

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ІВАНО-ФРАНКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ НАФТИ І ГАЗУ**



Копей Володимир Богданович

УДК 622.276.054:[004.89+004.94]

**НАУКОВО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ АВТОМАТИЗОВАНОГО
ПРОЕКТУВАННЯ ОБЛАДНАННЯ ШТАНГОВОЇ СВЕРДЛОВИННОЇ
НАСОСНОЇ УСТАНОВКИ**

Спеціальність 05.05.12 – машини нафтової та газової промисловості

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Івано-Франківськ – 2020

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
Петрина Юрій Дмитрович.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Яким Роман Степанович,
Дрогобицький державний педагогічний університет
імені Івана Франка, м. Дрогобич, професор кафедри
технологічної та професійної освіти;

доктор технічних наук, професор
Харченко Євген Валентинович,
Національний університет "Львівська політехніка",
м. Львів, завідувач кафедри опору матеріалів та
будівельної механіки;

доктор технічних наук, доцент
Горошко Андрій Володимирович,
Хмельницький національний університет,
м. Хмельницький, професор кафедри фізики і
електротехніки.

Захист відбудеться « 20 » листопада 2020 р. о 10 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 20.052.04 в Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу за адресою: 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15.

З дисертацією можна ознайомитися в науково-технічній бібліотеці Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу за адресою: 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15.

Автореферат розіслано « 19 » жовтня 2020 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 20.052.04,
доктор технічних наук, доцент



А. П. Джус

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Обґрунтування вибору теми дослідження. Застосування штангових свердловинних насосних установок (ШСНУ) є одним з найбільш поширених у світовій та вітчизняній практиці видобування нафти. Водночас обладнання ШСНУ працює в складних умовах і нерідко відмовляє. Основними факторами, які спричинюють відмови ШСНУ є дія складних циклічних навантажень на штангову колону (розтяг, стиск, згин і кручення) та її значні деформації, підвищений тиск в насосно-компресорних трубах (НКТ), важкодоступність свердловинного обладнання та його робота в умовах тертя ковзання і корозійного середовища. В окремих випадках до них додається підвищений вміст газу, наявність піску в продукції, смоло-парафінові утворення (СПУ), викривлені та похило спрямовані свердловини. Як засвідчує практика, найбільш складними відмовами ШСНУ є відмови її важкодоступної підземної частини, зокрема колони насосних штанг і свердловинного плунжерного насоса, що призводить до значних витрат часу та коштів. Тому основні дослідження потрібно спрямовувати на забезпечення працездатності свердловинного обладнання. Вказані проблеми часто намагаються вирішувати окремо, без системного підходу, що призводить до значних витрат. Наприклад для боротьби з СПУ застосовуються дорогі хімічні реагенти або теплові методи. Тоді як більш ефективним є застосування недорогих скребків-протекторів для насосних штанг (ШН) та штангообертача, які разом вирішують комплекс проблем: СПУ, зношування ШН і НКТ, а також згин, втому та самовідгвинчування ШН. Необхідне комплексне і ефективне забезпечення працездатності ШСНУ, яке спрямовано на вирішення множини проблем її працездатності з найменшими витратами та опирається на системний підхід.

Роботу ШСНУ достатньо глибоко дослідили вчені: Вірновський А. С., Пірвердян А. М., Адонін А. Н, Богомольний Г. І., Грузінов Я. А., Драготеску Н. Д., Белов І. Г., Мищенко І. Т. Івановський В. Н., Гіббс С. Г. Надійність свердловинного обладнання, зокрема колони ШН, досліджували: Баграмов Р. О., Вірновський О. С., Фаерман І. Л., Круман Б. Б., Протасов В. Н., Сулейманов А. Б., Уразаков К. Р., Копей Б. В., Тараєвський С. Й., Федорович Я. Т., Зубаіров С. Г. та інші вчені.

Сучасні досягнення імітаційного моделювання, автоматизованого проектування (CAD), аналізу даних, штучного інтелекту, теорії систем і системного аналізу (СА) уможливають побудову інформаційних систем для автоматизованого проектування та інформаційної підтримки життєвого циклу (ЖЦ) обладнання ШСНУ, за допомогою яких можна ефективно вирішувати ці проблеми на системному рівні. На даний момент дослідження в цьому напрямі не достатньо розвинено. Тому проблема ефективного дослідження та проектування обладнання комплексно-працездатної ШСНУ є актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційну роботу виконано у відповідності до програм науково-дослідних робіт: "Оптимізація параметрів різьбових з'єднань" (номер державної реєстрації 0110U002631), яку було профінансовано завдяки гранту Президента України для підтримки наукових досліджень молодих учених на 2009 рік; "Експертна система з проблем надійності і довговічності штангових свердловинних насосних установок з модулями

автоматизованого проектування та моделювання", яка фінансувалась стипендією Кабінету Міністрів України для молодих вчених; "Розробка наукових основ створення з'єднань з металополімерних композитних матеріалів та керування їх зносо-фрикційними та втомними властивостями" (номер державної реєстрації 0115U002279); "Експериментальні дослідження властивостей дослідних зразків бандажів нафтогазопроводів в умовах експлуатації" (номер державної реєстрації 0118U004335).

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є удосконалення методології автоматизованого проектування обладнання ШСНУ на основі системного підходу та її використання для комплексного та ефективного дослідження і забезпечення працездатності ШСНУ.

Досягнення поставленої мети вимагає вирішення наступних завдань:

1) розроблення принципів побудови робастних статистичних моделей відмов колон ШН на прикладі відмов колон в НГВУ "Долинанафтогаз";

2) розроблення принципів компонентно-орієнтованого моделювання ШСНУ та розроблення параметричних імітаційних моделей ШСНУ зі здатністю до простої модифікації та інтеграції в інформаційну систему;

3) розроблення множини параметричних геометричних і скінченно-елементних моделей (СЕМ) та прикладних САПР проблемних деталей та вузлів ШСНУ, які дозволяють системне дослідження їхньої працездатності, зокрема різьбових з'єднань (РЗ) ШН та НКТ, з'єднань склопластикових ШН, ШН і НКТ з дефектами та склопластиковими бандажами (БС), протекторів для ШН, клапана свердловинного насоса;

4) дослідження, на основі моделей, працездатності РЗ ШН та НКТ в умовах статичного та динамічного навантаження, у тому числі вібраційного, і розроблення принципів удосконалення та оптимізації їхньої конструкції;

5) дослідження, на основі моделей, працездатності елементів колон ШН і НКТ (пресових з'єднань склопластикових ШН, піделеваторного бурта ШН, ШН та НКТ з БС, протектора) та розроблення принципів удосконалення та оптимізації їхньої конструкції;

6) розроблення принципів побудови гнучкої бази знань, яка описує різні фактори, що впливають на надійність РЗ ШСНУ;

7) розроблення абстрактної моделі та принципів реалізації інформаційної системи для проектування обладнання та підтримки ЖЦ ШСНУ (далі – ІС), яка базується на множині моделей обладнання і володіє закономірностями складних систем.

Об'єкт дослідження – проектування обладнання ШСНУ.

Предмет дослідження – принципи побудови, інтеграції та використання компонентів інформаційної системи для автоматизованого проектування обладнання комплексно-працездатної ШСНУ.

Методи дослідження. У роботі застосовано добре відомі та перевірені:

– методи математичної статистики та індуктивного машинного навчання для прогнозування відмов колони ШН;

– метод граничного подання для геометричного моделювання обладнання ШСНУ;

- метод скінченних елементів (МСЕ) задач механіки деформівного твердого тіла та гідродинаміки для моделювання обладнання ШСНУ;
- методи обчислення циклічної довговічності за багатоосового напруженого стану для відносного порівняння різних конструкцій обладнання ШСНУ;
- основні положення лінійної механіки руйнування для прогнозування ресурсу деталей з втомними тріщинами;
- загальносистемні принципи та закони теорії систем для побудови абстрактної моделі ІС;
- об'єктно-орієнтований та мультиагентний підходи до побудови ІС;
- методи дедуктивного машинного навчання для створення баз знань, у якій різні фактори, що впливають на надійність обладнання, пов'язані причинно-наслідковими зв'язками;
- методи розрахунку навантажень, що діють на колони ШН, для побудови їхніх динамічних моделей;
- методи агентного та компонентно-орієнтованого акаузального моделювання складних динамічних систем для побудови моделей ШСНУ.

Вибір обраних методів зумовлений поставленими завданнями та доведеною їхньою ефективністю в САПР та інших інформаційних системах.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в розвитку методології автоматизованого проектування обладнання комплексно-працевдатної ШСНУ, яке опирається на принципи теорії систем та інтегровані в ІС імітаційні моделі обладнання, статистичні моделі відмов і бази знань. Зокрема:

- вперше, на основі міждисциплінарного аналізу закономірностей складних систем, розроблено ізоморфну до складних систем абстрактну модель ІС, яка шляхом дихотомічного ділення ЖЦ виробу виділяє класи функціональних елементів ІС, їхню ієрархію і відношення та є базою для реалізації ефективних ІС;
- набули подальшого розвитку принципи створення ІС, яка відрізняється тим, що належить до класів мультиагентних і гібридних систем, володіє закономірностями складних систем та здатністю до простого розширення та інтеграції гетерогенних компонентів;
- вперше розроблено модель ШСНУ, в якій для спрощення моделювання локальних явищ пружна багатосекційна колона ШН моделюється системою абстрактних автоматів мовою Python;
- вперше розроблено просту для модифікації компонентно-орієнтовану модель ШСНУ мовою Modelica та інтерфейс до неї мовою Python, яка основана на використанні стандартних компонентів "маса", "поступальна пружина з демпфером" і "поступальна сила" для побудови моделі багатосекційної пружної колони ШН;
- набули подальшого розвитку алгоритмічні основи та реалізація програмного каркасу для створення компонентно-орієнтованих акаузальних моделей динамічних систем, який є гнучким у застосуванні завдяки використанню мови загального призначення Python і опису компонентів різницевидами або диференціальними рівняннями засобами пакету SymPy, та розроблено моделі колон ШН на його основі;
- набули подальшого розвитку принципи побудови та використання параметричних моделей та прикладних САПР обладнання ШСНУ, які володіють здатністю до системного дослідження працевдатності обладнання, інтеграції в ІС,

простого розвитку та базуються на відомих системах CAD/FEA і розроблених автором програмних компонентах;

- досліджено та уточнено вплив конструкційних, технологічних і експлуатаційних параметрів свердловинного обладнання ШСНУ на його показники працездатності, зокрема, які характеризують його статичну та втомну міцність, герметичність та вібростійкість;

- вперше доведено ефективність застосування ансамблів дерев рішень для прогнозування частоти відмов колон ШН за статистичними промисловими даними про відмови.

Практичне значення отриманих результатів полягає в розробленні компонентів ІС та рекомендацій щодо удосконалення обладнання ШСНУ. Зокрема:

- розроблено методику побудови робастних статистичних моделей відмов колони ШН, яка дозволить ефективно ідентифікувати високоаварійні колони і їхні ділянки ще на етапі проектування та виявляти причини відмов;

- розроблено множину параметричних геометричних і скінченно-елементних моделей обладнання ШСНУ, які можуть інтегруватися в ІС: РЗ ШН і НКТ, з'єднань склопластикових ШН, БС для ШН і НКТ, протектора, клапана насоса, верстата-качалки (ВК), піделеваторного бурта ШН;

- запропоновано шляхи дослідження та удосконалення обладнання ШСНУ, оптимізації та раціонального вибору значень його параметрів. Зокрема за критеріями статичної та втомної міцності удосконалено конструкцію з'єднання склопластикового тіла з ніпелем, РЗ ШН, з'єднання порожнистих ШН, отримані залежності для вибору оптимального моменту згвинчування РЗ ШН та НКТ, виконано аналіз РЗ НКТ в умовах гармонічного високочастотного навантажування;

- створено базу знань з проблем надійності РЗ ШСНУ, у якій для подання знань використовується логіка предикатів і мова Python;

- інформаційна система підтримки ЖЦ ШСНУ, як відкрите програмне забезпечення, впроваджена в НГВУ "Долина нафтогаз" ПАТ "Укрнафта" з метою підвищення якості експлуатації ШСНУ та комплексного забезпечення її працездатності;

- основні результати роботи впроваджено у навчальний процес Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу для підготовки фахівців освітньо-кваліфікаційного рівня магістр за спеціальністю 131 "Прикладна механіка".

