, u_2, \dots, u_m \}$ і $v = \{ v_1, v_2, \dots, v_m \}$ із

α - рівневих множин для нечітких величин $\xi_1 = P^*$, $\xi_2 = E$ і вектор $w = \{ w_1, w_2, \dots, w_m \}$ для β - рівневої множини нечіткої величини L . Оптимістичні оцінки маси оболонки на рис. 25 - 26.

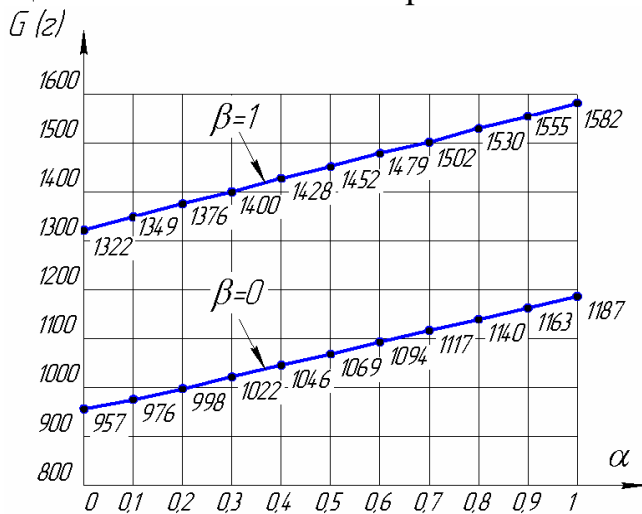


Рисунок 25 – Вплив α рівня на величину порогу маси оболонки G_* при граничних значеннях рівня β

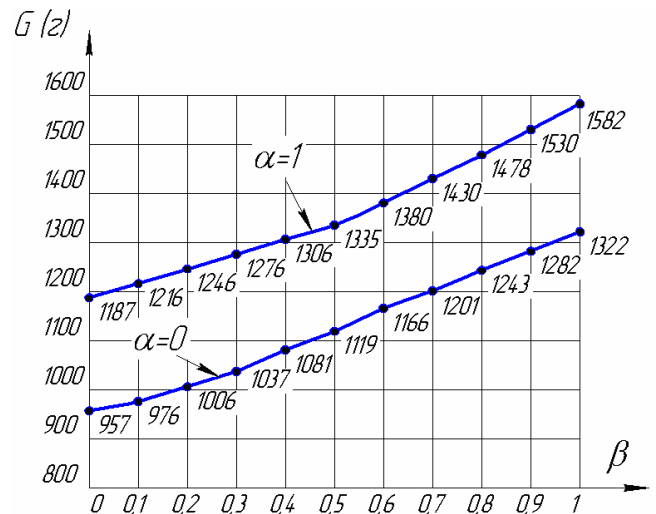


Рисунок 26 – Вплив β рівня на величину порогу маси оболонки G_* при граничних значеннях рівня α

Задача подієвого програмування знаходження шансу виконання події для нечітких величин $\xi_1 = P$, $a_1 = 8 \text{ кН}$; $b_1 = 10 \text{ кН}$; $c_1 = 12 \text{ кН}$; $\xi_2 = E$, $a_2 = 78 \text{ ГПа}$; $b_2 = 81,6 \text{ ГПа}$; $c_2 = 83 \text{ ГПа}$; $\xi_3 = \sigma_0$, $a_3 = 160 \cdot 10 \text{ МПа}$; $b_3 = 162 \text{ МПа}$; $c_3 = 170 \text{ МПа}$; $\xi_4 = G_*$, $a_4 = 1,8 \text{ кг}$; $b_4 = 2,5 \text{ кг}$; $c_4 = 3,0 \text{ кг}$ знайшла реалізацію з максимальною можливістю 0.941 для $\delta = 1,5 \text{ мм}$, $R = 31,78 \text{ мм}$ та бажаного обсягу 2,702 кг.

Задача нечіткого моделювання оцінки максимального значення осової сили (10) була реалізована для інформаційної ситуації з Гайсовою функцією належності для чотирьох експериментів (табл. 2).

$$\bar{u}_\beta = \arg \left\{ \max_{u > 0} u(\beta) \mid \text{Pos}(g_i(\xi) \geq u) \geq \beta; i = 1, 2, 3 \right\} \quad (10)$$

Таблиця 2 – Параметри експериментів

№ експерименту	σ_h (мм)	%	σ_R (мм)	%
1	0,1	14	10	10
2	0,1	14	20	20
3	0,2	28	20	20
4	0,1	14	1	1

Отримано нечіткі числа (рис. 27) та відхилення $\bar{u}(\beta)$ від розв'язку детермінованої задачі для дискретів $\mu_i = \beta_i$ для чотирьох експериментів (рис. 28). Перевірено збіжність даних до детермінованого значення $u^{\text{det}} = 71251 \text{ Н}$.

Друга інформаційна ситуація використовує трикутну функцію належності для двох експериментів за таких даних: $m_h = 0,7 \text{ мм}$; $\Delta_R^h = 0,1 \text{ мм}$; $m_R = 100 \text{ мм}$; А) $\Delta_R^R = 1 \text{ мм}$; В) $\Delta_R^R = 10 \text{ мм}$. Через Δ_R^h , Δ_R^R позначено правобічний розкид

параметрів h та R відповідно. Результати дефазифікації експерименту А: $\bar{u}_{0.05}^{\text{det}} = 71428.7$, що на 0,25% більше від $\bar{u}_1^{\text{det}}$, та для експерименту В: $\bar{u}_{0.05}^{\text{det}} = 72934$, що на 2,4% більше від $\bar{u}_1^{\text{det}}$

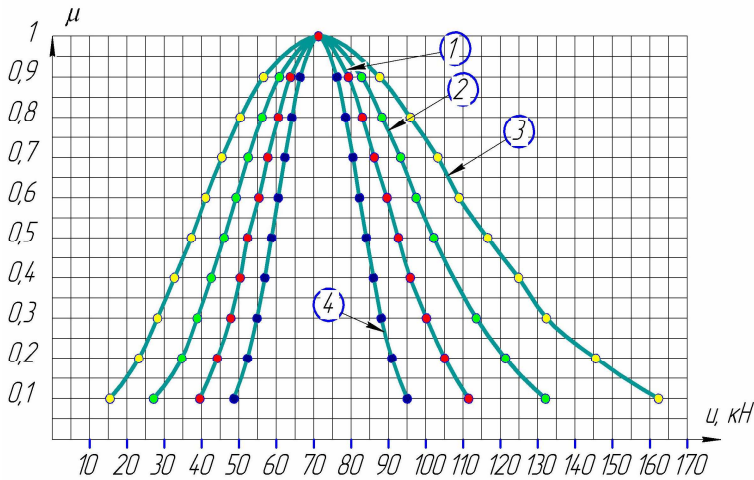


Рисунок 27 – Графічне зображення нечітких чисел $\bar{u}_L(\beta)$ і $\bar{u}_R(\beta)$

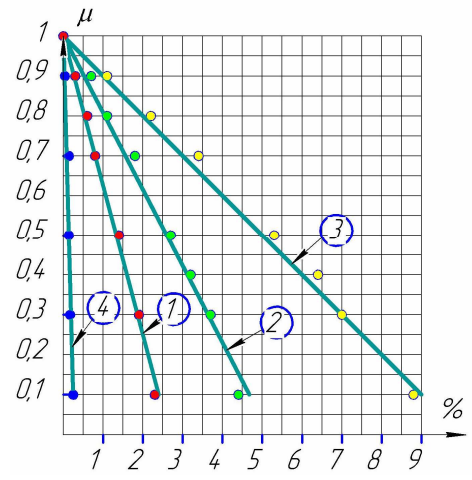


Рисунок 28 – Відхилення $\bar{u}(\beta)$ від розв'язку детермінованої задачі

Для задачі пошуку можливості реалізації події для трикутних нечітких чисел R : $a_R = 30 \text{ мм}$; $m_R = 40 \text{ мм}$; $b_R = 50 \text{ мм}$; L : $a_L = 2,9 \text{ м}$; $m_L = 3 \text{ м}$; $b_L = 3,1 \text{ м}$; G : $a_G = 2,5 \text{ кг}$; $m_G = 3 \text{ кг}$; $b_G = 3,5 \text{ кг}$; N_* : $a_N = 23 \text{ кН}$; $m_N = 25 \text{ кН}$; $b_N = 30 \text{ кН}$,

побудовано геометричні множини $\Phi_0 - \Phi_3$: $x_1 = \phi_0(x_2, W) = \frac{W}{A^* x_2}$, $A^* = A \cdot x_3$

множина G ; $x_1 = \phi_1(x_2, N_*) = \frac{N}{C x_2}$ множина R ; $x_1 = \phi_2(x_2, x_3, N_*) = \frac{N}{B x_3 x_2^3}$ множина L ;

$x_1 = \phi_3(N) = \sqrt{\frac{N_*}{D}}$ множина N . Злиття цих множин показано на рис. 29

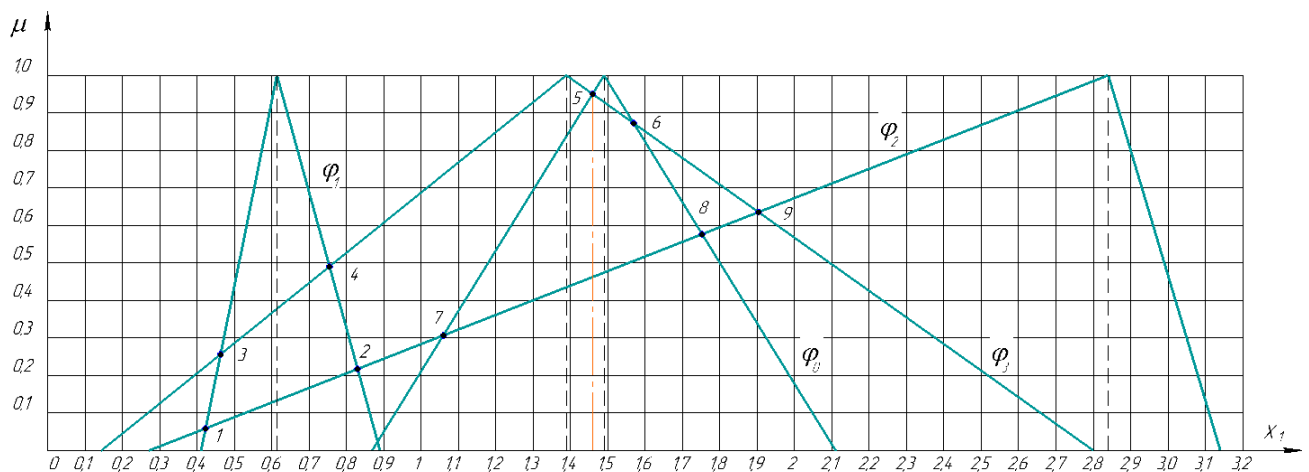


Рисунок 29 – Геометричне розв'язання задачі

Щоб максимізувати можливість доцільно взяти точку 9 перетину з множиною $\phi_2(N)$ і розв'язок для рівня довіри $\mu \approx 0,63$ буде відповідати тільки оптимістичному

значенню: $N_*^p \approx 24,2 \text{ кН}$.

В задачі оцінки максимального значення осової сили при неточному завданні (11) її геометричних характеристик (рис. 30) проведено ряд чисельних експериментів, результати чотирьох з яких показано на рис.31.

$$u^* = \arg \left\{ \max_u u \mid \text{Tr}(A) \geq \alpha \right\} \quad (11)$$

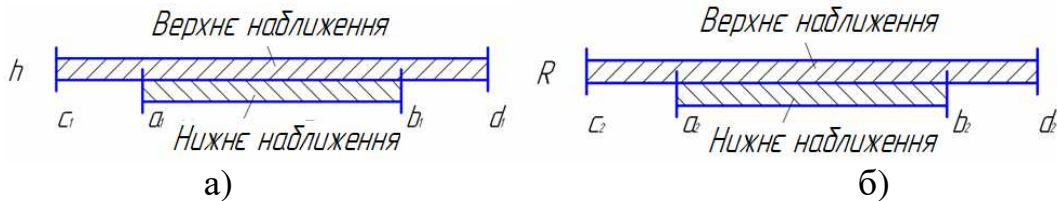


Рисунок 30 – Множина величин задана неточним чином:

а) множина h ; б) множина R

Експеримент 5: $c_1 = 0,1 \text{ мм}$, $a_1 = 0,5 \text{ мм}$, $b_1 = 0,75 \text{ мм}$, $d_1 = 0,9 \text{ мм}$, $c_2 = 70 \text{ мм}$, $a_2 = 90 \text{ мм}$, $b_2 = 110 \text{ мм}$, $d_2 = 130 \text{ мм}$. Експеримент 6: $c_1 = 0,65 \text{ мм}$, $a_1 = 0,68 \text{ мм}$, $b_1 = 0,72 \text{ мм}$, $d_1 = 0,75 \text{ мм}$, $c_2 = 90 \text{ мм}$, $a_2 = 95 \text{ мм}$, $b_2 = 105 \text{ мм}$, $d_2 = 110 \text{ мм}$. Експеримент 7: $c_1 = 0,68 \text{ мм}$, $a_1 = 0,69 \text{ мм}$, $b_1 = 0,71 \text{ мм}$, $d_1 = 0,72 \text{ мм}$, $c_2 = 98 \text{ мм}$, $a_2 = 99 \text{ мм}$, $b_2 = 101 \text{ мм}$, $d_2 = 102 \text{ мм}$. Експеримент 8: $c_1 = 0,654 \text{ мм}$, $a_1 = 0,692 \text{ мм}$, $b_1 = 0,706 \text{ мм}$, $d_1 = 0,708 \text{ мм}$; $c_2 = 99,5 \text{ мм}$, $a_2 = 99,8 \text{ мм}$, $b_2 = 100,2 \text{ мм}$, $d_2 = 100,5 \text{ мм}$.