Положення, що виносяться на захист:

1. Розвиток методології автоматизованого проектування обладнання ШСНУ, що опирається на принципи теорії систем, використовує основу на Python інформаційну систему з гетерогенними елементами (база знань, статистичні моделі відмов, імітаційні моделі, результати симуляції та інші) та застосовується для комплексного та ефективного дослідження і забезпечення працездатності ШСНУ.

2. Розвиток методів комп'ютерного моделювання обладнання ШСНУ, які спрямовані на підвищення адекватності, спрощення використання, розвитку та інтеграції моделей, забезпечення можливості системного дослідження працездатності та оптимізації параметрів обладнання.

Особистий внесок здобувача. Результати роботи отримані автором самостійно. У працях, опублікованих у співавторстві, особисто автором: виконано аналіз відмов і виділено базові класи відмов колон ШН [4]; виконано моделювання та експериментальне дослідження напружень в трубах з БС [1, 3, 34] та теоретично обґрунтовано доцільність зміцнення і ремонту труб і ШН бандажами [7]; виконано моделювання РЗ ШСНУ [2, 21, 23, 24, 26, 29, 52, 54, 56] та елементів колон ШН і НКТ [32, 33, 48]; показано необхідність оптимізації моменту згвинчування РЗ ШН з подовженою зарізьбовою канавкою [9, 28]; запропоновано напрямки удосконалення конструкції протекторів [6]; виконано огляд конструкцій з'єднання склопластикової ШН [10]; запропоновано способи моделювання руху колони ШН за допомогою звичайних диференціальних рівнянь [16] та стандартних компонентів мови Modelica [19, 22, 46]; розроблено систему компонентно-орієнтованого моделювання мовою Python [22, 49]; розроблено принципи та побудовано базу знань [14, 17]; розроблено принципи побудови ІС для підтримки життєвого циклу РЗ ШСНУ [25, 55].

Апробація результатів досліджень. Основні результати роботи доповідалися і обговорювалися на: міжнародних наукових конференціях "Техніка і прогресивні технології у нафтогазовій інженерії" (2008, 2012, Івано-Франківськ), "Нафтогазова енергетика" (2009, 2013, 2017, Івано-Франківськ), "Прогресивна техніка і технологія" (2010, Київ), "Машини, обладнання і матеріали для нарощування вітчизняного видобутку та диверсифікації постачання нафти і газу" (2016, Івано-Франківськ), "Innovative ideas in science" (2017, Banja Luka, Bosnia and Herzegovina), "International Conference of Applied Science" (2018, Banja Luka, Bosnia and Herzegovina; 2019, Hunedoara, Romania), "Машини, обладнання і матеріали для нарощування вітчизняного видобутку нафти і газу" (2018, Івано-Франківськ), "Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange" (2019, Луцьк), "Прогресивні технології у машинобудуванні" (2019, Івано-Франківськ-Яремче), "Modern achievements of science and education" (2019, Netanya, Israel) та наукових семінарах кафедри нафтогазових машин та обладнання Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу (2019, 2020, Івано-Франківськ).

Публікації. За результатами досліджень, які викладені в дисертації, опубліковано 58 робіт. Основні наукові результати дисертації висвітлено у 26 наукових публікаціях, які розкривають основний зміст дисертації, з яких 19 – у наукових виданнях, включених до Переліку наукових фахових видань України; 7 – у наукових періодичних виданнях інших держав із напрямку, з якого підготовлено дисертацію; 5 – у закордонних виданнях, проіндексованих у базі даних Scopus (у тому числі 1 – у виданні, віднесеному до першого квартилю (Q1) відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank).

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з двох частин загальним обсягом 683 сторінки. Перша частина обсягом 428 сторінок (основний текст – 291 сторінка) містить вступ, шість розділів, висновки та список використаних джерел (378 найменувань) і включає 128 рисунків і 29 таблиць. Друга частина обсягом 255 сторінок містить 26 додатків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ

У вступі обґрунтовано актуальність обраної теми дисертаційної роботи, сформульовано мету та завдання дослідження, відображено наукове та практичне значення отриманих результатів.

У першому розділі розглянуто принципи функціонування ШСНУ, виконано аналіз умов роботи та відмов свердловинного обладнання ШСНУ: колони ШН, РЗ ШН, протекторів для ШН, колони НКТ, РЗ НКТ, свердловинних насосів. Більшість відмов ШСНУ пов'язана з поломками насоса, ШН або НКТ, що призводить до необхідності проведення тривалого і дорогого підземного ремонту свердловин.

Розглянуто основні види та причини відмов колони ШН та виділено базові класи відмов. Проаналізовано різні технологічні, конструктивні та експлуатаційні способи підвищення ресурсу колони ШН. На даний час не розвинуто методологію ефективного поєднання різних методів підвищення ресурсу для досягнення максимального системного ефекту. Виявлено переваги та проаналізовано варіанти конструкції пресового з'єднання сталевий головки зі склопластиковим тілом ШН. Конструкція протектора для ШН повинна бути оптимальною за критеріями мінімальної сили гідродинамічного опору, максимальної площі тертя зі стінкою НКТ, а також максимального крутного моменту навколо осі. Основними проблемами експлуатації стандартних муфтових РЗ ШН є їхні втомні поломки, самовідгвинчування, низька герметичність (для порожнистих ШН), спричинені недосконалою конструкцією та неоптимальним моментом згвинчування. Виконано аналіз способів зменшення нерівномірності навантажень в різьбі ШН без зміни параметрів профілю різьби. Виявлено перспективність двоопорних РЗ. Проаналізовано відмови НКТ, РЗ НКТ і способи підвищення їхнього ресурсу. Більшість відмов спричинені корозією і зношуванням колоною ШН та низькою герметичністю РЗ. Недослідженою є працездатність РЗ НКТ в умовах високочастотних вібрацій, які можуть виникати внаслідок ударних навантажень та інших порушень нормальної роботи ШСНУ; а також РЗ НКТ з високоміцних сталей, різьбу ніпелів яких нарізано некорегованим різцем з ненульовим переднім кутом, що спричиняє відхилення кута її профілю.

Проведений аналіз свідчить, що основними критеріями працездатності ШСНУ є корозійна стійкість свердловинного обладнання, статична та втомна міцність колони ШН, вібростійкість РЗ колон ШН та НКТ, герметичність НКТ та РЗ, зносостійкість та гідродинамічний опір протекторів, зносостійкість деталей насоса. Існує ряд основних факторів, які визначають працездатність ШСНУ і якими можна керувати без значних затрат часу і коштів. Зокрема перспективним є наступні рішення: удосконалення РЗ ШН комбінованими методами, яке можливе навіть без модифікації конструкції ніпеля; оптимізація моменту згвинчування; застосування склопластикових ШН та удосконалення їхніх з'єднань; дослідження роботи з'єднань в умовах циклічного та вібраційного навантаження; ремонт та зміцнення ШН і НКТ БС; оптимізація радіуса скруглення в зоні піделеваторного бурта, удосконалення конструкції протекторів; зменшення частоти ходів; експлуатація колони склопластикових ШН в білярезонансних режимах. Комбінації таких рішень на

різних етапах ЖЦ ШСНУ можуть створити системний ефект, суттєво та комплексно підвищити ресурс і ефективність роботи ШСНУ без значних витрат часу і коштів.

Статистичні моделі відмов колони ШН найбільш успішно можуть використовуватись тільки для подібних свердловин. Необхідно запропонувати саму методика побудови більш точних і робастних статистичних моделей, які не схильні до перенавчання. Основною проблемою застосування існуючих адекватних імітаційних моделей ШСНУ є складність їхньої модифікації під час удосконалення чи внесення інших змін. Це перешкоджає еволюції цих моделей. Можливими способами вирішення цієї проблеми є застосування компонентно-орієнтованого моделювання та моделювання на основі абстрактних автоматів. Виконано огляд можливостей комерційних і вільних систем CAD/FEA для моделювання обладнання ШСНУ, зокрема РЗ. Для досягнення системного ефекту під час дослідження та проектування обладнання ШСНУ важливим є можливість інтеграції в єдиній ІС різнотипних моделей та прикладних САПР, побудованих за допомогою цих CAD/FEA. Виконано огляд методів обчислення циклічної довговічності за результатами моделювання МСЕ, у тому числі деталей з тріщинами.

У зв'язку зі складністю предметної області ІС, їх потрібно відносити до класу складних систем. Тоді, відповідно до принципу ізоморфізму теорії систем, їм повинні бути властиві усі закономірності складних систем. Цей факт потрібно враховувати під час побудови САПР та ІС, а також їхніх абстрактних моделей, що відображають найбільш загальні, як правило якісні, характеристики ІС. Відомі дослідження та концептуальні моделі таких систем слабо акцентують увагу на цьому. На основі загальносистемних закономірностей необхідне розроблення принципів побудови ІС, яка орієнтована на просту реалізацію і використання та створена зручною мовою загального призначення. Компонентами ІС можуть бути параметричні імітаційні моделі ШСНУ та її частин, результати симуляції, статистичні моделі відмов, бази знань, машини логічного виведення та інші інформаційні ресурси. Усі компоненти ІС повинні бути зручними для створення та модифікації під час удосконалення чи внесення інших змін, мати здатність до еволюції та простої інтеграції в ІС. Моделі, що існують, не відповідають усім цим вимогам. Інтеграція гнучкої бази знань в ІС дозволить систематизувати знання, логічно обґрунтувати проектні рішення на різних етапах ЖЦ. З метою побудови ефективних САПР та ІС виконано огляд закономірностей складних систем, обґрунтовано архітектуру та мову програмування ІС, виконано огляд методів подання знань та можливостей мови Python для подання знань.

За результатами проведеного аналізу сформульовано мету роботи та основні завдання для її досягнення.

У другому розділі описано принципи побудови статистичних моделей відмов колон ШН на основі індуктивних методів самоорганізації моделей. Моделі розроблено на основі статистичних даних про відмови колон в НГВУ “Долинанаштогаз”. Ці дані являють собою таблицю, кожен рядок якої відповідає окремій відмові колони, а стовпчики містять наступні дані (параметри X): назва свердловини, рік і місяць відмови, діаметр плунжера свердловинного насоса *Pump*, довжина колони H , довжина секцій ШН різного діаметра ($H19$, $H22$, $H25$), глибина обриву колони H_0 , діаметр відмовленої ШН, тип відмови, газовий фактор *Gas*,

відсоток води в продукції *Water*, відсутність (*Paraffin=0*) або наявність (*Paraffin=1*) СПУ, відсутність (*Curv=0*) або наявність (*Curv=1*) викривленості свердловини, інтервал кривизни викривленої свердловини, продуктивність свердловини *Product*, приведенне напруження у верхній частині колони *Stress*.