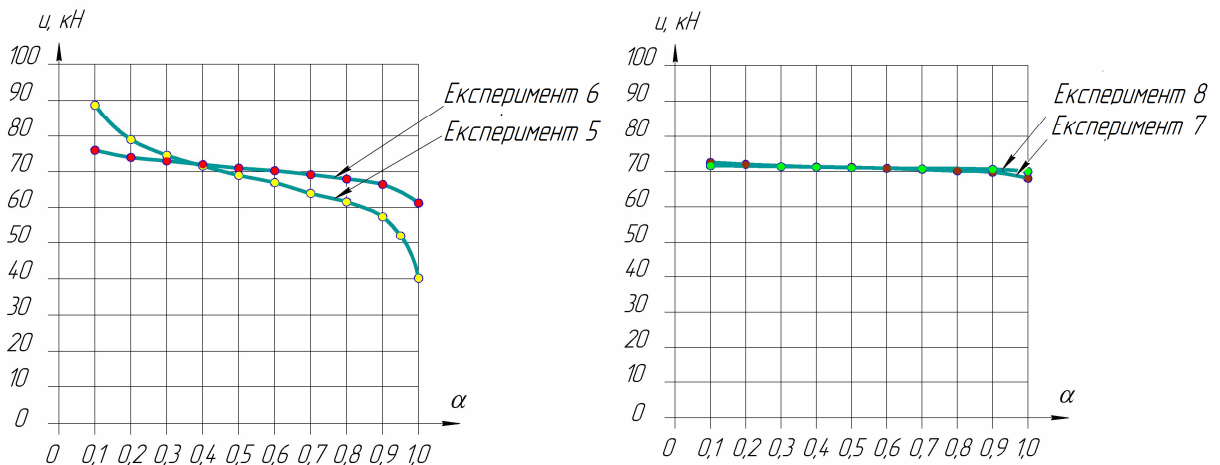


Рисунок 31 – Графічна ілюстрація результатів експериментів 5,6,7,8

Також для цієї оболонки показана задача застосування стохастичних даних (12):

$$u^* = \arg \left\{ \max_{u>0} u \mid \text{Pr ob}(g_i(\xi) \geq u^*) \geq \alpha; i = 1, 2, 3 \right\}. \quad (12)$$

Для трикутного розподілення і випадку h : $a_1 = 0,4$; $m_1 = 0,7$; $b_1 = 1$ (збільшення Δ_δ складає 43% від δ), R : $a_2 = 70$; $m_2 = 100$; $b_2 = 130$ (збільшення Δ_R складає 30% від R), отримано $u^* = 127,771 \text{ кН}$, що на 79% більше від детермінованого значення $u^* = 71,251 \text{ кН}$.

При завданні геометричних параметрів нечітко-випадкової і випадково-нечіткої природи для наведених в роботі процедур та початкових даних отримано відповідні

очікувані значення $P_{fuzzy-rand}^{det} = \sum_{i=1}^7 p_i P_i = 1017.2 \text{ кН}$ та $P_{rand-fuzzy}^{det} = \sum_{i=1}^5 w_i P_i = 1027 \text{ кН}$.

У п'ятому розділі розглядаються два об'єкти дослідження. Перший об'єкт це ортотропна циліндрична шарнірно-обперта по кінцях оболонка стиснена силою P_* в умовах трьох граничних станів (13):

$$P_{kp}^M \geq P_*; \quad P_{kp}^c \geq P_*; \quad P_R \geq P_*; \quad (13)$$

де $P_{kp}^M = Bx_1^2 \sqrt{x_3 x_4}$, $P_{kp}^c = Cx_1 x_2^3 x_3$, $P_R = Dx_1 x_2^3 \sqrt{x_3^2}$, $B = \frac{2\pi}{\sqrt{3}} x_6$; $C = \frac{\pi^3 x_6}{x_7^2}$; $D = 2\pi x_5$;

$x_1 = h$; $x_2 = R$; $x_3 = \theta$; $x_4 = 1 - \theta$, $x_5 = \sigma_0$; $x_6 = E$; $x_7 = L$.

Другий об'єкт – ортотропна циліндрична шарнірно-обперта по кінцях оболонка в умовах одного граничного стану (14):

$$\frac{P^*}{P_{kp}} + \frac{q^*}{q_{kp}} + \frac{M^*}{M_{kp}} \leq 1, \quad (14)$$

де P_{kp} , q_{kp} , M_{kp} - критичні сили оболонки в межах лінійної теорії (15):

$$P_{kp} = \frac{2\pi}{\sqrt{3}} h^2 \sqrt{E_1 E_2}; \quad q_{kp} = \frac{\pi \sqrt{6}}{9} E_1^{1/4} E_2^{3/4} \frac{R}{L} \left(\frac{h}{R} \right)^{5/2}; \quad M_{kp} = 1,48 \pi h^2 \frac{R}{L} \sqrt{h R E_1^{3/8} E_2^{5/8}}. \quad (15)$$

Для першого об'єкту розглянута обернена задача. Аналітичні вирази (16) отримані методом множників Лагранжа, достовірність перевірено методом Монте-Карло (рис. 32). Побудовано залежність оптимального об'єму від навантаження (рис. 33).

$$h^{opt} = x_1^* = \sqrt{\frac{D^6 + (P^* BC)^2}{BD \sqrt{DC}}}; \quad R^{opt} = x_2^* = \sqrt[6]{\frac{D^6 + (P^* BC)^2}{\sqrt[3]{P^* BC}}} \sqrt{\frac{D}{C}};$$

$$\theta^{opt} = x_3^* = \frac{(P^* BC)^2}{D^6 + (P^* BC)^2}; \quad W^* = \frac{A^3 \left[D^6 + (P^* BC)^2 \right]^2}{BDC^3 \sqrt[3]{P^* BC}} \quad (16)$$

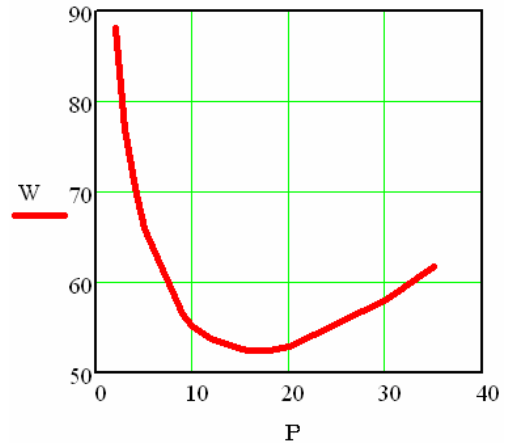
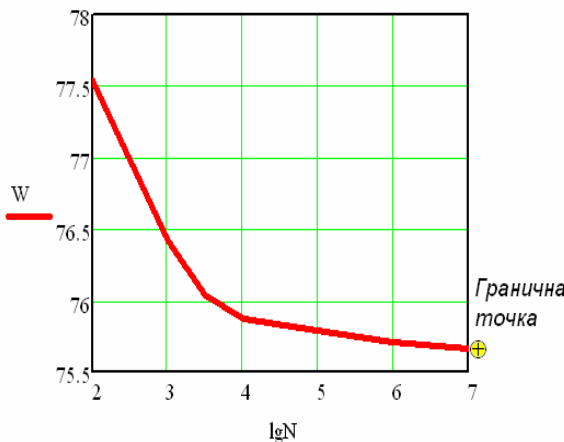


Рисунок 32 – Збіжність до граничної точки Рисунок 33 – Задача $P_{min}^* = \min W(P^*)$

У точці $P_{min}^* = 16.65 \text{ кН}$ функція W досягає свого мінімуму, що дорівнює $W = 52,381 \text{ см}^3$. При цьому параметри проекту будуть: $h = 0.055 \text{ см}$; $R = 3,031 \text{ см}$; $\theta = 0,25$. При проведенні нечіткого моделювання отримано результати табл. 3 для

інформаційних ситуацій 7 експериментів.

Таблиця 3 - Параметри нечіткого навантаження $P^*(a, m, b)$, очікуване значення шуканих $h_{\text{det}}^{\text{def}}$, $R_{\text{det}}^{\text{def}}$, $\theta_{\text{det}}^{\text{def}}$, $W_{\text{det}}^{\text{def}}$, $F_{\text{det}}^{\text{def}}$, η

№ Експ.	a, (кН)	b, (кН)	$h_{\text{det}}^{\text{def}}$ (см)	$R_{\text{det}}^{\text{def}}$ (см)	$\theta_{\text{det}}^{\text{def}}$	$W_{\text{det}}^{\text{def}}$ (см ³)	%	$P_{\text{det}}^{\text{def}}$ (кН)	η
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	40(20%)	60(20%)	0,096	2,53	0,747	75,78	0,16	50,12	1,002
2	30(40%)	70(40%)	0,09	2,54	0,733	76,17	0,68	50,5	1,01
3	45(10%)	70(40%)	0,1	2,51	0,768	79,28	4,79	53,52	1,07
4	45(10%)	80(60%)	0,104	2,51	0,778	81,75	8,05	55,90	1,12
5	43(14%)	75(55%)	0,102	2,52	0,770	80,07	5,83	54,70	1,09
6	50(0%)	70(40%)	0,102	2,51	0,775	80,04	6,27	54,60	1,09
7	50(0%)	80(60%)	0,105	2,51	0,787	82,87	9,53	55,96	1,14
det	0	0	0,0954	2,524	0,751	75,658	0	50	1

Розглянуто задачу визначення максимального значення навантаження стиснутої ортотропної оболонки за умов збереження міцності, стійкості і наявності невизначеності завдання вихідних даних. Задача оптимізації запишеться як:

$$P^* = \arg \left\{ \max P \mid Ch(S_j) \geq \beta; j = 1, 2, 3 \right\}. \quad (17)$$

$$Ch(S_j) = \begin{cases} \text{Prob}(S_j), \text{ для випадкової величини } \xi; (\text{ймовірність}) \\ \text{Pos}(S_j), \text{ для нечіткої величини } \xi; (\text{можливість}) \\ \text{Tr}(S_j), \text{ для неточної величини } \xi; (\text{довіра}), \end{cases} \quad , 0 \leq Ch(S_j) \leq 1.$$

де S_j - невизначена подія виконання обмеження $g_j(x) - 1 \leq 0$.

Стохастичний підхід для випадку трикутного розподілення випадкової величини для початкових даних табл. 4 дає залежності для критичної сили (рис. 34). При рівні ймовірності 0.5 маємо результати наближені до детермінованих.

Таблиця 4 – Початкові дані

$h = 0,1 \text{ см}; R = 10 \text{ см}; L = 30 \text{ см}; \theta = 0.75;$ $m_E = 35 \text{ ГПа}; m_{\sigma_0} = 0,4 \text{ ГПа}; \Delta_{\sigma_0} = 0,005 \text{ ГПа}; N = 2 \cdot 10^5$				
№ експерименту	1	2	3	4
$\Delta_E, \text{ ГПа}$	3	1	0,5	0,1
% відхилення Δ від m_E	8,6	2,9	1,4	0,3

Для неточного моделювання де інформація представлена у формі верхнього та нижнього наближень $\xi_i([a_i, b_i], [c_i, d_i])$ розглянуто чотири чисельні експерименти результати яких на рис. 35. Бачимо збіжність наведених експериментів до детермінованих даних при зменшенні рівня довіри до значення 0,5. Також, при звуженні верхнього та нижнього інтервалів маємо схожий ефект.

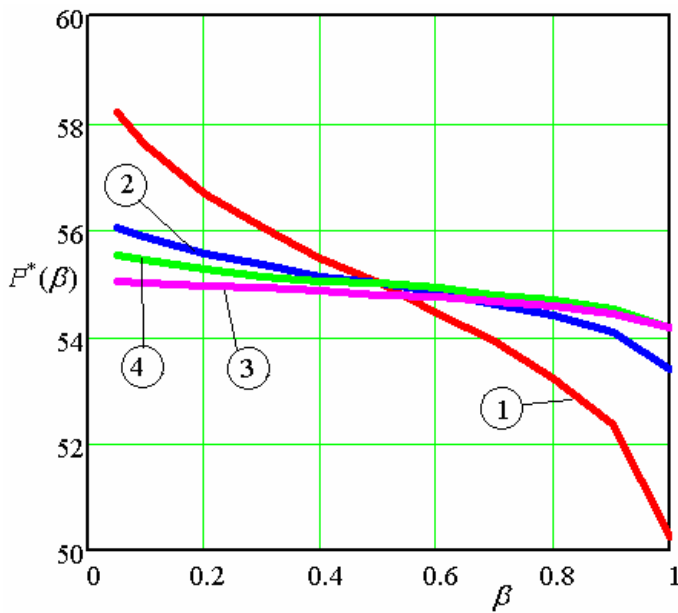


Рисунок 34 – Критична сила $P_{rand}^*(\beta)$ від рівня заданої ймовірності β :
1, 2, 3, 4 – номер експерименту

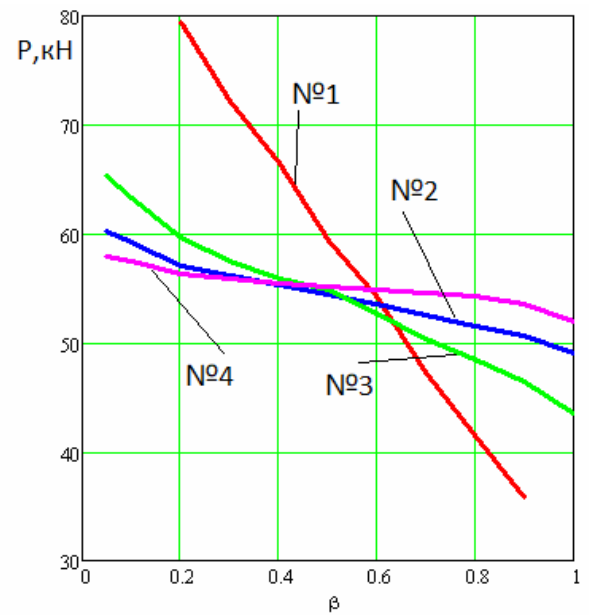


Рисунок 35 – Величина сили P_{rough}^* від рівня довіри β :
1, 2, 3, 4 – номер експерименту

Наведено приклади нечіткого моделювання. Для нечітко заданих E і σ_0 з функцією належності Гаусового виду, в якій прийнято $\Delta_E = 0,1$ ГПа, $m_E = 35$ ГПа і $\Delta_{\sigma_0} = 0.005$ ГПа, $m_{\sigma_0} = 0.4$ ГПа, проведено дослідження впливу параметра θ на величину сили $P_{fuzzy}^*(1)$ (рис. 36).

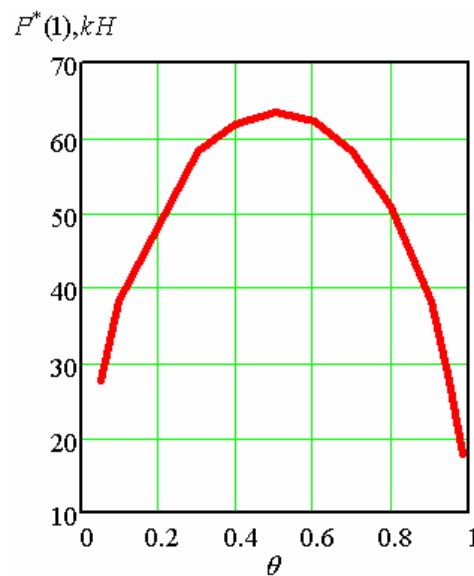


Рисунок 36 – Залежність $P_{fuzzy}^*(1)$ від параметра θ

В задачі вагової оптимізації першої оболонки запропоновано задачі оптимізації (18), (19), (20) за умови даних випадкового та нечіткого виду та методи їх реалізації:

$$(x^{opt}, W^{opt}) = \arg \left\{ \min_x W(x) \mid p_j = \text{Prob}(g_j(x, \xi) \leq 0) \geq \beta_j; j = 1, 2, 3; \right.$$

$$p = \prod_{j=1}^3 p_j \geq \beta \Big\}; 0 < \beta_j \leq 1; 0 < \beta \leq 1. \quad (18)$$

$$(x^{opt}, W^{opt}) = \arg \left\{ \min_x W(x) \mid \text{Pos}(g_j(x, \xi) \leq 0) \geq \beta; 0 < \beta \leq 1; j = 1, 2, 3. \right\} \quad (19)$$

$$(x^{opt}(\alpha), W^{opt}(\alpha)) = \arg \left\{ \min_x W(x, \alpha) \mid (g_j(x, \xi(\alpha)) \leq 0) \geq \beta; \right. \\ \left. 0 < \beta \leq 1; 0 < \alpha \leq 1; j = 1, 2, 3. \right\} \quad (20)$$

Для задачі (18) один з експериментів дав такі результати трендів від середньоквадратичного відхилення (рис. 37 - 38).

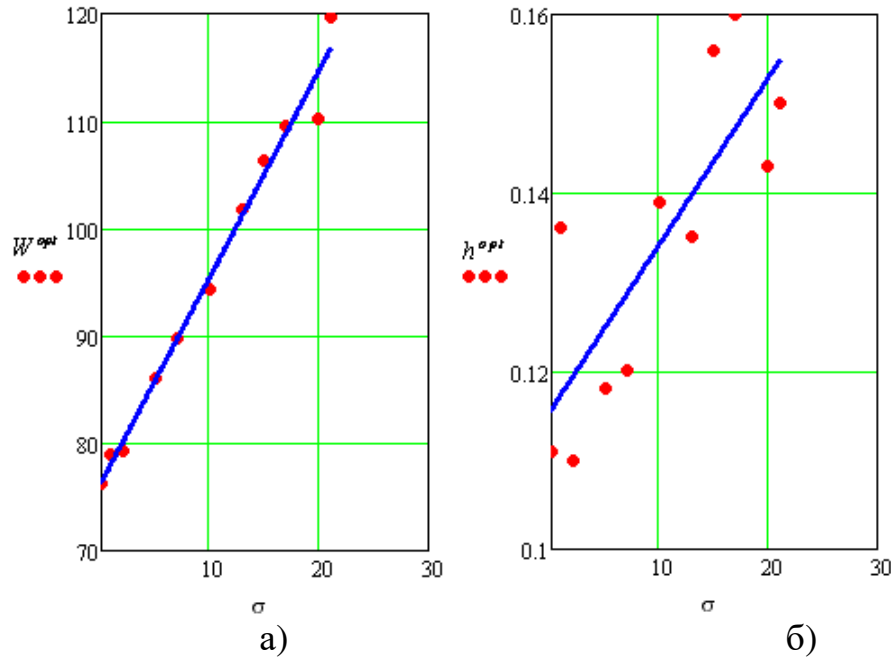


Рисунок 37 – Тренди в першому експерименті:
а) тренд об'єму оболонки; б) тренд товщини оболонки

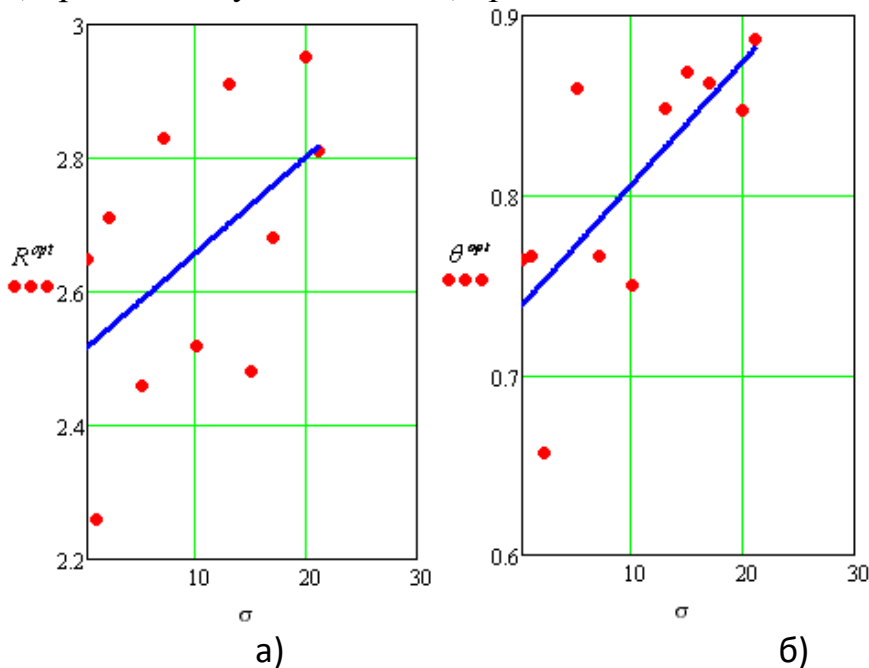


Рисунок 38 – Тренди в першому експерименті:
а) радіусу оболонки; б) відносного армування оболонки

Для задачі (19) при функції належності трикутного та Гаусова виду отримані залежності (рис. 39) та (рис. 40) відповідно.

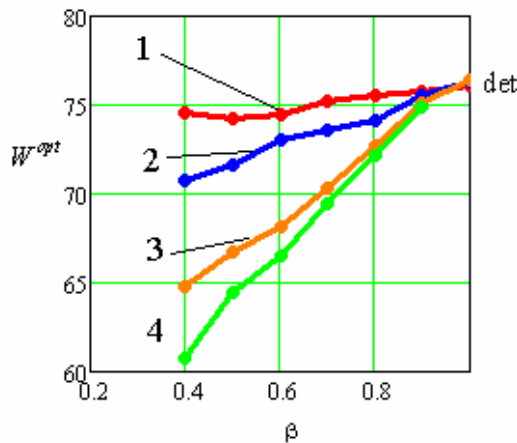


Рисунок 39 – Вплив апріорного значення параметра β на величину W^{opt} (см³):
1, 2, 3, 4 – інформаційні ситуації

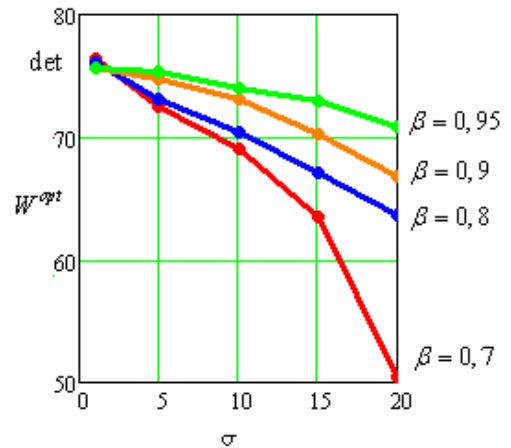


Рисунок 40 – Вплив величини середньоквадратичного відхилення на величину W^{opt} (см³) для різних β

Для трьох інформаційних ситуацій (30 різних випадків) отримано залежності величини ΔW від розкиду навантаження. Також наведено результати детермінованої оптимізації.

Для другого об'єкту розглянуто задачі вагової оптимізації:

$$x^{opt} = \arg \left\{ \min_x W(x, u) \mid \text{Prob}(g(x, u, \xi) \leq 0) \geq \alpha \right\}; \quad (21)$$

$$x^{opt} = \arg \left\{ \min_x W(x, u) \mid \text{Pos}(g(x, u, \xi) \leq 0) \geq \beta \right\}. \quad (22)$$

Для задачі (21) результати 4-х експериментів на рис. 41. Точка перетину всіх кривих експериментів дорівнює близько 0,5 і відповідає детермінованому розв'язку W^{opt} . Для задачі (22) побудовані функції належності нечіткої W^* та показана залежність очікуваного обсягу (рис. 42) від відхилення вихідних нечітких даних (P^* , q^* , M^*) від їх модальних значень (m_{P^*} , m_{q^*} , m_{M^*}).

Для другого об'єкту оптимізації розглянуто задачу (23) нечіткого моделювання оцінки максимального значення осьової сили, що тисне на циліндричну оболонку, при заданих зовнішньому тиску, крутному моменту і нечітких геометричних характеристиках:

$$P_{\max} = \arg \left\{ \max_F P \mid \text{Pos}(g(x, \xi) \geq P) \geq \beta \right\}. \quad (23)$$

В першому чисельному експерименті отримано нечіткі числа та дефазифіковані значення P_{df} від зміни розкиду величини Δ_R за умови даних $h = 0,1$ см, $R = 10$ см, $m_\theta = 0,7$. Зі збільшенням розкиду несуча здатність зменшується. Зміни дефазифікованих величин P_{df} і їх відхилень від детермінованих значень стискаючої сили від зміни розкиду величини Δ_R за умови детермінованих даних $h = 0,1$ см, $R = 10$ см, $m_\theta = 0,7$ на рис. 43. В другому експерименті значення розкидів геометричних параметрів будуть $\Delta_h = 0,05$ см, $\Delta_\theta = 0,01$, $\Delta_R = 1$ см,

розподілене навантаження $q = 30 \text{ кН / м}$. Вплив значення крутного моменту на дефазифіковане P_{df} значення критичної стискаючої сили на рис. 44.