Будували моделі у вигляді функції $f(h)$ – функції густини імовірності відмов для випадкової величини h – відносної глибини обриву (відношення глибини обриву колони до довжини колони). Функцію $f(h)$ шукали шляхом апроксимації поліномом значень $n_i/\Delta h$, де n_i – відносна частота відмов на інтервалі i колони з шириною Δh . З метою підвищення робастності та зменшення перенавчання моделей для пошуку найкращого полінома застосовували відомий індуктивний метод самоорганізації моделі – метод групового урахування аргументу. Як узагальнений критерій якості моделі вибрано лінійну комбінацію внутрішнього критерію, критеріїв регулярності та критерію незміщення. Для реалізації методу автором розроблено Python-програму. Моделі $f(h)$ отримано для типів відмов: обривів по тілу ШН, по тілу муфти, по різьбі ніпеля, зривів різьби муфти, зривів різьби ніпеля, відгвинчувань, відмов у свердловинах з СПУ і без них, відмов колон з насосами малого, середнього та великого діаметра. Для прикладу модель для усіх відмов колон без урахування відмов полірованого штока така:

$$f(h) = 0,58 + 7,54h - 20,46h^2 + 13,89h^3.$$

Крива цієї функції має S-подібний вигляд з двома мінімумами ($h=0$, $h=0,7$) і двома максимумами ($h=0,25$, $h=1$) та подібна на криві моделей, отриманих раніше методом найменших квадратів. Якщо провести горизонтальну лінію на рівні $f(h)=1$, то отримаємо три точки її перетину з кривою $f(h)$ з абсцисами 0,07, 0,5, 0,9. Ці точки ділять діапазон h на інтервали: $[0, 0,07]$, $[0,07, 0,5]$, $[0,5, 0,9]$, $[0,9, 1]$. Другий та четвертий інтервал має підвищені значення $f(h)$, тому під час проектування колони їх потрібно оснащувати деталями з посиленою конструкцією. Орієнтовні значення імовірності відмов в цих інтервалах, обчислені шляхом інтегрування $f(x)$: 0,05, 0,55, 0,3, 0,1. Значення імовірності відмов на інтервалах з підвищеною і пониженою густиною відмов були обчислені для кожного типу відмови.

Отримано також поліноміальні регресійні моделі виду $f(h, Pump)$, де $Pump$ – діаметр плунжера свердловинного насоса, f – функція густини імовірності відмов. Ці моделі отримано окремо для свердловин з СПУ, без СПУ та для усіх свердловин. Модель для всіх свердловин:

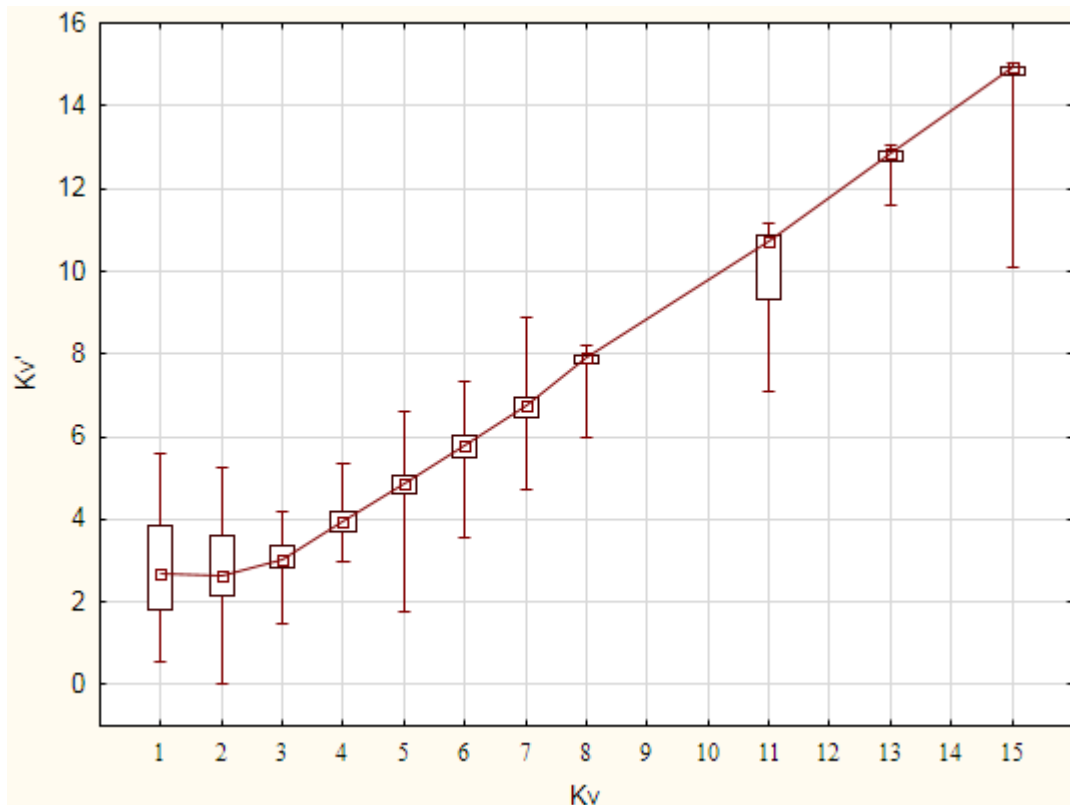
$$f = -0,27109 + 12,5111 h + 18,6381 h^3 - 28,9086 h^2 + 1,64308/(h \cdot Pump) - 14,02 h / Pump.$$

Модель дала змогу задовільно описати локальний мінімум $f(h)$ в зоні $h=0,1$ та локальний максимум біля $h=0$ для насосів малого діаметра. Їх можна пояснити такими факторами як максимальні напруження розтягу та максимум товщини захисного шару СПУ на колоні в зоні $h=0..0,1$. Ці моделі відповідають максимумам негативних факторів на інтервалах свердловини, підтверджують і доповнюють результати отримані автором та іншими авторами раніше.

Отримано багатовимірні поліноміальні моделі частоти відмов для задач класифікації та регресії. Якщо K_v – це кількість різнотипних відмов кожної установки за три роки, то ШСНУ з $K_v \leq 4$ віднесено до класу низькоаварійних

($Kv_{cat}=0$), а ШСНУ з $Kv>4$ – до класу високоаварійних ($Kv_{cat}=1$). Для усіх відмов побудовано поліноміальні моделі виду $Kv_{cat}=f(X)$, де Kv_{cat} – ознака аварійності свердловини; $X=\{Pump, Stress, Gas, Curv, Water, H, Product, Paraffin\}$ – множина параметрів моделі. Точність класифікації – 0,737. Точність можна підвищити до 0,9 шляхом застосування алгоритму класифікації "Випадковий ліс" на основі дерев рішень. Аналогічні регресійні моделі ($X=\{Pump, Stress, Curv, H25, Paraffin, Water\}$) з точністю 0,778 отримано для відмов полірованого штока. Найбільш статистично значущими факторами, які впливають на частоту відмов штока є: $H25, Curv, Paraffin, Stress, Pump$.

Обґрунтовано ефективність застосування методів ансамблів дерев рішень (випадкового лісу та градієнтного бустінга (підсилення) дерев регресії) для прогнозування частоти відмов колон ШН. Для моделювання використовували Python-пакет scikit-learn. Найкращі значення параметрів моделей шукали за допомогою функції для стохастичної оптимізації на основі генетичних алгоритмів differential_evolution з пакету SciPy. Виявлено, що моделі градієнтного бустінга володіють дещо вищою правильністю (0,89 для регресії та 0,94 для класифікації) та їх застосування дозволить ефективно ідентифікувати високоаварійні свердловини ще на етапі проектування (рис. 1). Найбільш статистично значущими факторами, які впливають на частоту відмов ШН, є: $Product, H, Gas, Stress$.



□ – медіана; прямокутник – 50%; відрізок – 98%

Рисунок 1 – Реальні Kv і прогнозовані Kv' значення частоти відмов для моделі GradientBoostingRegressor

Впровадження методики побудови статистичних моделей на виробництві дозволить швидко будувати складні, точні та робастні статистичні моделі відмов колон і виявляти причини відмов. Розроблені моделі $f(h)$ та $f(h, Pump)$ можна

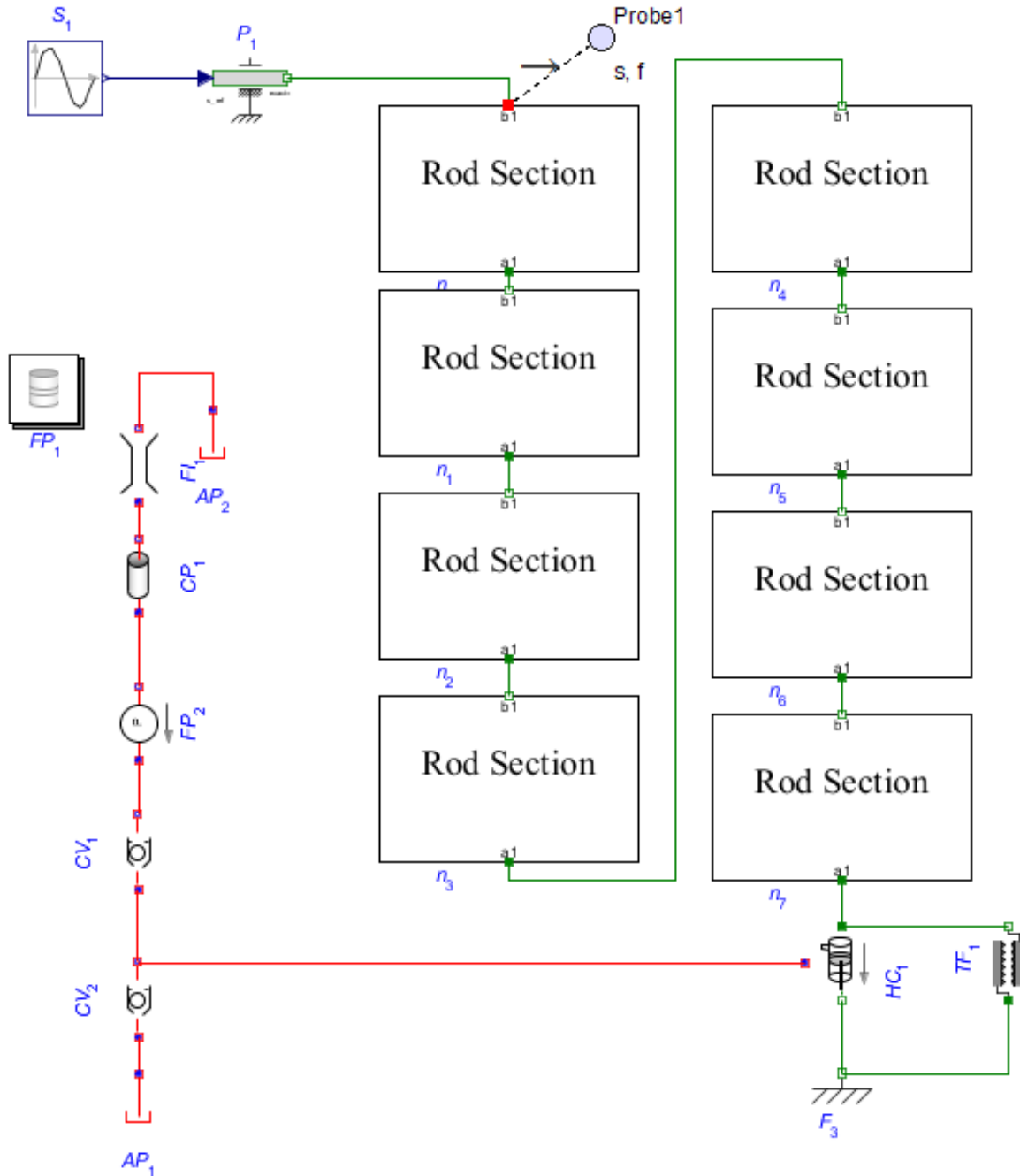
використати для наближеного визначення густини відмов та імовірності відмов у заданих інтервалах h і для обґрунтування зміцнення чи заміни ШН на цих інтервалах. Моделі $Kv=f(X)$ та $Kvcat=f(X)$ дозволять з високою імовірністю визначити клас аварійності ШСНУ на етапі проектування. Для підвищення точності моделей необхідно уважно ставитись до збору статистичних даних про відмови, збільшувати кількість параметрів моделі, які корелюють з частотою відмов, а також доповнити дані інформацією про колони без відмов у вказаний період.