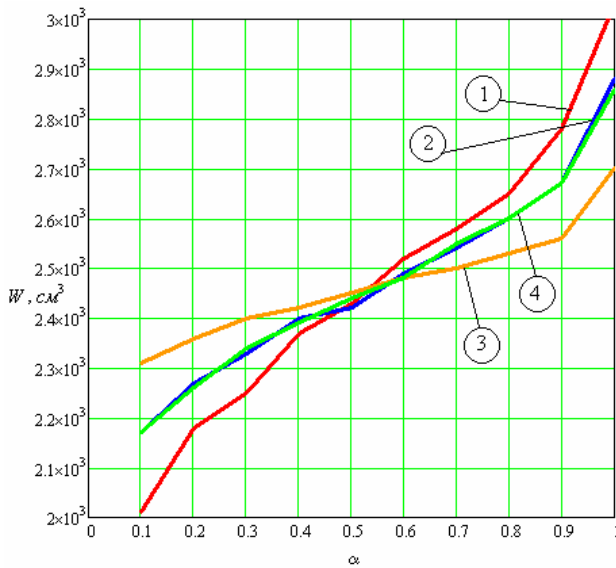


Рисунок 41 – Оптимальний обсяг W від рівня надійності α :
1, 2, 3, 4 – номер експерименту

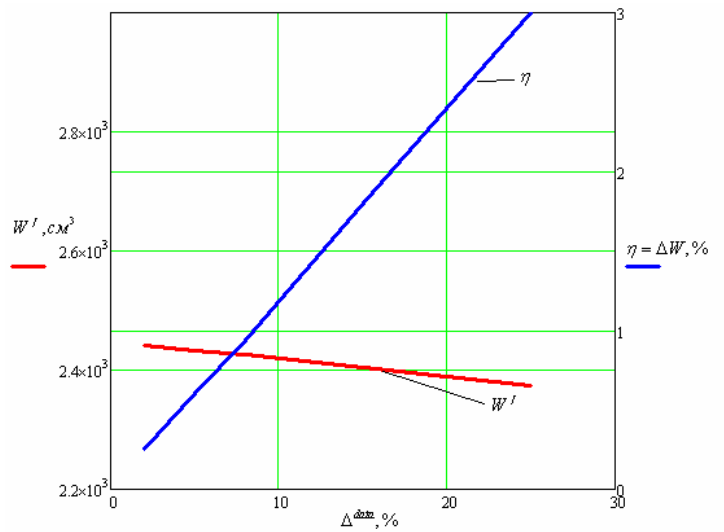


Рисунок 42 – Дефазифікований обсяг W^f і відхилення η результату

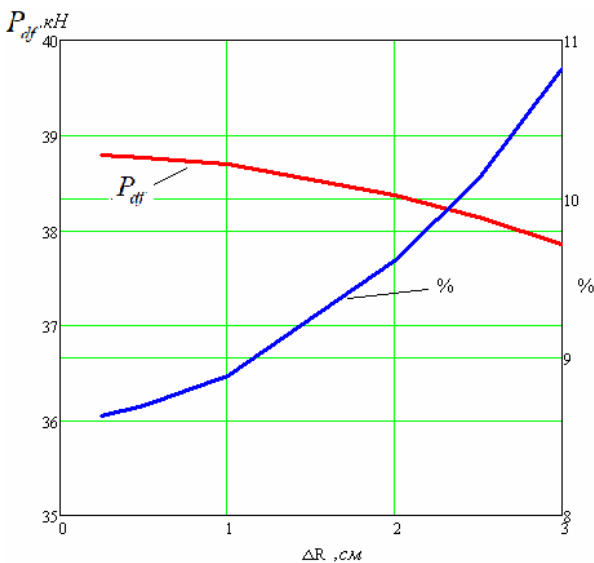


Рисунок 43 – Графік зміни дефазифікованих величин P_{df}

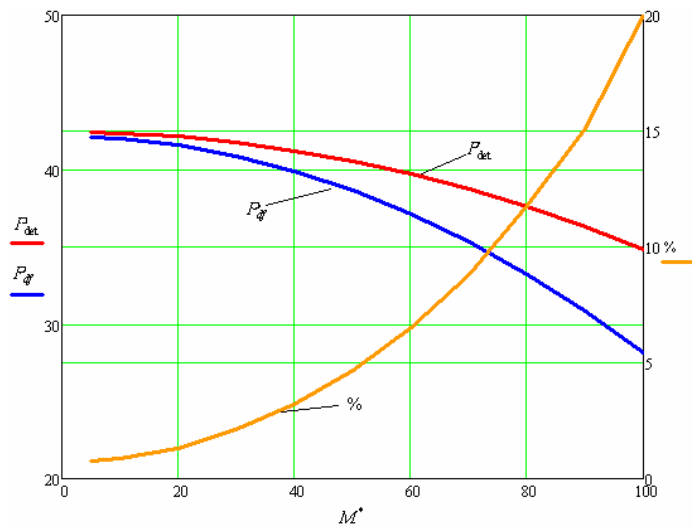


Рисунок 44 – Оптимальні значення P_{det} і P_{df} при зміні силового фактору M^* , а також відхилення значень P_{df} від P_{det} , %

Застосування мір різних видів невизначеності в задачі пошуку критичної сили для першого об'єкта дослідження показана на прикладі імовірнісної міри (рис. 45), міри нечіткості (46) та міри неточності (рис. 47) виконання події $A: \{g_j(x, \xi) \leq 0; j = 1, 2, \dots, m\}$. Результати порівняння впливу невизначеності на результат наведено в табл. 5. Тут k у % це відхилення ширини розкиду інформаційної гранули; P^* - визначене максимальне значення осової сили в (кН).

В стовпчику % надано в відсотках відхилення сили P^* від детермінованого розв'язку $P_{\text{det}} = 139.95 \text{ кН}$.

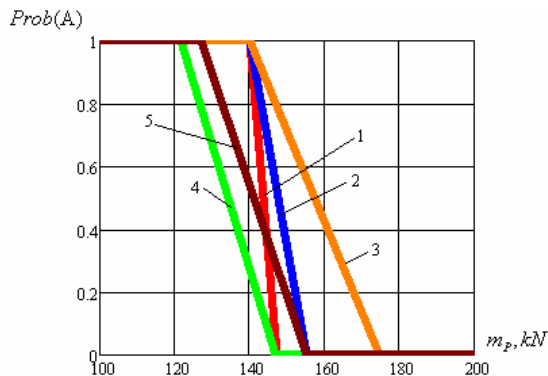


Рисунок 45 – Графічне представлення обчисленої імовірності та області виконання події A: 1, 2, 3, 4, 5 – номери експерименту

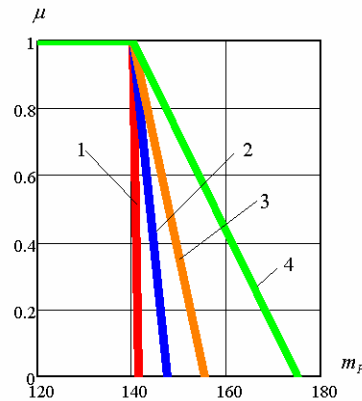


Рисунок 46 – Можливості $Pos(A)$ для різних коефіцієнтів нечіткості: 1, 2, 3, 4 – номери експерименту

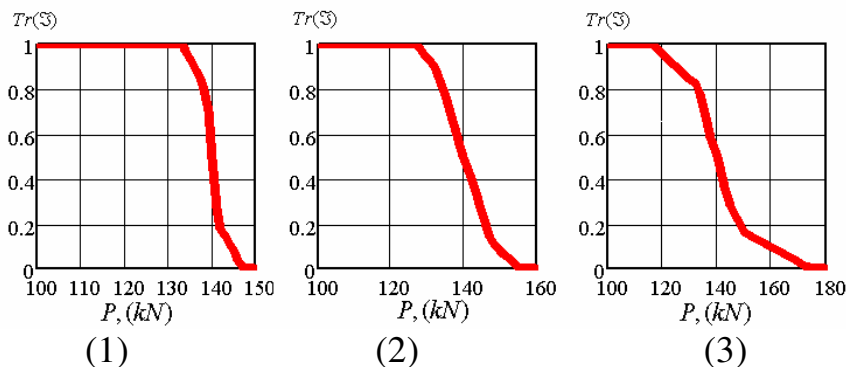


Рисунок 47 – Значення та області довіри: 1, 2, 3 - номер експерименту

Таблиця 5 - Порівняння результатів визначення критичної сили P^* ($\alpha = 0.9$) при невизначеному значенні товщини та радіусу оболонки

Міра невизначеності	$k \%$	5%		10%		20%	
		$P^* (\text{кН})$	%	$P^* (\text{кН})$	%	$P^* (\text{кН})$	%
Імовірність		132,3	5,5%	124,9	10,8%	110,6	21%
Можливість		138,6	1%	137,2	2%	131,7	5%
Довіра		132,5	5,3%	126,6	9,6%	114,5	18%

У шостому розділі показано врахування невизначеності параметрів для визначення амплітуди коливань попередньо-напруженої залізобетонної балки Т-образного перерізу під дією гармонійного збурювання. Такі балки експлуатуються в мостах вже понад 50 років. Розглянуто вимушені поперечні коливання $y(z, t)$ такої балки з постійним моментом інерції перетину I , модулем пружності бетону E , площею перерізу S , з довжиною l , погонною масою m . Розглянуто випадок, за яким обидві опори, на які спирається балка, нерухомі (рис. 48).

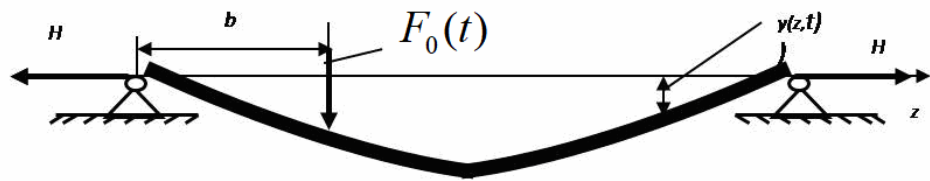


Рисунок 48 – Балка, закріплена на двох опорах

Горизонтальна реакція:

$$H = \frac{ES}{l} \cdot \int_0^l y_z^2 dz. \quad (24)$$

На балку діє поперечна змінна сила $F_0(t)$. Враховуючи (24) за Н.Г.Бондарем рівняння коливань:

$$L(z,t) = \frac{EI}{m} \cdot \left(y_{zzzz} - a \cdot y_{zz} \cdot \int_0^l y_z^2 dz \right) + y_{tt} - \frac{F_0(t) \cdot \delta(z-b)}{m} = 0. \quad (25)$$

Тут нижній індекс для функції y позначає частинну похідну за означеної змінної, $\delta(z)$ – δ -функція Дірака, b - точка прикладання сили.

Рівняння (25) зводиться до рівняння Дуфінга

$$\ddot{x} + k \cdot \dot{x} + a \cdot x + \beta \cdot x^3 = F_1(t), \quad (26)$$

де

$$a = \frac{\pi^4 EI}{ml^4}, \quad \beta = a \cdot \frac{S}{4I}, \quad F_1(t) = \frac{2F_0(t)}{l \cdot m} \sin \frac{\pi b}{l}. \quad (27)$$

Розв'язання рівняння дозволяє отримати амплітуди коливань за нечіткими значеннями параметрів попередньо-напруженої балки: $I_1 = 0.281$, $I_2 = 0.285$, $I_3 = 0.29$ (m^4); $S_1 = 0.691$, $S_2 = 0.704$, $S_3 = 0.718$ (m^2); $E_1 = 25$, $E_2 = 26$, $E_3 = 27$ ($ГПа$); $l_1 = 32.99$, $l_2 = 33$, $l_3 = 33.01$ (m); $m_1 = 1724$, $m_2 = 1756$, $m_3 = 1791$ ($кг / м$); $f_1 = 49.9$, $f_2 = 50$, $f_3 = 50.1$ ($Гц$); $\omega_1 = 17.7$, $\omega_2 = 17.8$, $\omega_3 = 17.9$ ($Гц$). Використовуючи операції над нечіткими числами отримано нечітку амплітуду коливань (рис. 49).

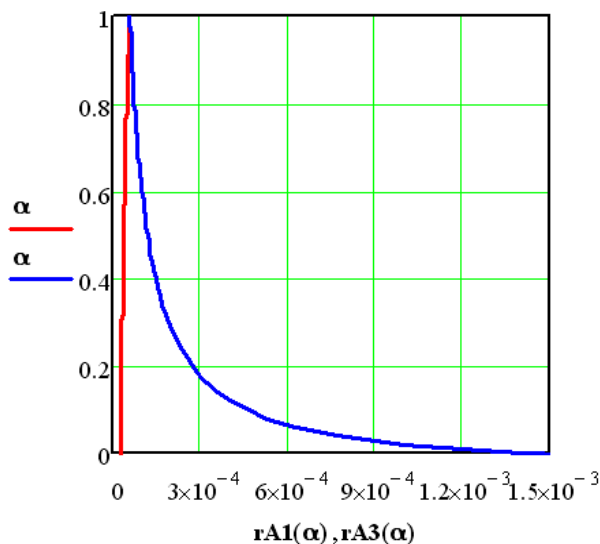


Рисунок 49 – Графік функції належності нечіткої амплітуди коливань

Найбільшу амплітуду коливань знайдемо з умови, що вигин балки від моменту сили стиску бетону високоміцною арматурою, що розтягнута до границі текучості, має дорівнювати сумі найбільшого значення амплітуди коливань і прогину балки від її власної ваги. Найбільший вигин балки y_{tek} в середині прольоту

від стиснення визначається рівністю $y_{tek} = \frac{P_{tek} \cdot (y_0 - y_a) \cdot l^2}{8 \cdot E \cdot I}$. Тут P_{tek} - сумарне

зусилля від розтягнутих пучків, за яким починається текучість високоміцної арматури. За даними лабораторних випробувань зусилля границі текучості для одного дроту діаметром 5 мм становить 32340 Н, тому маємо $P_{tek} = 7.762 \cdot 10^6$ Н. Враховуючи рівність $y_0 - y_a = 0.792$ м, одержимо найбільший вигин балки $y_{tek} = 0.111$ м. Прогин в середині прольоту від власної ваги балки становить 0.035 м, тож допустиме значення амплітуди коливань дорівнює 0.076 м.