У третьому розділі описані принципи компонентно-орієнтованого моделювання ШСНУ та розроблено параметричні імітаційні моделі ШСНУ, які володіють здатністю їхньої простої модифікації та інтеграції в ІС.

Розроблено модель ШСНУ, в якій пружну багатосекційну колону ШН побудовано на основі системи абстрактних автоматів. Окремий автомат являє собою уявний вузол колони, в якому зосереджено масу секції, її вагу та інші сили. Автомат володіє атрибутами та функцією переходу, яку призначено для зміни стану автомата після зміни значення змінної часу t . Атрибути-дані автомата: координата x , початкова координата, попередня координата $prevx$, гранична умова, зовнішня сила, вага секції знизу, верхній сусід, нижній сусід, початкова відстань до нижнього сусіда, коефіцієнт жорсткості секції знизу, коефіцієнт опору матеріалу секції знизу, маса секції знизу, прискорення a , швидкість v , попередня швидкість $prevv$, нев'язка eps , крок наближення координати dx , площа поперечного перетину секції знизу, об'єкт класу "система автоматів", секція знизу, кут відхилення свердловини від вертикалі біля автомата; атрибути-функції, які обчислюють: швидкість, прискорення, сили пружності секцій зверху і знизу, сили демпфування секцій зверху і знизу, силу інерції секції, силу інерції рідини (діє на плунжер), суму нормальних сил, силу тертя секції, силу гідродинамічного опору секції, суму сил на плунжері насоса. Для обчислення компонентів загального навантаження, які діють на колону ШН та плунжер насоса, використовували відомі формули. Окремому стану відповідає множина значень атрибутів автомата. Кожен автомат володіє інформацією про сусідні автомати зверху та знизу. Для обчислення швидкості та прискорення автомат запам'ятовує значення координати ($prevx$) і швидкості ($prevv$) для попереднього стану. Шляхом зміни x на $\pm dx$ алгоритм функції переходу намагається знайти стан, що відповідає рівновазі сил у вузлі відповідно принципу д'Аламбера. Урівноважений стан системи автоматів шукається для моменту часу t . Для цього функції переходу кожного автомата виконуються, поки сума нев'язок eps більша похибки розрахунку. Виконано симуляцію ШСНУ зі сталевими і склопластиковими колонами ШН. Розроблена автоматна модель ШСНУ є простою для розуміння та модифікації, відповідає концепції моделювання "знизу вверх", дозволяє моделювати явища, які важко сформулювати за допомогою диференціальних рівнянь, наприклад стохастичну поведінку або складні граничні умови чи накопичення пошкоджень. Програма, що реалізує модель, є виконаною в стилі автоматного програмування популярною мовою Python і не потребує спеціалізованих засобів моделювання чи сторонніх бібліотек та допускає паралельні обчислення. Програма використовує більше обчислювальних ресурсів, ніж відомі моделі на основі хвильового рівняння, тому наступним кроком досліджень є

оптимізація її алгоритму. Модель інтегрована в САПР ШСНУ, яка призначена для оптимізації параметрів ШСНУ.

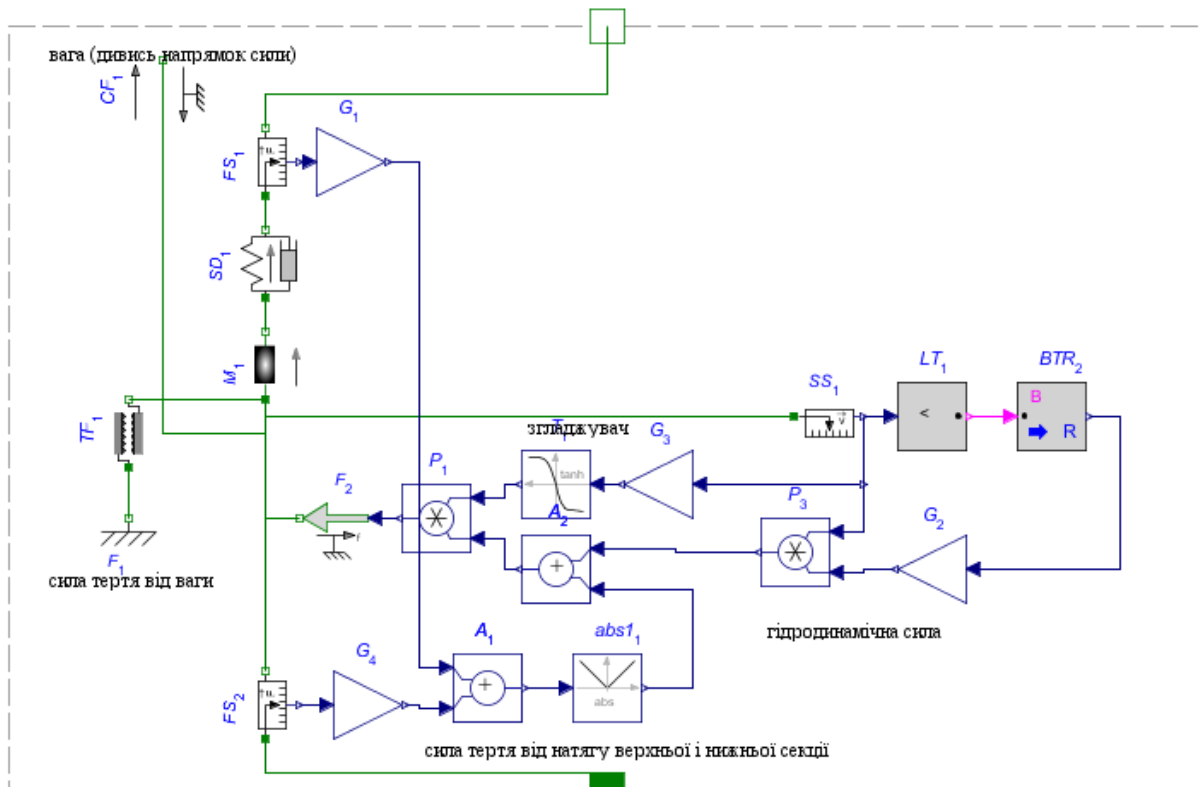
Запропоновано також принципи та розроблено компонентно-орієнтовану модель ШСНУ зі стандартними компонентами мови Modelica та інтерфейс до неї мовою Python для полегшення зміни значень параметрів моделі (рис. 2).



компоненти: S_1 – "синусоїдальний сигнал", P_1 – "переміщення", *Rod Section* – "секція колони", HC_1 – "гідравлічний циліндр" (насос), TF_1 – "тертя", F_3 – "нерухомий фланець", AP_1 – "тиск на прийомі насоса", AP_2 – "тиск у викидній лінії на гирлі", CV_1 , CV_2 – "зворотні клапани", FP_1 – "властивості рідини", FP_2 – "гідростатичний тиск в вертикальній трубі", CP_1 – "втрати тиску від тертя в трубі", FI_1 – "інерція рідини"

Рисунок 2 – Розширена модель ШСНУ без моделювання пружно-демпферної НКТ

Побудову компонентно-орієнтованої моделі ШСНУ слід починати з простих моделей пружної колони та гідравлічної частини. Базовими компонентами для побудови моделі пружної колони є поступальні одновимірні механічні компоненти "маса", "поступальна пружина з демпфером" і "поступальна сила". Для моделювання факторів, які розподілені нерівномірно вздовж колони, модель колони слід поділяти на підсистеми (секції), кожна з яких містить ці базові компоненти (рис. 3). У викривлених свердловинах для моделювання різних сил тертя найзручніше використовувати компоненти "поступальне тертя" та "поступальна сила". Для адекватного моделювання замість компонентів S_1 та P_1 може бути використана модель верстата-качалки [40]. Для симуляції руху НКТ, нижня частина якої не закріплена, потрібно між компонентами F_3 і HC_1 (рис. 2) додати поступальні одновимірні компоненти "Пружина-демпфер", що моделює пружно-демпферні властивості НКТ, та "Маса", що моделює її інерцію. Особливо це важливо для НКТ малого діаметра з низькою жорсткістю.

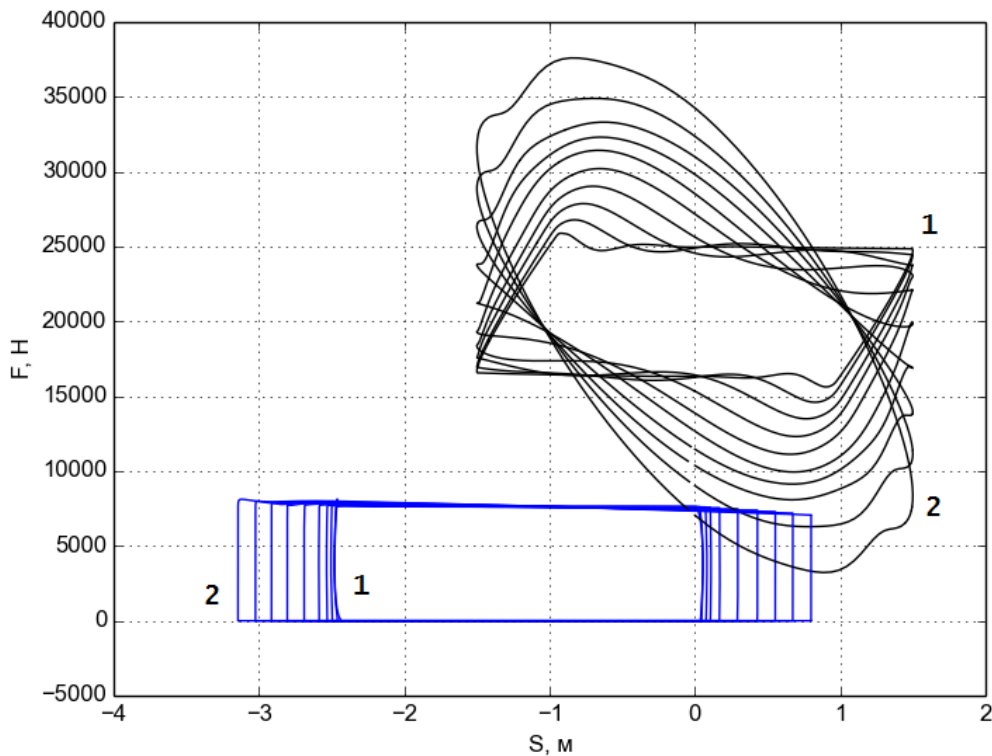


M_1 – "маса"; SD_1 – "пружина-демпфер"; CF_1 – "вага"; F_2 – "сила гідродинамічного опору і тертя"; F_1 , TF_1 – "тертя від ваги"; FS_1 , FS_2 – сенсори сили натягу верхньої та нижньої секції; G_1 , G_4 – добуток сил натягу і коефіцієнтів тертя; G_2 – множення на коефіцієнт гідродинамічного опору секції; A_1 , A_2 – суми; abs_1 – модуль, SS_1 – сенсор швидкості нижнього вузла секції; LT_1 , BTR_2 – генерують 1 (рух вниз) і 0 (рух ввверх); P_1 , P_3 – добутки; G_3 , T_1 – згладжують залежності сили від швидкості біля нуля

Рисунок 3 – Модель секції колони ШН (*Rod Section*)

Розроблена модель володіє достатньою для практичного використання адекватністю, що перевірено порівнянням з практичними динамограмами, та

можливістю простої її модифікації і удосконалення. Модель інтегровано в САПР ШСНУ для обґрунтування нових конструкторських та технологічних рішень, зокрема уточнення комплектування колони ШН, застосування склопластикових ШН, нових типів приводу або систем адаптивної зміни частоти обертання електродвигуна. Наприклад можна збільшувати частоту подвійних ходів в напрямку частоти власних коливань колони. Це призводить до зростання довжини ходу плунжера (рис. 4), але й до зростання навантажень. Можлива оптимізація частоти за цими критеріями. За допомогою моделі виявлено значне зростання циклічних навантажень розтягу в ШН і циклічного внутрішнього тиску в НКТ в умовах СПУ. Можливими напрямками удосконалення цієї моделі є: модель руху пружної колони НКТ, змінна по глибині в'язкість рідини, уточнення моделі клапанів насоса, уточнення моделі тертя ШН зі стінками НКТ.



зліва внизу – плунжерні динамограми, справа вверху – гирлові

Рисунок 4 – Симуляція колони з склопластиковими (50%) ШН для діапазону частот подвійних ходів від 0,03 Гц (криві 1) до 0,3 Гц (криві 2)

На базі Abaqus/CAE розроблено параметричну гідродинамічну СЕМ кульового зворотного клапана свердловинного штангового насоса, яка призначена для автоматизованого отримання залежностей коефіцієнта витрати клапана від висоти підйому кульки і уточнення моделей клапана в динамічних моделях ШСНУ, зокрема в описаних вище. Особливістю розробленої моделі є можливість автоматизованого звернення до неї за результатами моделювання з зовнішніх програм.

Розвинуті алгоритмічні основи та розроблені класи програмного каркасу мовою Python (пакет rucodyn), які дозволяють створювати подібні на Modelica акаузальні моделі без необхідності вивчення та застосування спеціалізованих мов

моделювання. Компоненти описуються класами Python, які структурно схожі на класи Modelica (табл. 1) і мають такі атрибути: постійні параметри та символи відомого пакету SymPy (аналоги параметрів і змінних у Modelica), символічні рівняння SymPy (різницеві або диференціально-алгебраїчні (DAE)), піни (фланці) для з'єднання компонентів (аналоги коннекторів у Modelica). В таблиці 1 `Translational1D`, `Transl` – це базові класи; `name` – назва компонента; `eqs` – список рівнянь; `pins` – список фланців; `flange_a`, `flange_b` – фланці; `m` – маса; `x`, `s` – переміщення; `v` – швидкість; `a` – прискорення; `f1`, `f2`, `f` – сили на фланцях; `Dx`, `Dv`, `der(s)`, `der(v)` – похідні. Динамічна система, що складається з компонентів, також описується класом Python, атрибутами якого є списки компонентів та рівнянь (разом з додатковими рівняннями для з'єднання компонентів). Якщо динамічна поведінка компонентів описується різницевими рівняннями, тоді користувач повинен описати ці рівняння в класі, замінивши похідні вибраною різницевою схемою (наприклад методом Ейлера). Початкові умови підставляються у ці різницеві рівняння, а невідомі знаходяться шляхом розв'язування системи нелінійних рівнянь на кожному кроці або за допомогою функції, яка на початку обчислень утворюється функцією `lambdify` пакету SymPy (що переводить вираз SymPy в еквівалентну числову функцію), і обчислень невідомих значень на поточному кроці за відомими значеннями попереднього кроку без необхідності розв'язувати рівняння. На кожному кроці оператор `if` перевіряє наявність дискретних подій, які залежать від стану чи часу. Під час обробки подій початкові умови, компоненти або рівняння можуть бути змінені. Якщо динамічна поведінка компонентів описується DAE, то використовується відомий інтерфейс `Assimulo` до розв'язувачів DAE, який має ефективну процедуру обробки розривів. Пакет SymPy дозволяє довільну маніпуляцію рівняннями моделей та генерацію коду. Можна розв'язувати деякі алгебраїчні або диференціальні рівняння аналітично.

Таблиця 1 – Порівняння класів поступального одновимірного механічного компонента `Mass` ("маса") в `ruscodyn` (ліворуч) та в `Modelica` (праворуч)

<pre>class Mass(Translational1D): def __init__(self, name, m=1.0, x=None, v=None, a=None, f1=None, f2=None, Dx=None, Dv=None): Translational1D.__init__(self, name, locals()) self.eqs=[Eq(self.m*self.a,self.f1+self.f2), Eq(self.a, self.Dv), Eq(self.v, self.Dx)] self.pins=[dict(x=self.x, f=self.f1), dict(x=self.x, f=self.f2)]</pre>	<pre>model Mass extends Transl; parameter Real m(start=1); Real s; Real v(start=0); Real a(start=0); equation m*a=flange_a.f+flange_b.f; a=der(v); v=der(s); flange_a.s = s; flange_b.s = s; end Mass;</pre>
--	--

Наприклад для симуляції вільних коливань колони ШН можна розробити її односекційну модель, яка містить два поступальні механічні компоненти – "пружину-демпфер" `s1` та "масу" `m1`:


```

from rucodyn import *
s1=SpringDamper(name='s1', c=44650.0, d=2120.7) # «пружина-демпфер»
m1=Mass(name='m1',m=3961.0) # «маса»
peqs=s1.pinEqs(1,[m1.pins[0]]) # додаткові системоутворюючі рівняння
s=System(els=[s1,m1], eqs=peqs) # система - модель колони ШН

```

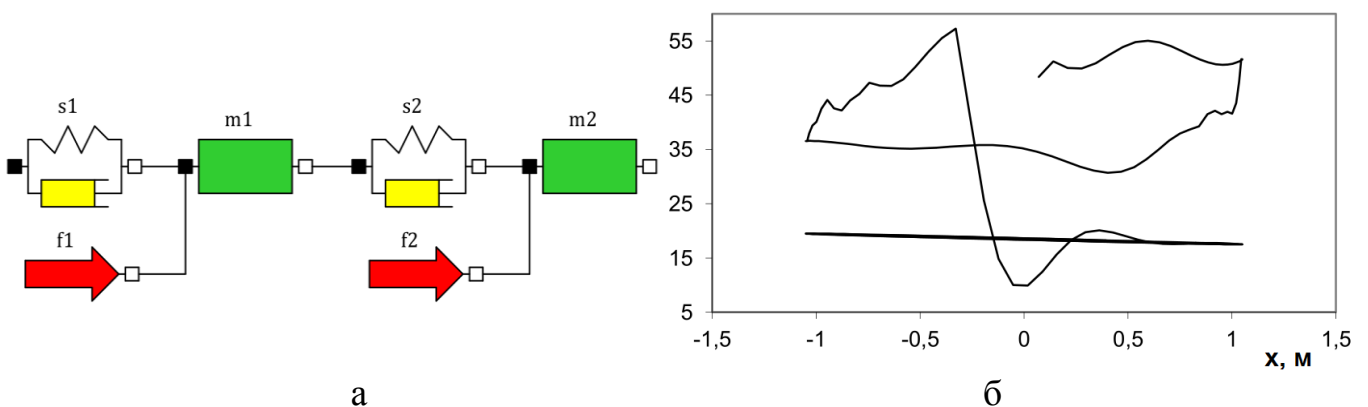
де m – маса (кг), c , d – коефіцієнти жорсткості (Н/м) і демпфування (Н·с/м). Програма генерує список різницевих рівнянь (використано метод Ейлера) цієї моделі у форматі SymPy:

```

[s1_c*(-s1_x1 + s1_x2) + s1_d*s1_vrel == s1_f2, -s1_f2 == s1_f1,
s1_vrel == -(s1_x1 - s1_x1p)/dt + (s1_x2 - s1_x2p)/dt,
m1_a*m1_m == m1_f1 + m1_f2, m1_a == (m1_v - m1_vp)/dt,
m1_v == (m1_x-m1_xp)/dt, s1_x2 == m1_x, s1_x2p == m1_xp, s1_f2 == -m1_f1],

```

де символи на початку змінної означають назву компонента, символи в кінці – його параметри (переміщення x , швидкість v , відносна швидкість $vrel$, прискорення a , сила f та ін.). dt – це крок часу. Символ p позначає значення в момент часу $t-dt$. Числовий індекс в кінці – номер фланця компонента. Перші три рівняння описують поведінку $s1$, наступні три – поведінку $m1$, останні три є системоутворюючими. Запропонований підхід спрощує розуміння системи, її модифікацію та вдосконалення, адаптацію для інших потреб, робить її доступною для значно більшої спільноти, спрощує інтеграцію в ІС. Використання різницевих рівнянь та модуля `rucodyn` дозволяє спростити реалізацію гібридного моделювання, моделювання систем змінної структури (рис. 5) та вимоги до модулів для символічної математики та для розв’язування рівнянь. Він також добре підходить для експериментів з різними можливостями моделювання. Порівняння результатів моделювання руху колон ШН із практичними динамограмами та результатами моделювання мовою Modelica підтверджують адекватність моделей. На основі схожих принципів розроблено кінематичну модель верстата-качалки.



а) – схема моделі: $s1$, $s2$ – "пружина-демпфер"; $m1$, $m2$ – "маса"; $f1$, $f2$ – "сила";
 б) – динамограма (кН) з симуляцією обриву другої секції ($s2$, $m2$, $f2$)

Рисунок 5 – Модель двосекційної колони ШН з поступальними компонентами

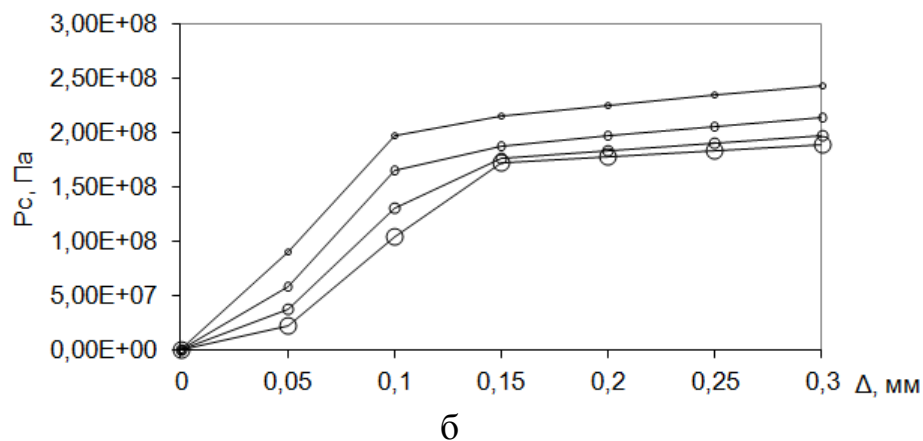
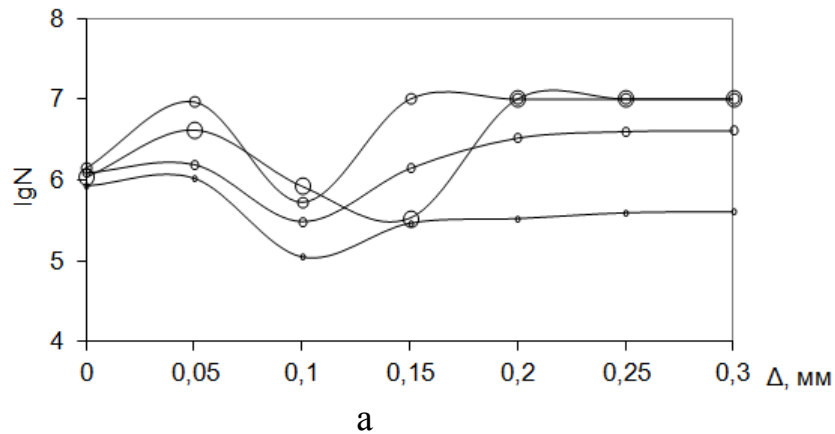
Розроблена тривимірна параметрична модель верстата-качалки, яка складається з параметричних моделей деталей та вузлів для SOLIDWORKS та відповідних класів мовою програмування Python, в яких описуються та розраховуються параметри цих моделей. Це дозволяє легко перебудовувати модель у разі зміни значень її параметрів, а також інтегрувати цю модель в ІС. Модель подібна на об'єкт моделювання геометричними, інерційними і жорсткісними властивостями, є зручнішою у використанні, ніж відповідні математичні аналітичні моделі, та призначена для удосконалення конструкції верстатів-качалок та оптимізації їхніх параметрів.