Залежність амплітуди від нечіткої частоти коливань наведемо в табл. 6 де можна побачити випадки перевищення допустимого значення.

Таблиця 6 – Нечіткі значення амплітуди коливань

$\omega_1^{(0)}, \text{Гц}$	$\omega_1^{(1)}, \text{Гц}$	$\omega_3^{(0)}, \text{Гц}$	$A_1^{(0)}, \text{м}$	$A_1^{(1)}, \text{м}$	$A_3^{(0)}, \text{м}$
9.9	10	10.1	$5.594 \cdot 10^{-6}$	$6.998 \cdot 10^{-6}$	$8.778 \cdot 10^{-6}$
17.7	17.8	17.9	$2.559 \cdot 10^{-5}$	$5.797 \cdot 10^{-5}$	$1.401 \cdot 10^{-3}$
17.75	18	18.2	$2.637 \cdot 10^{-5}$	$7.633 \cdot 10^{-5}$	0.284
18.1	18.15	18.2	$3.358 \cdot 10^{-5}$	$1.0 \cdot 10^{-4}$	0.284
19	19.1	19.2	$1.232 \cdot 10^{-4}$	0.337	0.631
19	19.5	20	$1.232 \cdot 10^{-4}$	0.458	0.816
26.84	26.85	26.86	1.259	1.527	1.844

У цьому розділі спроектовано нову конструкцію шини 40.00-57 діагональної конструкції (рис. 50). Варіантне проектування показало неможливість повністю усунути усі недоліки такої шини, тому була сформульована детермінована задача оптимізації за умови максимізації ресурсу $S(w, y, x)$ шини:

$$y^{opt} = \arg \left\{ \max_x S(w, y, x) \mid u_j(w, y, x) \leq u_{0j} \right\}, \quad (28)$$

де: $y = \{y_1, y_2, \dots, y_m\}$, $j = 1, 2, \dots, m$ - геометрія шини, $x = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ - вектор параметрів; u_{0j} - вектори обмежень. Тут функцію w , що містить компоненти напружено-деформованого стану, знаходять в результаті розв'язання варіаційної задачі про мінімізацію повної потенційної енергії E в адаптованій для такого класу задач скінченно-елементній моделі:

$$y^* = \arg \left\{ \min_w E(w, y, x) \right\}. \quad (29)$$

При заданих значеннях вихідних величин потрібно знайти такий вектор параметрів $x = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ та $y = \{y_1, y_2, \dots, y_m\}$, який задовольнить заданим обмеженням u_{0j} та доставить максимальне значення критерію ефективності S та мінімальне значення діапазону зміни втомного ресурсу у елементах каркасу $\Delta \text{Res}_j(w, y, x)$.

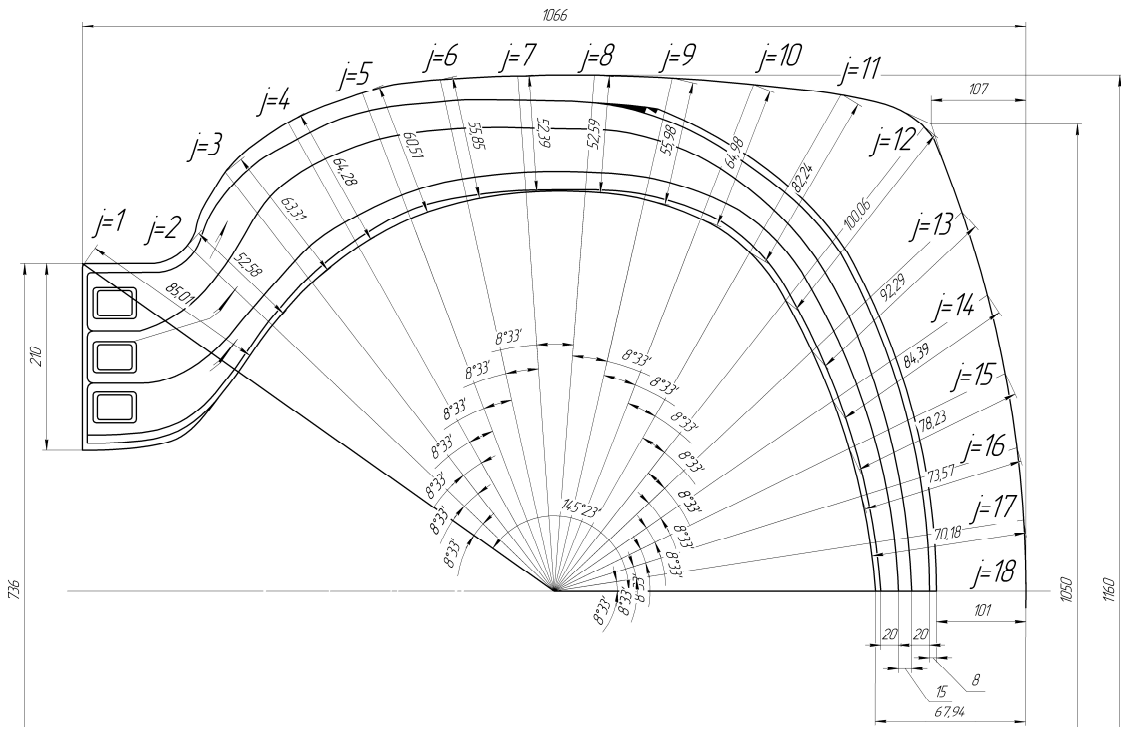


Рисунок 50 – Креслення шини 40.00-57 запропонованої конструкції

Наявність невизначеності у постановці задачі (28) - (29) приводить її до таких моделей оптимального проектування:

Модель EVM (Expected value model). Вона формулюється як:

$$y^{opt} = \arg \left\{ \max_x EVM(S(w, y, x, \xi)) \mid EVM(u_j(w, y, x, \xi)) \leq u_{0j} \right\}; \quad (30)$$

$$y^* = \arg \left\{ \min_w EVM(E(w, y, x, \xi)) \right\}. \quad (31)$$

Тут у (30) та (31) $EVM(\bullet)$ є оператор обчислення очікуваного значення:

$$EVM(u) = \sum_{i=1}^m v_i u_i.$$

Для невизначеності типу «випадковість» v_i дорівнює ймовірності $p_i = f(\xi_i)$.

Для нечіткого опису змінної ξ визначеної на можливісному просторі величина $v_i = \psi(\mu_{B1}, \mu_{B2}, \dots, \mu_{Bk})$, де μ_{Bi} - дискретне значення функції належності $\mu_B(\xi)$ величини ξ деякій нечіткій множині B .

У разі неточних величин ξ , визначених на просторі наближень значення $v_i = \varphi_i(\xi_i)$, де $\varphi_i(\xi_i)$ - функція щільності розподілу довіри для ξ .

Якщо скласти модель з обмеженнями на шанси (ССР) то врахування невизначених значень величини ξ у задачі (28) - (29) приводить до оптимізаційної моделі наступного виду:

$$y^{opt} = \arg \left\{ \max_x \max_{S^*} S^* \mid Ch(\Delta S(w, y, x, \xi) \leq S^*) \geq \beta; \right. \\ \left. Ch(u_j(w, y, x, \xi) \leq u_{0j}) \geq \alpha; j = 1, 2, \dots, m \right\}; 0 \leq \beta, \alpha \leq 1. \quad (32)$$

Тут β і α - визначені наперед довірчі рівні. Оператор $Ch(\bullet)$ обчислює відповідно ймовірність, можливість, довіру до появи події $\Delta S(w, y, x, \xi) \leq S^*$.

Модель (32) дозволяє знайти β оптимістичні оцінки величини S^* і відповідно оптимальні значення компонент вектора x .

Складна задача розрахунку контактної взаємодії оболонки шини з основою для виконання однієї ітерації пошуку оптимального розв'язку потребує кожен раз розв'язання простої задачі проектування і потребує значних обчислювальних ресурсів. В свою чергу кожний оптимальний розв'язок є одним елементом нечіткої множини. Тому апробацію можливості розв'язання задач (30, 32) для нелінійної моделі оптимізації будемо проводити виконавши оптимальний пошук серединної поверхні каркасу методом статистичного моделювання для модальних значень параметрів проектування. Згладжена форма методом найменших квадратів наведена на рис. 51, взявши геометрію якої було зроблено остаточну перевірку і отримано, що значення ресурсу для кожного з 18 елементів каркаса наблизились до свого рівномірного розподілу. Мінімальний та максимальний ресурс 141181 та 172452 км відповідно. Маса гумовокордових шарів шини склала 1705 кг, а загальна маса шини склала 3671 кг. Коефіцієнт опору коченню нової конструкції дорівнює 0.001. Відмінність між елементами з найбільшим ресурсом та найменшим ресурсом каркасу склала близько 18%. Такого результату не вдавалось досягнути варіантним проектуванням.

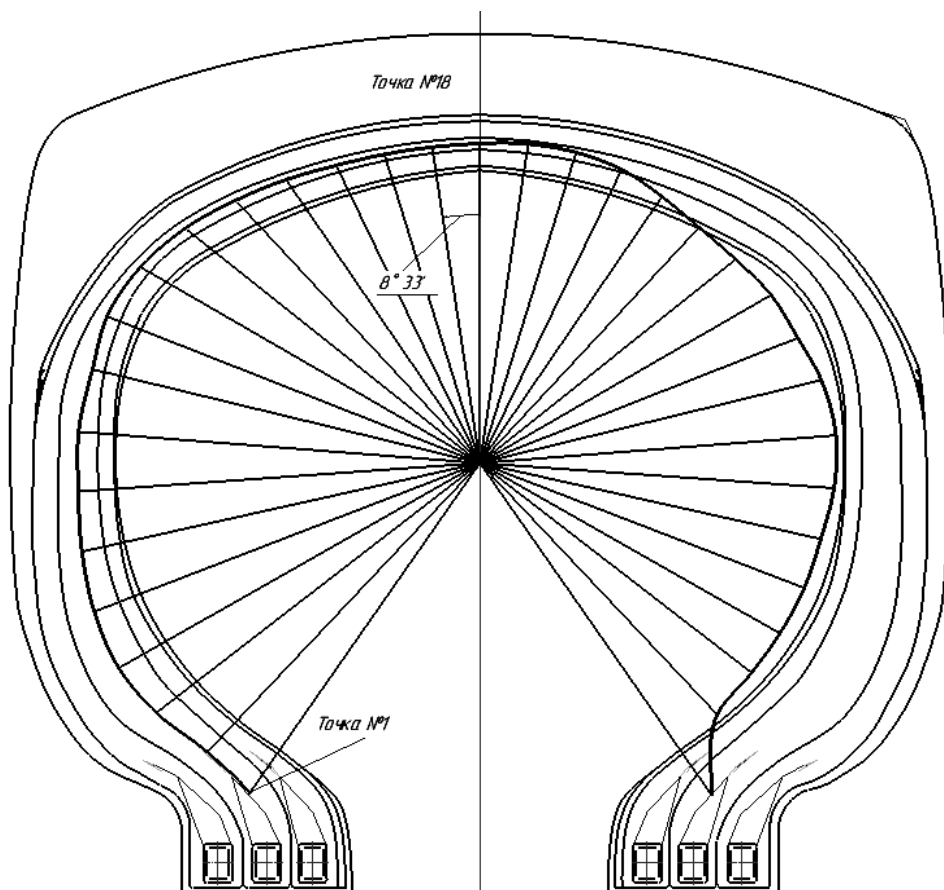


Рисунок 51 – Згладжена форма серединної поверхні каркасу

Розподіл температури в поперечному перерізі шини за умови роботи протягом 8 годин при температурі навколишнього середовища 37°C не перевищує значення 110°C (табл. 7), при якому починається термодеструкція гумовокордового матеріалу.

Таблиця 7 – Температура в біговій зоні спроектованої шини 40.00-57, °C

Назва шару	Кут.....Корона							
Низ каркасу	49.0	85.3	104.1	109.3	102.8	84.0	71.4	64.2
Верх каркасу	48.7	85.3	104.1	109.3	102.8	84.0	71.4	64.1
Середина брекеру	39.5	53.4	61.3	63.7	62.0	56.8	53.2	51.4
Верх брекеру	37.5	40.3	42.2	43.0	43.2	43.2	43.7	45.2
Підканавка	37.1	37.7	38.1	38.5	38.9	39.7	41.2	43.7
Середина протектору	37.0	37.2	37.3	37.5	38.0	38.9	40.6	43.4
Верх протектору	37.0	37.0	37.0	37.1	38.0	38.9	40.6	43.5

Тобто режим експлуатації шини буде стаціонарним. Також слід відмітити, що в результаті оптимального проектування всі нитки корду каркаса та брекера оболонки працюють тільки на розтяг, чого раніше теж не завжди вдавалось досягти, а це є необхідною умовою нормальної роботи шини.