У четвертому розділі розроблено принципи побудови та створено параметричні геометричні моделі та СЕМ РЗ свердловинного обладнання ШСНУ, які володіють здатністю інтегруватися в ІС. Проаналізовано їхній напружено-деформований стан, запропоновані шляхи удосконалення за критеріями статичної та втомної міцності, а також герметичності.

Запропоновано принципи побудови та використання параметричних СЕМ РЗ на основі CAD/FEA – комерційних (Abaqus/CAE, її інтерфейсу прикладного програмування та fe-safe) і вільних (PythonOCC, Gmsh, CalculiX), та розроблено параметричні СЕМ РЗ ШСНУ (муфтового РЗ ШН, замкового РЗ, муфтового РЗ НКТ). Принципи полягають у застосуванні розроблених автором програмних каркасів з алгоритмами, функціями, класами та об'єктами мовою Python для створення та використання елементів осесиметричних або тривимірних СЕМ РЗ та прикладних САПР РЗ. Зокрема для розмірних параметрів, геометричних моделей, створених на основі параметричних ескізів, які будуються автоматизовано або вручну, або на основі паралельного перенесення та обертання простих фігур (багатокутник зі скругленнями та фасками) і булевих операцій над ними, нелінійних моделей матеріалів, моделей контакту, граничних умов, навантажень, скінченно-елементної сітки, input-файлів для розв'язувача, для отримання та оброблення результатів симуляції. СЕМ мають можливість автоматичної перебудови, симуляції та збереження результатів для різних значень параметрів. Моделі описуються мовою Python, є гнучкими для удосконалення і модифікації та володіють можливістю інтеграції в ІС. Моделі дозволяють автоматизовано виконувати ґрунтовний різносторонній аналіз та оптимізацію РЗ, підвищити продуктивність та якість проектування їхніх нових типів.

Досліджено вплив параметрів РЗ ШН (величини згвинчування, довжини зарізьбової канавки, кроку різьби, кута зрізу перших витків різьби муфти, кута профілю різьби ніпеля, радіуса впадин різьби ніпеля, зовнішнього діаметра різьби ніпеля, внутрішнього діаметра різьби муфти) на розподіл еквівалентних напружень у западинах витків різьби ніпеля. Виявлено залежності еквівалентних напружень від величини радіусів скруглення зарізьбової канавки РЗ ШН. Вибір оптимальних геометричних параметрів муфтового РЗ ШН дозволяє зменшити величину еквівалентних напружень в небезпечних зонах на 10...20%. Досліджено залежності напружень в муфтовому РЗ ШН від характеристик матеріалів деталей РЗ. Зі збільшенням границі плинності сталі ніпеля напруження в небезпечних зонах РЗ зростають. Підвищується нерівномірність розподілу навантажень по витках різьби ніпеля, особливо під час малих зовнішніх навантажень. Підвищення границі

плинності сталі муфти майже не впливає на напруження в небезпечних зонах ніпеля, проте підвищуються напруження в останній робочій западині муфти. Розроблено методику та отримано залежності для визначення оптимальної величини згвинчування Δ (видовження ніпеля або скорочення муфти під час згвинчування) РЗ ШН за критеріями втомної міцності Брауна-Міллера (рис. 6) та Сайнса. Для підвищення втомної міцності РЗ необхідним є збільшення довжини зарізьбової канавки L мінімум на 20 мм, що вимагає збільшення оптимальної величини згвинчування Δ з 0,15 мм до 0,25..0,3 мм (рис. 7).



○ – $L=15$ мм; ○ – $L=25$ мм; ○ – $L=35$ мм; ○ – $L=45$ мм

Рисунок 6 – Залежності логарифму циклічної довговічності $\lg N$ (а) та контактного тиску на упорному торці P_c (б) від Δ для циклу навантаження розтягу, що створює напруження в тілі ШН $\sigma_p=0\dots 170$ МПа

На основі FreeCAD (вільна САПР з геометричним ядром Open CASCADE) та її інтерфейсу програмування мовою Python розроблена система геометричного моделювання різьб з відхиленнями (у тому числі технологічними). Для симуляції різних похибок обробки в програмі є можливість зміни значень геометричних параметрів заготовки і різця та параметрів траєкторії переміщення різця відносно заготовки. Система має можливість побудови 3D та 2D геометричних моделей РЗ з відхиленнями, а з додатковим програмним забезпеченням для скінченно-

елементного аналізу – обґрунтування допусків РЗ і оптимізації геометричних параметрів.

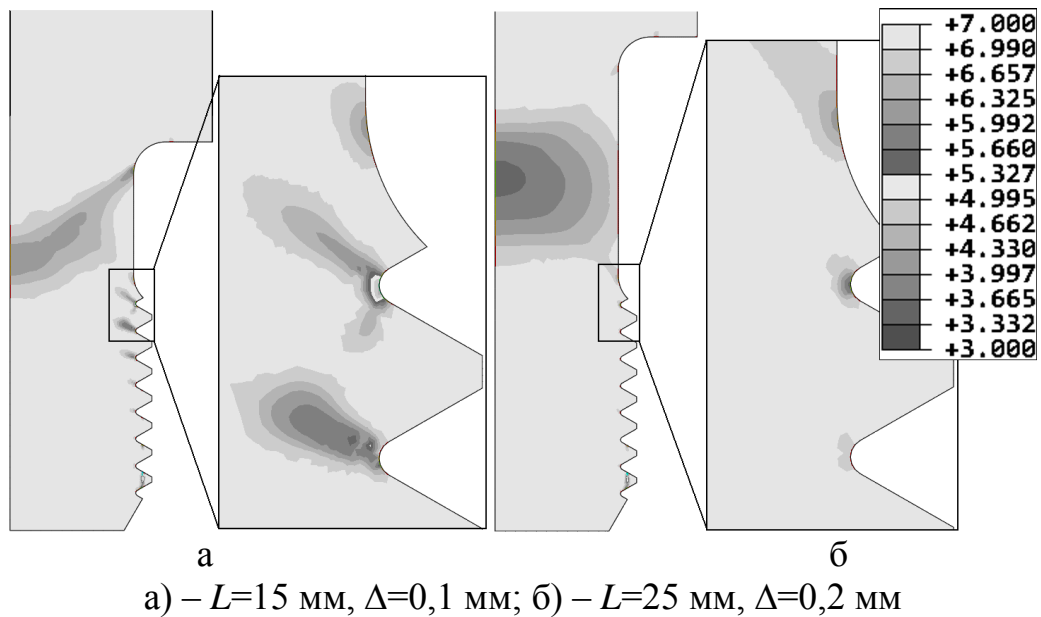


Рисунок 7 – Розподіл логарифму циклічної довговічності в ніпелі ШН для циклу $\sigma_p=0\dots340$ МПа

За допомогою цієї системи та CalculiX виявлені регресійні залежності контактних тисків в різьбі ШН $P_c(N, d)$, де d – це максимальний діаметр різьби ніпеля, N – номер витка різьби. Показано використання цих залежностей для обґрунтування допустимих значень d . З залежностей для РЗ штанг 19 мм виявлено, що менші за 26,2 мм значення d є причиною різкого збільшення контактних тисків і різкого зменшення коефіцієнта запасу втомної міцності D .

Також виявлено, що від'ємні значення відхилень кута профілю різьби муфти дещо зменшують значення напружень і збільшують значення D в першій (зі сторони зарізьбової канавки) навантаженій западині різьби ніпеля. Контактні тиски зростають в зоні мінімального діаметра різьби муфти. Додатні значення, навпаки, різко зменшують значення D в першій западині різьби ніпеля, але майже не змінюють еквівалентні напруження в ній.

Додатні значення величини зменшення кроку різьби муфти на кожному витку (починаючи з першого) Δp є причиною різкого зменшення значень D внаслідок нерівномірного навантаження на витки (рис. 8). Від'ємні значення, навпаки, вирівнюють навантаження в різьбі (рис. 8б), дещо зменшують напруження в першій навантаженій западині ніпеля та дещо зменшують зону з від'ємними значеннями D (рис. 8а). Значення напружень на рисунках отримані для максимального допустимого навантаження розтягу.

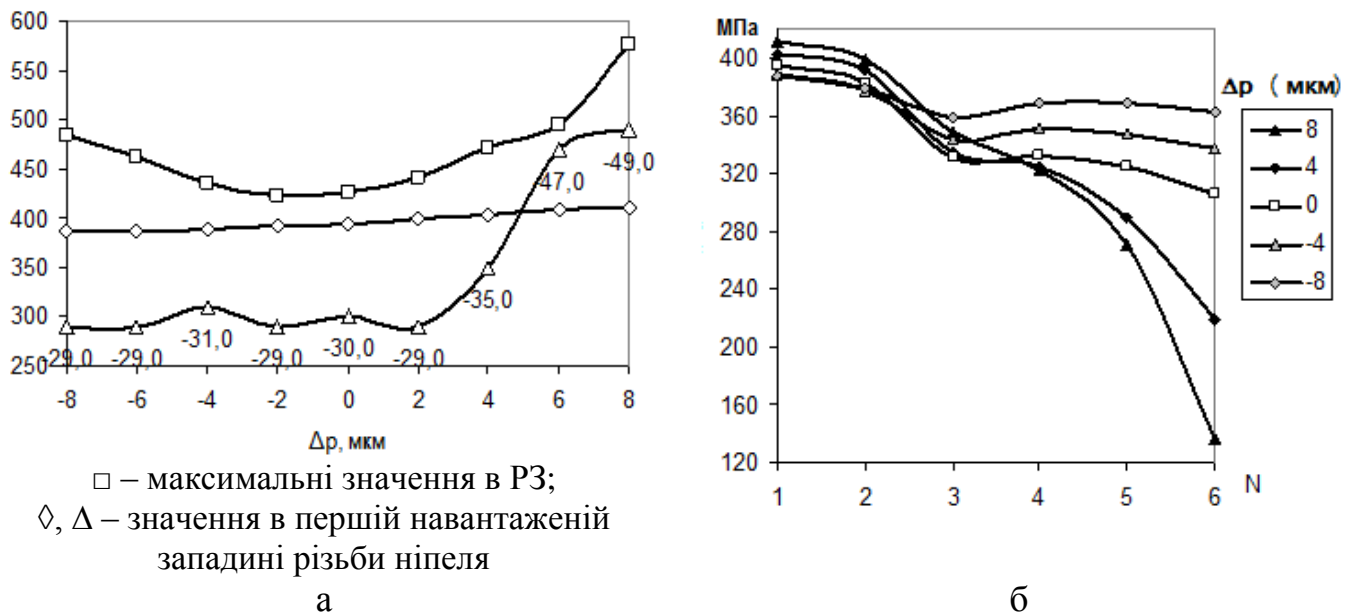


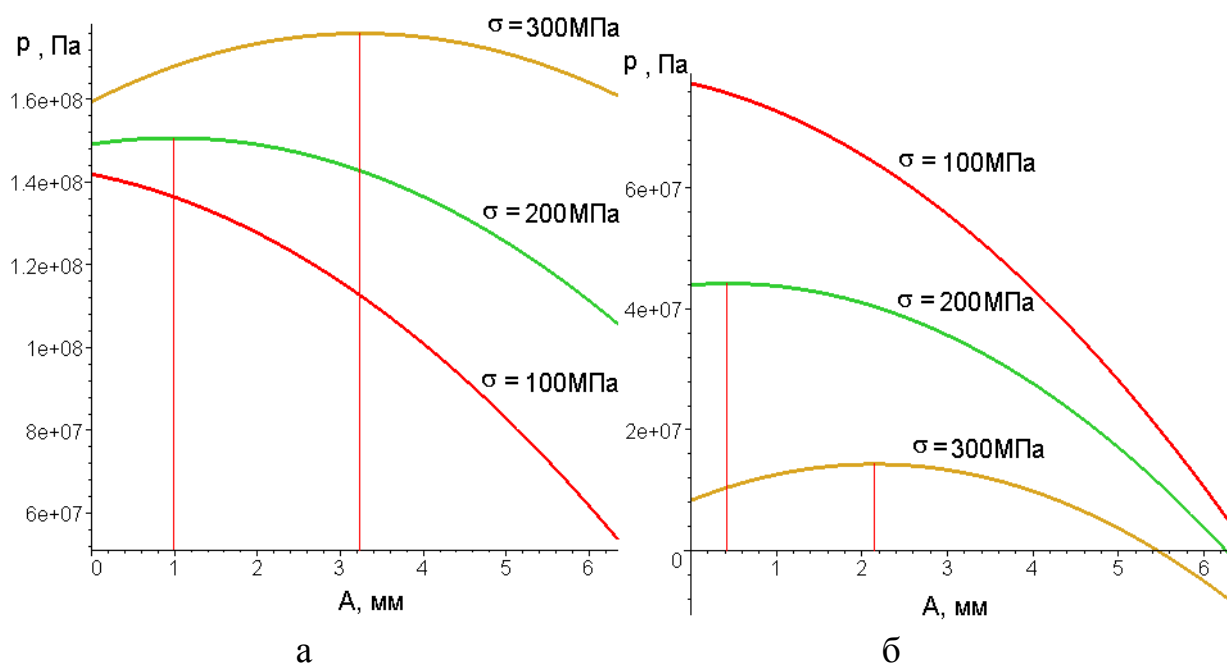
Рисунок 8 – Залежності еквівалентних напружень (МПа) (□, ◇) і коефіцієнта запасу D (Δ) від Δp (а) та значення еквівалентних напружень (МПа) в западині N різьби ніпеля для різних значень Δp (мкМ) (б)