ВИСНОВКИ

У дисертації зроблено теоретичне узагальнення і запропоновано нове розв'язання науково-прикладної проблеми щодо розробки інструментарію та узагальнених методів реалізації нових постановок задач моделювання, оптимального проектування, аналізу технічних систем та їх елементів в умовах різномірної невизначеності випадкової, нечіткої, неточної природи та їх комбінацій. Основні результати, у відповідності до поставлених задач, сформулюємо наступним чином:

1. В результаті аналізу сучасних підходів використання невизначеностей в задачах будівельної механіки та будівництва виявлено, що домінантною є теорія ймовірностей і її всебічне застосування не завжди адекватно відображає дійсні інформаційні ситуації, тому доцільним є впровадження нових підходів і методів. Аналітичні формули інженерного аналізу, отримані за допомогою частинних похідних, можуть бути застосовані для аналізу границь невизначеності, але обмеженнями є те, що ми повинні мати аналітичний розв'язок, деколи отримання похідних пов'язане з громіздкістю, немає оцінки очікуваного значення та присутній ряд інших недоліків. Підходи з позиції теорії нечітких і неточних множин є більш розвиненими і їх реалізація за допомогою аналітичних, графоаналітичних, чисельних та аналітико-чисельних методів знімає такі обмеження, що показано в роботі.

2. Моделювання стержневих систем дозволило провести випробування моделей, налагодження методів, та отримати практичні результати в задачах будівельної механіки. Розроблений графоаналітичний метод для задачі завдання бажаного обсягу у термінах «приблизно» $5 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3$ для простої шарнірної балки (розподілене навантаження «приблизно» 40 кН / м) дав розв'язок з можливістю $\mu \approx 0.71$, а для двох випадків нечіткого обсягу та сили $P \approx 8 \cdot 10^4 \text{ Н}$ подія

реалізувалась для $\mu \approx 0.52$ та $\mu \approx 0.31$. Отримані дані, щодо очікуваного значення в задачах аналізу балок, показали толерантність до симетричних «сирих» початкових даних. Зростання впливу, як і очікувалось, відбувається при використанні напівнечіткого числа.

Запропонована процедура обчислення очікуваного значення відносного навантаження для задачі з великими переміщеннями стержня дала $\bar{P} \approx 10,675$. Реалізація відбулась за допомогою методу динамічного програмування.

Для статично визначених ферм запропоновано процедуру розрахунку коефіцієнта надійності за умови нечіткої та стохастичної інформації щодо навантаження, проведено числові експерименти. Для простої 4-х елементної ферми розглянуто комплекс задач з невизначеностями: моделювання за умови нечіткого бажаного обсягу та нечіткого навантаження за допомогою графоаналітичного методу (для трьох випадків маємо можливості $\mu \approx 0.61, \mu \approx 0.22, \mu \approx 0.33$ та площі $A_B^* = 63 \text{ мм}^2, A_D^* = 65 \text{ мм}^2, A_C^* = 64 \text{ мм}^2$ відповідно); проектування ферми при нечіткому навантаженні, використовуючи Декартів добуток та метод динамічного програмування дало $\Delta = 2.07\%$ між очікуваним значенням та точним; реалізовано оптимальне проектування при навантаженні нечітко-випадкового характеру; оцінено коефіцієнт надійності по навантаженню; оцінено вплив нечіткого модуля Юнга на оптимальний проект з використанням функцій належності трикутного та трапецієвидного числа; оцінено ресурс ферми з тріщиною, показано вплив тріщини на оптимальний обсяг (при наявності тріщини довжиною до 10 мм система не чутлива, при подальшому збільшенні тріщини відбувається перерозподіл матеріалу збільшенням площі перерізу стержня з тріщиною і зменшенням площі інших стержнів), проведено нечітке оптимальне проектування. Проведено ще ряд досліджень з фермами. Так для оптимальних станів складної ферми отримано максимальне переміщення вузла у випадку завдання бажаного обсягу у нечіткій формі, так для $[a = 1.8, m = 2.2, b = 2.7] \text{ м}^3$ маємо реалізацію очікуваного значення за методом центру $\nu^{def} = 8.845 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, або за методом Б. Лю $\nu^{def} = 8.902 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ при детермінованому $\nu^{det} = 8.82 \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

Для простої ферми за умови додаткового обмеження щодо власної частоти коливань та при нечіткому завданні власної частоти та навантаження проведені дослідження впливу нечіткості на результат. Зі збільшенням частоти власних коливань чутливість системи зменшується. Максимальна розмитість η (від 0.64% до 4.87%) в умовах нечіткого опису даних (розкид від 5% до 20%) виникає при $\omega = 9 \text{ Гц}$. Побудовано процедуру пошуку оптимальних розв'язків для випадку нечітко-випадкової невизначеності. Величина об'єму, для різних подій, знаходиться в межах $16029 < V^{dr} < 22588 \text{ см}^3$, тобто між розв'язаннями при найменшому та найбільшому навантаженнях.

Для статично невизначених стержневих систем, для розв'язання яких права частина канонічного рівняння подана нечітко, запропоновано метод оцінки невизначеності за нев'язкою, що є квадратом різниці між розв'язанням СЛАР при правих частинах визначених Декартовим добутком і чітким розв'язанням СЛАР при

модальних значеннях нечіткої величини. Наведені результати чисельних експериментів показали чутливість деяких елементів таких систем до невизначеності при невеликих значеннях нев'язки. Так при $\Delta=1,467$ для $M_{23} = M_{21}$ очікуване значення збільшилось на 38%.

В роботі розглянуті питання проектування циліндричної пружини в умовах повної і неповної інформації. Математичний аналіз застосовано для розв'язання прямої і двоїстої задачі при отриманні аналітичних залежностей за допомогою методу множників Лагранжа. При нечіткому завданні частоти власних коливань пружини $m_\omega = 5$; $a = 4.5$; $b = 5.5$ Гц, отримаємо масу $W_{def}^* = 46.34 \cdot 10^{-3}$ кг, діаметр $d_{def}^* = 1.42$ мм. Порівняння отриманих результатів з розв'язками $W_{det}^* = 45.33 \cdot 10^{-3}$ кг і $d_{det}^* = 1.40$ мм при детермінованому значенні $\omega_0 = 5$ Гц дає такі відносні похибки $\varepsilon_w = 2.24\%$, $\varepsilon_d = 1.43\%$.

3. Для ізотропної оболонки стисненої поздовжньою силою розроблено метод реалізації моделей з обмеженнями на шанси, та наведено реалізацію пошуку оптимістичного значення маси оболонки при різноманітних рівнях довіри початкових даних. Зі збільшенням довіри результат наближається до детермінованого $\min G_* = 1,582$ кг. Для нечіткого подієвого програмування проведені розрахунки оптимального обсягу матеріалу оболонки. Досягнута максимальна можливість 0.941 та бажана маса 2,702 кг при наступних реалізаціях нечітких величин: $P = 10020,1$ Н, $E = 8,14394$ МПа, $\sigma_0 = 16,247$ кПа.

Для різних функцій належності розглянуті задачі невизначеного програмування з використанням нечіткої моделі очікуваного значення, отримано значення стискаючої сили для різних інформаційних ситуацій. Отримано несиметричні функції належності з модальним значенням $u^{det} = 71,251$ кН. Найбільший вплив на песимістичний результат ($\approx 160\%$) в першій інформаційній ситуації для нульового рівня довіри показав експеримент де невизначеність: $\sigma_h = 0.2$ мм та $\sigma_R = 20$ мм.

Розроблена геометрична процедура пошуку можливості реалізації ситуації, коли обмеження та цілі подані нечітко. Реалізація процедури дала результат, з рівнем довіри $\mu \approx 0,63$, який відповідає тільки оптимістичному значенню: $N_*^p \approx 24,2$ кН.

Для випадку неточного завдання геометричних характеристик у вигляді верхнього та нижнього наближень розроблено відповідний метод реалізації та наведені чисельні експерименти. Бачимо збіжність до детермінованого значення $u^* = 71,251$ кН при зменшенні рівня невизначеності.

За методом Монте-Карло виконано пошук максимального навантаження в умовах стійкості та міцності при стохастичних даних, для яких був розроблений відповідний метод формалізації такого виду невизначеності.

Також запропоновані обчислювальні підходи реалізації оптимізаційної задачі в умовах завдання випадково-нечіткої і нечітко-випадкової інформації про геометричні параметри оболонки, що знаходиться в умовах трьох граничних станів. В наведених задачах отримані очікувані значення шуканого навантаження на

оболонку $P_{fuzzy-rand}^{det} = 1017.2 \text{ кН}$ та $P_{rand-fuzzy}^{det} = 1027 \text{ кН}$ відповідно.

Збіжність запропонованих підходів до детермінованих значень для різних видів або комбінацій невизначеностей було перевірено при звуженні відповідної невизначеності.

4. Для ортотропної армованої циліндричної оболонки під дією зосередженої сили та в умовах трьох граничних станів розглянуто ряд задач та отримано практичні результати в умовах невизначеностей. Оборнена задача при нечіткому завданні навантаження «приблизно 50 кН» розв'язана аналітично за допомогою методу множників Лагранжа. Отримані очікувані значення відносного вмісту армуючих волокон, радіусу оболонки, обсягу матеріалу (для семи експериментів мінімальне і максимальне значення обсягу оболонки $W_{def}^{det} \approx 75.66 \text{ см}^3$ та $W_{def}^{det} \approx 82.87 \text{ см}^3$ відповідно).

Пряма задача визначення максимального навантаження стиснутої ортотропної оболонки за наявності невизначеностей стохастичної, нечіткої та неточної природи розв'язана за допомогою методу Монте-Карло та відповідних методів формалізації невизначеностей, наведено розв'язок задачі з інтервальними числами. Показано, що для стохастичної та неточної невизначеності при ймовірності та довірі 0.5 відповідно, отримуємо наближення до детермінованого значення $P_{det}^* = 54.98 \text{ кН}$. При збільшенні ймовірності, ступеня довіри, показники $P_{rand}^*(\beta)$ та P_{rough}^* зменшуються (тим більше, чим більше розмитість даних). У другому експерименті максимальна неточність для h становила 6%, для R - 0,7%, для θ - 13%. Отриманий при цьому результат $P_{rough}^*(1) = 49 \text{ кН}$ відрізняється від детермінованого ($P_{det}^* = 55 \text{ кН}$) на 10,7%. З позиції інтервальних чисел, «стискаючи» зовнішнє наближення до внутрішнього, отримуємо $P_{interval}^*(1) = 48.40 \text{ кН}$, що на 1.2% менше від величини $P_{rough}^*(1) = 49 \text{ кН}$; «розтягуючи» внутрішнє наближення у визначенні неточного числа, до зовнішнього, отримуємо $P_{interval}^*(1) = 49.68 \text{ кН}$, що на 1.4% більше від величини $P_{rough}^*(1) = 49 \text{ кН}$. Для чотирьох експериментів нечіткого моделювання побудовано функції належності навантаження. Також показано, що найбільше значення величини $P_{fuzzy}^*(1) = 63,5 \text{ кН}$ досягається при $\theta = 0,5$.

Досліджено вплив нечітких та випадкових даних на вагову оптимізацію оболонки. Ілюстрація стохастичної моделі (при $\sigma_p = 0$ маємо $W_{det}^{opt} = 75.9 \text{ см}^3$, $h_{det}^{opt} = 0.975 \text{ мм}$, $R_{det}^{opt} = 24.95 \text{ см}$, $\theta_{det}^{opt} = 0.775$) дає зростаючі тренди величин W^{opt} , h^{opt} , R^{opt} , θ^{opt} зі збільшенням середньоквадратичного відхилення. Числова ілюстрація нечіткої моделі показує збіг до детермінованого значення при збільшенні можливості та зменшенні розмитості даних.

Подальший розвиток в роботі знайшло поняття міри. Запропоновано процедуру обчислення мір шансу виконання відповідних подій: імовірності, можливості та довіри для оболонки при невизначених радіусі і товщині. В результаті отримано порівняння впливу різномірної невизначеності на максимальне

значення критичної сили. Так, при значенні шансу $\alpha = 0.9$ та відхиленні ширини розкиду інформаційної гранули 20% для імовірності маємо $P^* = 110,6$ кН, для можливості $P^* = 131,7$ кН і для довіри $P^* = 114,5$ кН ($P_{\text{det}} = 139.95$ кН - детерміноване значення). Найменша реакція на вплив невизначеності виявлена для випадку нечітких множин.

5. Для циліндричної ортотропної оболонки із склопластику за умови одного граничного стану розглянуто ряд задач. Вагова оптимізація в стохастичному, нечіткому середовищі, що розв'язана на базі методу Монте-Карло та відповідних методів формалізації невизначеностей показала для імовірнісної задачі збіжність до детермінованого значення ($W^{\text{opt}} = 2447,6$ см³; $h^{\text{opt}} = 3,9$ мм; $\theta^{\text{opt}} = 0,253$) при $\alpha \approx 0.5$ та збільшення обсягу зі збільшенням вірогідності. Для нечіткої задачі показано наближення оптимістичного значення обсягу до детермінованого зі зменшенням розмитості даних.

Розв'язана задача оцінки максимального значення осьової сили, при заданих крутному моменті та зовнішньому тиску при нечітких геометричних характеристиках. Наведено імітаційні експерименти. Для випадку, коли розкид величини радіусу оболонки склав 30%, отримаємо зменшення дефазифікованого значення стискаючої сили на 10,82%. В другому експерименті взято розкид геометричних параметрів $\Delta_h = 0,5$ мм, $\Delta_\theta = 0,01$, $\Delta_R = 10$ мм та розподілене навантаження як сталу величину $q = 30$ кН / м. Показано залежності зменшення дефазифікованого значення стискаючої сили при збільшенні M^* . Достовірність моделей і збіжність розроблених методів перевірено на детермінованих задачах, та збіжністю при зменшенні відповідного рівня невизначеності.