Отримано залежності для визначення оптимальної величини згвинчування Δ замкового РЗ, яке розглядали як альтернативу стандартному для з'єднання порожнистих ШН. Збільшення Δ і застосування муфти з більш пластичного матеріалу дещо вирівнює напруження у впадинах різьби ніпеля, але й майже не змінює їх у перших впадинах. Виявлено, що зменшення границі плинності сталі муфти з 500 до 300 МПа вимагає збільшення оптимальної величини згвинчування Δ з 0,16 до 0,23 мм та призводить до підвищення втомної міцності з'єднання. Виявлено, що у порівнянні зі стандартним РЗ ШН замкове РЗ характеризується вищою концентрацією напружень та меншою циклічною довговічністю внаслідок відсутності зарізьбової канавки.

Заснована на параметричному геометричному моделюванні та МСЕ, що реалізовані у SOLIDWORKS, ітеративна методика проектування дозволила підтвердити доцільність застосування двоопорних РЗ для порожнистих ШН та удосконалити їхню конструкцію. Завдяки двом опорам, модифікованим зарізьбовим канавкам з еліптичним профілем, корекції першого витка різьби ніпеля та оптимізації натягів удосконалене двоопорне РЗ має більшу міцність під час згину, кручення та стиску, вищий опір до самовідгвинчування та герметичність, характеризується більш рівномірним розподілом навантаження на витки та більшою втомною міцністю у порівнянні зі стандартним. Коефіцієнт запасу втомної міцності за критерієм Сайнса D збільшено в зоні першого витка ніпеля на 13..14, в зоні останнього витка муфти на 2,6..4, в зоні зарізьбової канавки ніпеля на 0..0,4. Застосування пружного елемента на додатковій опорі дозволило збільшити допуск натягу на ній до 0,2 мм, що робить непотрібним контроль натягу перед згвинчуванням. Навіть після пошкодження пружної частини та втраті натягу на додатковій опорі РЗ буде міцніше за стандартне. У разі ремонту ШН удосконалені ніпелі володіють здатністю до простого впровадження шляхом приварювання їх до

тіла. Існує також можливість впровадження двоопорних циліндричних РЗ без значної модифікації стандартного ніпеля.

Виконано аналіз напружено-деформованого стану СЕМ РЗ НКТ, згвинченого з різними натягами A ($A=0$ – на верстаті, $A>0$ – вручну). Запропоновано методику та отримано залежності для визначення оптимального натягу муфтового РЗ НКТ з умовним діаметром 114 мм (ГОСТ 633-80) за критерієм максимальної герметичності для різних значень зовнішнього навантаження розтягу, яке зумовлює напруження σ в тілі труби (рис. 9).



а) – робочі (навантажені) сторони; б) – неробочі сторони

Рисунок 9 – Теоретична залежність середнього контактного тиску p на сторонах витків різьби ніпеля від величин A і σ

Обґрунтовано можливість застосування РЗ НКТ, різьба ніпеля яких має відхилення кута профілю внаслідок нарізання некоригованим різцем з від'ємним переднім кутом -10° . Застосування такого значення кута підвищує технологічність обробки високоміцних сталей. Втомна міцність такого РЗ маже не змінилася, але для запобігання появи зазорів в РЗ різьба муфти повинна бути нарізана з врахуванням різниці кутів профілю ніпеля і муфти.

Гармонічний аналіз СЕМ замкового РЗ та РЗ НКТ показав можливість втрати герметичності та втомного руйнування РЗ під час високочастотного навантажування (7-15 кГц). Розроблено методику аналізу та виконано аналіз відклику СЕМ згвинченого вручну муфтового РЗ НКТ умовним діаметром 114 мм за ГОСТ 633-80 на гармонічне зовнішнє осьове навантаження частотами 0..20 кГц. Наближений аналіз РЗ за допомогою процедур лінійного збурення Abaqus/Standard дозволив отримати орієнтовні значення власних частот в діапазоні 0..20 кГц та значення контактного тиску на робочій стороні профілю в середній частині РЗ як функцію частоти. Уточнений неявний динамічний аналіз РЗ з прямим інтегруванням

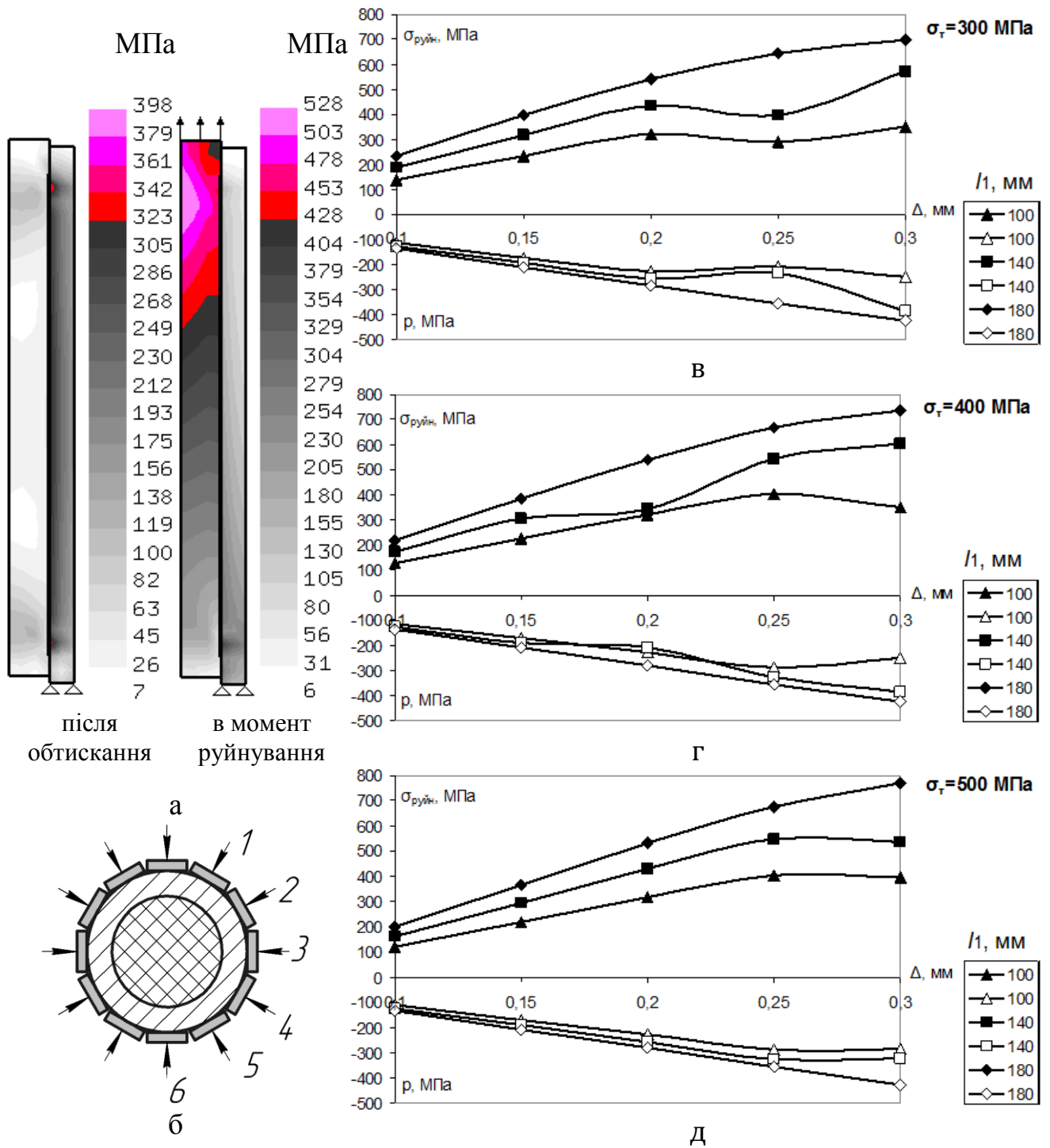
дозволив врахувати нелінійну поведінку матеріалу і тертя контактних поверхонь під час гармонічного осьового навантажування. Аналіз показав, що зменшення коефіцієнта тертя між поверхнями контакту до 0,01..0,04 може підвищити схильність РЗ до резонансу в околі частоти 8754 Гц. Результати показують можливість порушення герметичності та втомного руйнування РЗ внаслідок резонансу за певних умов і дозволяють обґрунтовувати допустимі границі частот експлуатаційного гармонічного навантаження.

У п'ятому розділі створено параметричні СЕМ елементів колони ШН і НКТ та розроблено принципи їх побудови та аналізу. Проаналізовано їхню працездатність за допомогою МСЕ, запропоновано шляхи удосконалення конструкції за різними критеріями, зокрема критеріями статичної та втомної міцності.

Розроблено принципи побудови САПР пресового з'єднання тіла склопластикової ШН зі сталеву головою. САПР базуються на осесиметричних СЕМ з'єднання в системах Abaqi/CAE і CalculiX та на програмах мовою Python для автоматизації перебудови моделі та симуляції. Моделі враховують пластичність сталі головки, ортотропію механічних характеристик склопластику, контакт між тілом і головою, дозволяють симулювати процес обтискання головки жорсткими штампами довільної форми. За допомогою розроблених САПР отримано розподіли напружень (рис. 10а) і контактного тиску в різних варіантах з'єднання та залежності для визначення оптимальних параметрів з'єднання за критерієм його статичної міцності. Розроблені САПР володіють можливістю різностороннього аналізу з'єднань такого типу – оптимізації параметрів, розрахунку втомної міцності, аналізу міцності з'єднання для різних механічних характеристик матеріалів.

Розроблено методикку побудови та побудовано залежності напруження руйнування з'єднання $\sigma_{руйн}$ і середнього контактного тиску в з'єднанні під час обтискання p від глибини переміщення штампів Δ для різних значень довжини обтискання головки l_1 і границі плинності сталі σ_m (рис. 10в-д). Аналіз таких залежностей дозволяє вибрати оптимальні параметри з'єднання – глибину переміщення штампів, границю плинності сталі, довжину обтискання. Осесиметричні та тривимірні СЕМ з'єднання показали, що для запобігання утворення зазорів в з'єднанні необхідно віддавати перевагу одночасному обтисканню циліндричної поверхні з усіх сторін шістьма парами (рис. 10б) хвилястих вздовж штампів або забезпечити таку хвилястість внутрішньої поверхні ніпеля.