6. Науково-практичним результатом роботи є дослідження впливу невизначених параметрів на реальну попередньо-напружену залізобетонну балку довжиною 33 м, яка використовувалась при будівництві Центрального мосту в м. Дніпро. Використавши перевірену математичну модель в симбіозі з операціями над нечіткими числами, було отримано нелінійну функцію належності нечіткої амплітуди коливань, та функцію належності статичного прогину від нечітких параметрів. Оцінка толерантності такої складної системи показала, що вона є досить чутливою до невизначених параметрів. Навіть мала нечіткість у завданні частоти може викликати руйнування балки. Навіть при невеликих відхиленнях від модального значення частоти можливі дуже великі відхилення в значеннях амплітуди коливань з перевищенням допустимого значення 0.076 м. Так для значення $\omega_3^{(0)} = 18.2$ Гц відповідне значення $A_3^{(0)}$ правого кінця інтервалу амплітуди перевищує граничне приблизно на 274%.

7. Розроблено оптимізаційну математичну модель розрахунку шини за умови завдання початкових даних в нечіткій формі, в яку інтегровано модель розрахунку НДС та контактної взаємодії шаруватих ортотропних гумовокордових оболонок обертання. В результаті апробації запропонованих моделей невизначеного моделювання вдалось спроектувати нову оптимальну геометрію шини 40.00-57 з необхідними характеристиками.

8. Розроблені методи розрахунків в умовах невизначеності були впроваджені в

навчальний процес та реальне проектування. В роботі показано, що не всі технічні конструкції витримують вплив невизначеності, тому для таких технічних систем доцільним було б крім розрахунків на міцність, жорсткість та стійкість проводити пошук найбільш не «толерантних» впливів. Особливо важливим і корисним цей напрям стає в умовах війни. Тут можна казати про те, що йдеться про пошук таких параметрів системи, невизначеність в яких призводить до великих змін стану системи в кінцевому результаті.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації

1. **Volchok D.**, Danishevskyy V., Slobodianiuk S. & Kuchyn I. Fuzzy sets application in the problems of structural mechanics and optimal design. *Acta mechanica*. 2023. Vol. 234. P. 6191–6204. (**Scopus**)
2. Бараненко В.О., **Волчок Д.Л.** Застосування мір невизначеності в задачі пошуку критичної сили для ортотропної оболонки за умов несучої здатності. *Опір матеріалів і теорія споруд. Науково-технічний збірник*. 2021. №106. С. 201–220. (**Web of Science**)
3. Baiev S.V., **Volchok D.L.** Nonlinear oscillations of a prestressed concrete bridge beam subjected to harmonic perturbation in the conditions of indeterminacy of parameters. *Strength of Materials and Theory of Structures*. 2020. no. 104. P. 147–163. (**Web of Science**)
4. Бараненко В.О., **Волчок Д.Л.** Нечітке моделювання в оптимальному проектуванні шарнірно-стержневих систем. *Опір матеріалів і теорія споруд. Науково-технічний збірник*. 2018. № 100. С. 71–93. (**Web of Science**)
5. Бараненко В.О., **Волчок Д.Л.** Визначення максимального значення навантаження стиснутої ортотропної оболонки в умовах випадкової, нечіткої і неточної інформації. *Опір матеріалів і теорія споруд. Науково-технічний збірник*. 2017. № 99 С. 71–89. (**Web of Science**)
6. Бараненко В.А., **Волчок Д.Л.** Обернена задача будівельної механіки армованої циліндричної оболонки зі склопластику. *Опір матеріалів і теорія споруд. Науково-технічний збірник*. 2017. № 98. С. 89–103. (**Web of Science**)
7. Baranenko V., **Volchok D.** Evaluation of the maximum axial force on a cylindrical shell structure in terms of stability and strength using fuzzy quantities of chosen geometric parameters. *Roads and Bridges-Drogi i Mosty*. 2016. Vol. 15, no. 1. P. 71–81. (**Scopus and Web of Science**)
8. Бараненко В.О., **Волчок Д.Л.** Оцінка максимального значення осової сили стиснення оболонки при нечітких даних як задача невизначеного програмування. *Опір матеріалів і теорія споруд. Науково-технічний збірник*. 2016. № 97. С. 90–103. (**Web of Science**)
9. Бараненко В.О., **Волчок Д.Л.** Пошук максимального значення навантаження кругової циліндричної стиснутої оболонки в умовах стійкості та міцності при стохастичних даних. *Опір матеріалів і теорія споруд. Науково-технічний збірник*. 2015. № 96. С. 88–98. (**Web of Science**)
10. **Волчок Д.Л.**, Данішевський В.В. Проектування оптимальної конструкції ортотропної оболонки 40.00-57 подвійного призначення в умовах невизначеностей.

Український журнал будівництва та архітектури. 2023. № 3. С. 34–39.

11. **Волчок Д.Л.** Оцінка ресурсу конструкції з тріщиною нормального розриву на основі нечіткого моделювання. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2019. № 1. С. 86–93.
12. Baranenko V., **Volchok D.** Evaluation de déplacement maximal d'un noeud constructif à condition de robustesse et ayant un volume imprécis. *Revista Romana de Inginerie Civila*. 2018. Vol. 9, no. 3. P. 307–314. (**Copernicus**)
13. Бараненко В.О., **Волчок Д.Л.** Нетипова задача оптимального проектування пружних балок в умовах нечіткої інформації. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2018. Т. 29, №1. С. 161–165.
14. Бараненко В.О., **Волчок Д.Л.** Методика застосування основних означень теорії нечітких множин в задачах аналізу та оптимального проектування. *Вісник Херсонського національного технічного університету. Математичне моделювання і прикладна механіка*. 2018. Т. 2, № 3 (66). С. 170–176.
15. Бараненко В.О., **Волчок Д.Л.**, Григорович М.С. Проектування циліндричних пружин мінімальної маси за обмеження на власну частоту поздовжніх коливань в умовах повної і нечіткої інформації. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2018. № 1. С. 52–59
16. Бараненко В.О., **Волчок Д.Л.** Вагова оптимізація стиснутої ортотропної циліндричної оболонки за умов трьох граничних станів, стохастичної і нечіткої невизначеності навантаження. *Проблеми обчислювальної механіки та міцності конструкцій*. 2017. № 27. С. 5–23
17. **Volchok D.** Analysis of rod systems under undefined load. *Revista Romana de Inginerie Civila*. 2017. Vol. 8, no. 1. P. 45–57 (**Copernicus**)
18. **Volchok D.** Large deflection of elastic rods under compression with fuzzy information for load data. *Theoretical foundations of civil engineering*. 2017. Vol. 24. P. 9–14.
19. Бараненко В.О., **Волчок Д.Л.** Оцінка максимального значення стискаючої циліндричну оболонку сили в умовах трьох граничних станів і завданні геометричних параметрів нечітко-випадкової і випадково-нечіткої природи. *Вісник Херсонського національного технічного університету. Математичне моделювання і прикладна механіка*. 2017. Т.1, №3. С. 18–25.
20. **Волчок Д.Л.** Оцінка максимального значення осьової сили, що тисне на циліндричну оболонку, при заданих зовнішньому тиску, крутному моменту і нечітких геометричних характеристиках. *Будівництво, матеріалознавство, машинобудування: Сб. наук. тр.* 2017. № 95. С. 47–52.
21. Бараненко В.О., **Волчок Д.Л.** Вагова оптимізація циліндричної оболонки із склопластику за умови одного граничного стану і невизначеної інформації щодо вихідних даних. *Вісник Запорізького національного університету. Математичне моделювання і прикладна механіка. Фізико-математичні науки*. 2017. №1. С. 22–35.
22. Baranenko V., **Volchok D.** Approach of fuzzy dependent-chance programming to the problem of synthesis of cylindrical shells. *Theoretical foundations of civil engineering*. 2015. Vol. 23. P. 65-70
23. Бараненко В.О., **Волчок Д.Л.** Геометрична інтерпретація розв'язання задачі синтезу циліндричної оболонки в умовах нечіткої інформації про цілі та дані. *Вісник*

Херсонського національного технічного університету. *Математичне моделювання і прикладна механіка*. 2015. №3. С. 534–538.

24. Бараненко В.О., **Волчок Д.Л.** Нечітке моделювання в задачах синтезу стисненої оболонки в умовах нечіткої невизначеності даних та обмежень несучої здатності. *Вісник Запорізького національного університету. Математичне моделювання і прикладна механіка. Фізико-математичні науки*. 2015. №1. С. 7–12.

25. Kvasha E., **Volchok D.**, Pogasii E., Schmidt R., Malovichko A. 29,5-25 tire shell modelling. *Theoretical foundations of civil engineering*. 2014. Vol. 22. P. 123–126.

26. Kvasha E., **Volchok D.**, Pogasii E., Schmidt R., Malovichko A. Tire properties investigation with the own mathematical model. *Theoretical foundations of civil engineering*. 2013. Vol. 21. P. 101–106.

27. Kvasha E., **Volchok D.**, Pogasii E., Schmidt R., Agapova V. Numerical research of laminated extra big tyre shells. *Theoretical foundations of civil engineering*. 2012. Vol. 20. P. 197–202.

28. Кваша Э.Н., **Волчок Д.Л.**, Погасий Е., Шмидт Р., Копыленко Е. Влияние качества дорожного покрытия на характеристики СКГШ 40.00-57. *Theoretical foundations of civil engineering*. 2011. Vol. 19. P. 143–146.

29. Кваша Э.Н., **Волчок Д.Л.**, Погасий Е., Шмидт Р., Вайхерт Д., Копыленко Е. Влияние конструктивных факторов на характеристики новой шины 40.00-57. *Theoretical foundations of civil engineering*. 2010. Vol. 18. P. 199–202.

30. Кваша Э.Н., **Волчок Д.Л.**, Погасий Е.А., Бондарь В., Шмидт Р., Копыленко Е. Проектирование конструкции шины 40.00-57. *Theoretical foundations of civil engineering*. 2009. Vol. 17. P. 193–196.

31. Кваша Э.Н., Погасий Е.А., **Волчок Д.Л.** Влияние особенностей эксплуатации шин на их основные показатели. *Theoretical foundations of civil engineering*. 2008. Vol. 16. P. 223–228.

32. Кваша Э.Н., Погасий Е.А., **Волчок Д.Л.** Оценка эксплуатационных показателей оболочек шин сверхнизкого давления. *Theoretical foundations of civil engineering*. 2007. Vol. 15. P. 365–370.

33. Кваша Э.Н., Погасий Е.А., **Волчок Д.Л.** Решение контактной задачи резинокордной оболочки шины при ее обжати на цилиндрический барабан. *Theoretical foundations of civil engineering*. 2006. Vol. 14. P. 579–586.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

34. **Волчок Д.Л.**, Данішевський В.В. Графоаналітичний метод розв'язання задачі опору матеріалів за умови завдання мети та обмежень нечітко. «Готуємо фахівців для відбудови України»: матеріали III освітнього форуму академічної спільноти, м. Дніпро, 19–23 червня 2023 р. / Придніпровська державна академія будівництва та архітектури». Дніпро, 2023. С. 76–80.

35. **Волчок Д.Л.**, Погасий О.А. Нові задачі моделювання шаруватих гумовокордових оболонок військового та цивільного призначення. «Переможемо – Відбудуємо»: тези Всеукр. наук.-практ. форуму, м. Дніпро, 29–30 червня 2022 р. / ДВНЗ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури». Дніпро, 2022. С. 28–30.

36. **Волчок Д.Л.** Нечітке моделювання в оптимальному моделюванні стрижневих систем. *Актуальні проблеми механіки суцільного середовища і міцності*

конструкцій: тези доп. другої міжн. наук.-техн. конф. пам'яті академіка В.І. Моссаковського, м. Дніпро, 10-12 жовтня 2019 р. / Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара. Дніпро, 2019. С. 149–150.

37. **Volchok D.**, Baranenko V., Syvash N., Stadnyk M. Méthode de programmation dynamique pour une conception optimale des fermes statiquement déterminées. *"Langues, sciences et pratiques"*: Actes du 2 colloque international francophone en Ukraine, Dnipro, 3-4 Octobre 2018 / Académie d'état de Génie Civil et d'architecture de Prydniprovyia, Ambassade de France en Ukraine, Agence Universitaire de la Francophonie, 2018. P. 206–207.

38. Baranenko V.O., **Volchok D.L.** The application of various types measures of uncertainty to the problem of finding the critical force for an orthotropic shell under load-bearing conditions. *Stability of structures XV symposium*, Zakopane, 17–21 September 2018 / Lodz University of Technology, Theoretical and Applied Mechanics Polish Society. Zakopane, 2018. P. 43–44.

39. Бараненко В.О., **Волчок Д.Л.**, Оболонський Д.О. Вплив нечітких даних на результат оптимізації шарнірно-стержневих систем. *Сучасні методи і проблемно-орієнтовані комплекси розрахунку конструкцій і їх застосування у проектуванні і навчальному процесі*: тези доп. міжнародної наук.-практ. конф., м. Київ, 26-27 вересня 2018 р. / Київський нац. ун-т будівництва і архітектури, Київ, 2018. С. 22–25.

40. Бараненко В.О., **Волчок Д.Л.** Задачі аналізу та оптимального проектування пружних систем в умовах застосування основних означень теорії нечітких множин. *XIX міжнародна конференція з математичного моделювання, присвячена 250 – річчю з дня народження Жана Батиста Жозефа Фур'є*: матеріали міжнародної конф., м. Херсон, 17-21 вересня 2018 р. / Херсонський національний технічний університет. Херсон, 2018. С. 43.

41. Бараненко В.О., **Волчок Д.Л.** Оцінка ресурсу конструкції з тріщиною нормального розриву на основі нечіткого моделювання. *Динаміка, міцність та моделювання в машинобудуванні*: тези доп. Міжн. наук.-тех. конф., 10–14 вересня 2018 р., Харків / Національна Академія Наук України, Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного, Харків, 2018. С. 82–83.

42. Бараненко В.О., **Волчок Д.Л.** Нечітке моделювання в задачах конструкцій із тріщиною. *Сучасні проблеми механіки та математики*: збірник наукових праць у 3-х т. Міжн. наук.-тех. конф., м. Львів, 22-25 травня 2018 / за заг. ред. А.М. Самойленка та Р.М. Кушніра. Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С. Підстригача НАН України. Львів, 2018. Т. 1. С. 16–17.

43. **Volchok D.**, Baranenko V. Estimation of maximal displacements of a truss node under conditions of strength and fuzzy goal of volume. *Innovative and clean solutions for the built environment*: Proceeding of the RCEPB, Bucarest, 7-8 June 2018 / Technical University of Civil Engineering. Bucarest, 2018. P. 45–46.

44. Баєв С.В., **Волчок Д.Л.** Вплив невизначеності параметрів попередньо напруженої залізобетонної балки на її прогин і амплітуду коливань. *Сучасні методи і проблемно-орієнтовані комплекси розрахунку конструкцій і їх застосування у проектуванні і навчальному процесі*: тези доп. міжнародної наук.-практ. конф., м. Київ, 25-26 жовтня 2017 р. / Київський нац. ун-т будівництва і архітектури. Київ,

2017. С. 6–9.

45. Бараненко В.О., **Волчок Д.Л.** Визначення максимального значення стискаючої сили, що діє на циліндричну оболонку в умовах параметрів нечітково-випадкової і випадково-нечіткої природи. *XVIII міжнародна конференція з математичного моделювання, присвячена 100 – річчю з дня народження академіка Ю.О. Митропольського*: матеріали міжнародної конф., м. Херсон, 18-22 вересня 2017 р. / Херсонський національний технічний університет. Херсон, 2017. С. 104–105.

46. Бараненко В. О., **Волчок Д. Л.** Імітаційне та нечітке моделювання в оптимальному проектуванні тонкостінних конструкцій в умовах випадкової і нечіткої інформації про вихідні дані. *Інформатика та системні науки*: матеріали VIII Всеукраїнської наук.-практ. конф., м. Полтава, 16–18 березня 2017 р. / за ред. Ємця О.О.. ПУЕТ. Полтава, 2017. С. 37–40.

47. **Volchok D.** Analisis of rod systems under undefined load. *Strategies of professional associations and public institutions for implementation of EU directives: Proceeding of the RCEPB, Bucarest, 2-3 June 2016* / Technical University of Civil Engineering. Bucarest, 2016. P. 36–37.

48. **Volchok D.**, Kvasha E., Schmidt R. Special Mathematical Model for Laminated Shells. *8th European Solid Mechanics Conference (ESMS): Abstracts of Conference*, Graz, 9-13 July 2012 / Graz University of Technology, 2012. (2 pages).

49. **Volchok D.**, Kvasha E., Schmidt R. Design properties numeral and experimental research of laminated extra big tyre shells. *The 82nd Annual Scientific Conference of the International Association of Applied Mathematics and Mechanics (GAMM): Abstracts of Conference*, Graz, 18-21 April 2011 / Graz University of Technology, 2011. P. 153.

50. **Volchok D.**, Schmidt R., Weichert D. Modeling of extra big tire shells properties. *The 81st Annual Scientific Conference of the International Association of Applied Mathematics and Mechanics (GAMM): Abstracts of Conference*, Karlsruhe, 22-26 March 2010 / Karlsruhe Institute of Technology, 2010. (1 page).

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

51. Gezentsvey E.I., Olevskiy V.I., **Volchok D.L.**, Olevskiy O.V. Calculation of the improved steel beams of buildings and structures of the mining and metallurgical complex. *Strength of Materials and Theory of Structures*. 2021. no. 106. P. 54–67. (**Web of Science**)

52. Семенець С.М., Насонова С.С., Олевський В.І., **Волчок Д.Л.** Управління проектною надійністю нафтових резервуарів. *Опір матеріалів і теорія споруд. Науково-технічний збірник*. 2019. № 103. С. 165–176 (**Web of Science**)

53. Petrenko V., Dikarev K., **Volchok D.**, Kuzmenko O. Evaluation of indoor temperature for various building envelopes damaged. *E3S Web of Conferences*. 2018. Vol. 32, no. 01019. P. 1–7 (**Scopus**)

54. Семенець С.М., Насонова С.С., **Волчок Д.Л.**, Вельмагіна Н.О. Забезпечення надійності нафтових резервуарів в період експлуатації. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. 2020. № 1. С. 99–110.

55. Petrenko V., **Volchok D.** An estimation of change of parameters of indoor microclimate during term of exploitation of building and engineering systems. *Revista*

Romana de Inginerie Civila. 2016. Vol. 7, no 1. P. 50–56. (**Copernicus**)

56. Березюк А., Дікарев К., **Волчок Д.**, Скокова А., Кузьменко О., Зайцев С. Удосконалення енергозберігаючого конструктивного вузла «балконна плита-зовнішня стіна-плита перекриття». *Теоретичні основи будівництва*. 2006. Т.14. № 2. С. 57–62.

57. Lykhachova O. **Volchok D.** Schmidt R. About the influence of the cut length on deformation and stability of the elastic circular cylindrical shells. *The XIII-th Symposium of Stability of Structures*, Zakopane, 17–21 September 2012 / Lodz University of Technology, Theoretical and Applied Mechanics Polish Society. Zakopane, 2012. P. 435–440.

Патенти:

58. Спосіб улаштування енергозберігаючого конструктивного вузла «балконна плита - зовнішня огорожувальна конструкція - плита перекриття»: Деклараційний патент 112913 Україна, МПК Е 04 В 1/74. заявл. 08.02.2016; опубл. 10.01.2017. Бюл. № 3. А.М. Березюк, К.Б. Дікарев, А.О. Скокова, О.М. Кузьменко, **Д. Л Волчок**, Д. Ю. Лісняк.

59. Спосіб улаштування енергозберігаючого конструктивного вузла «балконна плита- зовнішня стіна-плита перекриття» Деклараційний патент 97939 Україна, МПК Е 04 В 1/74. заявл. 03.11.2014; опубл. 10.04.2015. Бюл. № 7. К.Б. Дікарев, І.М. Матюшенко, **Д. Л Волчок**, О.М. Кузьменко, О. С. Камєнєв.

60. Амортизатор: Деклараційний патент 11922 Україна, МПК G06K 9/36. опубл. 16.01.2006. Бюл. № 1. Бондаренко Л.М., Волчок Л.М., **Волчок Д.Л.**, Руднєв І.Ю.

АНОТАЦІЯ

Волчок Д.Л. **Розвиток методів теорії нечітких множин в задачах будівельної механіки та оптимізації проектування конструкцій в умовах невизначеностей.** - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.23.17 - будівельна механіка (192 – Будівництво та цивільна інженерія) - Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, Міністерства освіти і науки України, Дніпро, 2024.

Дисертаційна робота присвячена теоретичному узагальненню і новому розв'язанню науково-прикладної проблеми щодо розробки інструментарію та узагальнених методів реалізації нових постановок задач моделювання, оптимального проектування, аналізу технічних систем та їх елементів в умовах різномірної невизначеності випадкової, нечіткої, неточної природи та їх комбінацій. За допомогою запропонованих методів отримані нові розв'язання задач будівельної механіки стержневих, оболонкових та континуальних систем, застосовуючи такі моделі невизначеного програмування як: нечітка модель очікуваного значення, модель з можливісними обмеженнями, модель нечіткого подійного програмування, моделі з різномірною невизначеністю нечітко-випадкового та випадково-нечіткого виду, модель неточної оптимізації, нечітка модель імітаційного програмування.

Ключові слова: м'які обчислення, нечіткі множини, неточні множини, оптимізація, метод динамічного програмування, метод Монте-Карло, стержневі системи, оболонки.

SUMMARY

Volchok D.L. Development of methods of the theory of fuzzy sets in problems of structural mechanics and optimization of the design of structures under conditions of uncertainty. - Qualifying scientific work on the rights of manuscript.

Thesis for obtaining the scientific degree of Doctor of Technical Science in the specialty 05.23.17 - Structural Mechanics (192 – Construction and Civil Engineering). - Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Dnipro, 2024.

The thesis is devoted to the theoretical generalization and new solution of the scientific and applied problem regarding the development of tools and generalized methods of implementing new modeling, optimal design and analysis problems of technical systems and their elements in conditions of heterogeneous uncertainty of a random, fuzzy, rough nature and their combinations. With the help of the proposed methods, new solutions to problems of structural mechanics of rod, shell and continuous systems were obtained, using such models of uncertain programming as: expected value model, chance-constrain programming, dependent-chance programming, models with heterogeneous uncertainty of fuzzy-random and random-fuzzy types, rough optimization model, fuzzy modeling.

Mathematical models of construction optimization and methods with proven effectiveness are used, such as the Monte Carlo method, the method of dynamic programming, and the method of local variations. Classical structural mechanics methods of calculation of rod, shell and continuous systems are also used.

The solutions of the problems of analysis and optimization of rod systems under conditions of data uncertainty are given. Solutions to test problems are provided, the positive experience of which will be further extended to more complex designs. For statically determinate beams, the application of a graphical method for optimal design in conditions of fuzzy information is shown. The problems of analyzing the influence of blurred initial data, unclear goals, and restrictions on the final result of the design of rod systems have been implemented. Appropriate methods have been developed for this. The influence of uncertainty in problems with a non-linear formulation is shown, namely the influence of a fuzzy compressive load on large deflections of flexible rods. On the basis of statically determinate complex and simple trusses, the problems of fuzzy modeling, modeling with fuzzy-random uncertainty were solved, and the search for optimal solutions under conditions of uncertainty was performed. An approach based on fuzzy modeling is also proposed for determining the reliability coefficient of trusses, calculations and comparisons with DBN are carried out. For systems such as statically indeterminate frames, the design and analysis of which requires the solution of a system of linear algebraic equations, a method of spreading fuzzy uncertainty to results has been developed and tested. For spring-type systems, the solution of a direct and dual problem are shown, estimates of the influence of the fuzzy initial data problem on the optimal project result are obtained.

The problems of optimization of isotropic shells under conditions of data uncertainty are considered. The models of chance-constrain programming and dependent-chance programming are considered. The method was developed, the results of numerical experiments were obtained. A graphical approach for finding optimistic and pessimistic

values of project parameters was tested. For an isotropic shell with unclear project parameters, a model of the problem was built, an appropriate method for solving similar problems was developed, and numerical experiments were conducted. The possibility of using such classic stochastic data as uncertainty for the problem of finding the maximum shell load is shown. The method is developed, the results of numerical experiments and a convergence test are given. The assessment of the maximum value of the force compressing the cylindrical shell in the conditions of three limit states and the problem of geometric parameters of fuzzy-random and random-fuzzy nature is also given. Methods were developed, numerical experiments were conducted.

The adaptation of soft computing methods to optimization problems of orthotropic shells was carried out. Two objects of research are considered. The first is a hinge supported circular cylindrical shell made of fiberglass, reinforced in two directions and loaded with compressive force. There are three limit states for local loss of stability, general loss of stability as a rod, and destruction of the structure under the action of the applied load. Problems of finding the compressive force and volume or mass of the shell for different types of uncertainty and models of uncertain programming were implemented. The second object of optimization is also a cylindrical circular shell, which is under the action of axial compressive force, external pressure and torque. A weight optimization was performed for it under the condition of stochastic and fuzzy uncertainty in the initial data. A multidimensional extremal problem with significantly nonlinear constraint functions was solved by the method of statistical tests. Fuzzy modeling of the assessment of the maximum value of the axial force was also carried out, with constant values of external pressure and torque and fuzzy geometric characteristics.

The real design of complex structures under conditions of data uncertainty was shown. Thus, the influence of the uncertainty of the parameters of the prestressed reinforced concrete beam, which is operated on the bridges of the city of Dnipro, on its deflection and amplitude of oscillations is considered. The assessment of the tolerance of such a complex system showed that even a small uncertainty in the frequency setting can cause the beam to collapse, i.e. the system turned out to be very intolerant to uncertainty.

The consideration of the possibility of applying the developed methods for the design of extra-large tires, which is a strategic direction for the development of the potential of our country, is given. The principle possibility of applying the developed modeling methods of this class of tires in conditions of uncertainties is shown; a new design of tire 40.00-57 was developed as a result of solving a nonlinear multi-criteria optimization problem using statistical modeling approaches and modal values of the initial data.

Key words: soft calculation, fuzzy sets, rough sets, optimization, dynamic programming method, Monte Carlo method, rod systems, shells.