Високочастотні вібрації можуть виникати після ударних навантажень на головку ШН та у разі різноманітних порушень нормальної роботи установки. Гармонічний скінченно-елементний аналіз пресового з'єднання в Abaqus/CAE дозволив виявити його перші дві власні частоти (8039,6 Гц та 18944 Гц) та отримати амплітудно-частотні характеристики в околі цих частот. Виявлено, що осьове навантажування з'єднання другою власною частотою сприяє вириву стержня з ніпеля або втомному руйнуванню стержня в верхній частині з'єднання. Осьове навантажування з'єднання першою власною частотою більш небезпечно з точки зору втомного руйнування ніпеля в нижній частині.



а) – еквівалентні напруження в з’єднанні; б) – спосіб обтискання; в-д) – залежності $\sigma_{руйн}$ (темні точки) і p (світлі точки) від Δ для різних значень l_1 та σ_t

Рисунок 10 – Моделювання пресового з’єднання

Запропонована методика обґрунтування допустимих зовнішніх гармонічних навантажень за критерієм втомної міцності ніпеля, яка ґрунтується на обчисленні в fe-safe коефіцієнта запасу втомної міцності (за критерієм Брауна-Міллера) за результатами стаціонарного динамічного аналізу Abaqus – дійсними і уявними складовими напружень для заданої частоти. Зокрема виявлено, що експлуатація з’єднання ШН діаметром 22 мм з амплітудою напружень розтягу в штанзі 1 МПа,

їхнім середнім значенням 116 МПа та частотами в діапазоні 8002...8080 Гц не забезпечує циклічної довговічності 10^7 циклів ніпеля зі сталі марки сталь 40.

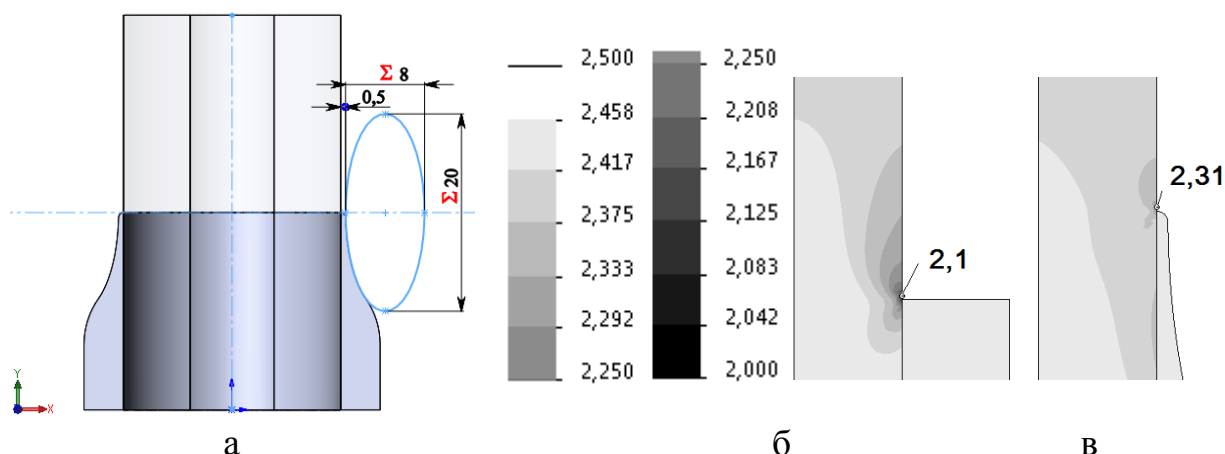
Описано способи побудови для SOLIDWORKS геометричних тривимірних параметричних моделей НКТ з різноманітними окремими дефектами або їхніми комбінаціями, які за допомогою МСЕ дозволяють обґрунтовувати можливість їхньої експлуатації, а також досліджувати вплив розмірів того чи іншого дефекту на напруження в трубі. Моделі також дозволяють обґрунтовувати ефективність ремонту труб з різноманітними дефектами БС та оптимізувати параметри БС.

Обґрунтовано доцільність і удосконалено технологію ремонту та зміцнення ШН (у тому числі порожнистих), НКТ та викидного трубопроводу ШСНУ склопластиковими бандажами. Зокрема для додаткового захисту БС від механічних пошкоджень і водопоглинання запропоновано формування на БС поліуретанового або поліамідного протектора-центратора. Порівнювались результати експериментальних (за допомогою тензорезисторів), аналітичних і чисельних обчислень значень напружень від внутрішнього тиску в трубах з БС, товщина яких близька до товщини стінки труби, а ширина – 300 мм. Результати показують, що такий БС на основі склотканини Т-10-80 (ГОСТ 19170-73) і епоксидного зв'язуючого ЭДТ-10 (ОСТ 92-0957-74) зменшує кільцеві напруження в 1,18-1,54 рази, а осьові – в 1,05-1,21 рази. Експериментальне випробування БС на міцність в умовах внутрішнього тиску в трубі виконували на фізичних моделях – газових балонах з БС на циліндричній поверхні. Тиск циклічно змінювали від 0 до 20 МПа. Також проводилось аналогічне випробування балона з дефектами та БС. На зовнішню циліндричну поверхню балона було нанесено два дефекти глибиною 0,5 мм, шириною 5 мм, довжиною 40 мм і розміщених діаметрально. В обох експериментах після 10^4 циклів ніяких розшарувань та порушення міцності БС виявлено не було.

Розроблено параметричну модель труби з БС і корозійним дефектом правильної форми, який являє собою поверхню обертання, що отримується обертанням еліпса навколо осі, перпендикулярній осі труби. Це дозволяє отримати велику кількість різних форм внутрішніх і зовнішніх дефектів, які описуються невеликою кількістю параметрів. На основі моделі отримано залежності максимального еквівалентного напруження в НКТ від товщини БС. Збільшення товщини БС є ефективним для ремонту глибоких внутрішніх дефектів, а ремонт зовнішніх дефектів вимагає попереднього вирівнювання дефекту заливним полімерним композиційним матеріалом.

Виявлено, що нанесення БС без фаски на тіло ШН зменшує коефіцієнт запасу втомної міцності D з 2,43 до 2,05 для циклу втомного навантаження, яке відповідає напруженню розтягу σ_p в тілі 0...150 МПа. На основі аналізу різних варіантів конструкції фаски БС в SOLIDWORKS розроблено параметричну геометричну модель і СЕМ ШН (НКТ) з БС і з еліптичною фаскою (рис. 11). Досліджено вплив параметрів ортотропії БС, його модулів пружності та навантажування на значення D . Виявлено, що еліптична фаска БС ШН з вертикальною віссю еліпса $a=20$ мм та радіусами скруглення і додатковим шаром епоксидної смоли в зоні концентрації напружень є оптимальним варіантом конструкції та володіє мінімальним значенням

D (2,41). Для НКТ діаметром 73 мм та з товщиною стінки 5,5 мм і з БС товщиною 5,5 мм оптимальною фаскою є еліптична фаска з $a=32$ мм (рис. 11).



а) – параметрична модель; б, в) – розподіл коефіцієнта запасу втомної міцності D в тілі НКТ для циклу втомного навантажування, що відповідає $\sigma_p=0\dots 150$ МПа та внутрішнього тиску 0 МПа: б) – без фаски, в) – з еліптичною фаскою ($a=32$ мм)

Рисунок 11 – Моделювання фаски БС

Запропоновано методику скінченно-елементного аналізу труб із зовнішньою осью тріщиною та БС. Рекомендовано її використання для обґрунтування зміцнення БС НКТ з іншими типами тріщин. Виявлено, що збільшення натягу БС суттєво зменшує значення КІН в трубі, а збільшення товщини БС – незначно. Розроблено параметричну модель (рис. 12) для визначення КІН (прямим методом переміщень V_y) в ремонтаній БС НКТ зовнішнім діаметром $d=73$ мм, внутрішнім діаметром $d_2=63$ мм з осью тріщиною на зовнішній поверхні з круговим фронтом радіусом $R_c=50$ мм, якщо на трубу діє внутрішній циклічний тиск (рис. 12). Виявлено, що нанесення БС довжиною $l_b=100$ мм та товщиною $t=5,5$ мм на НКТ з тріщиною глибиною $a=0,5$ мм може підвищити її циклічну довговічність з 10^6 до 10^7 циклів для циклічного віднульового внутрішнього тиску 27 МПа (що відповідає циклічним напруженням 0-150 МПа для даної НКТ) (рис. 13). Прямим методом напружень з екстраполяцією отримано залежність КІН в БС від його товщини t і виявлено, що товщина більша 4-5 мм майже не зменшує значення КІН і може бути прийнята за оптимальну.

За допомогою SOLIDWORKS розроблено параметричні моделі тіла штанги з БС, яка має сферичний або циліндричний корозійний дефект або втомну поперечну тріщину з прямолінійним фронтом. Моделі призначено для оптимізації конструкції БС МСЕ. Виявлено залежності максимальних еквівалентних напружень σ_m в штанзі діаметром 22 мм з БС від радіуса R і глибини h корозійного сферичного дефекту (табл. 2). Знайдено відповідні регресійні залежності. Залежності підтверджують зміцнюючий ефект БС. Виявлено регресійні залежності максимальних σ_m в штанзі з сферичним дефектом ($R=20$ мм, $h=6$ мм) від довжини та діаметра БС. За допомогою МСЕ виявлено регресійні залежності КІН від глибини втомної тріщини з прямолінійним фронтом в ШН і побудовано криві втоми для ШН з БС і без нього,

які мають початкову тріщину глибиною 1 мм (рис. 14). Показано їхню відповідність результатам відомих втомних випробувань. Моделі, методику аналізу, Python-програму для її реалізації та залежності рекомендовано застосовувати для обґрунтування доцільності ремонту ШН з дефектами БС та оптимізації їхньої конструкції. Обчислена за моделями циклічна довговічність ШН з тріщиною глибиною 1 мм в середовищі %3 NaCl збільшується в 6,3-79 раз після ремонту БС.

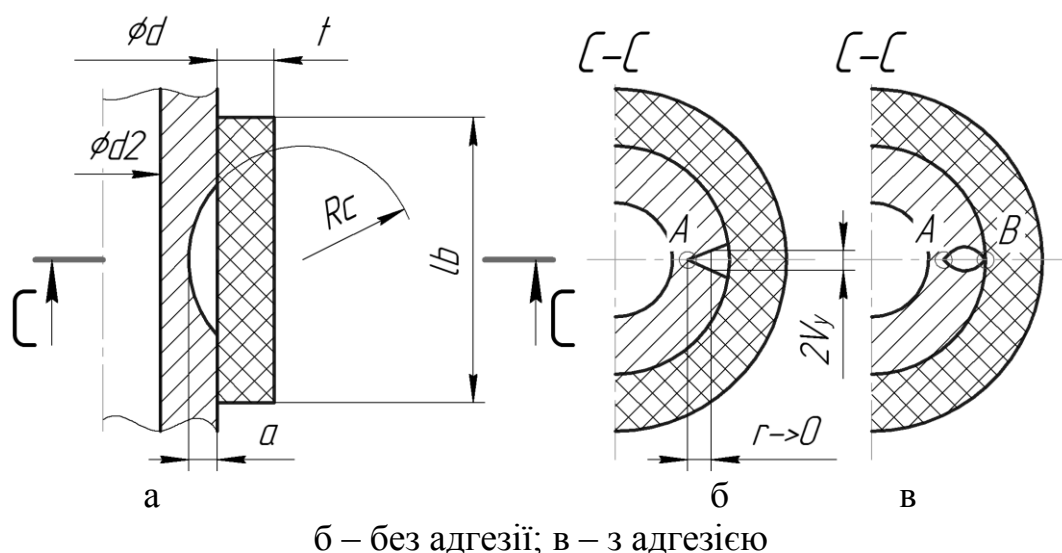
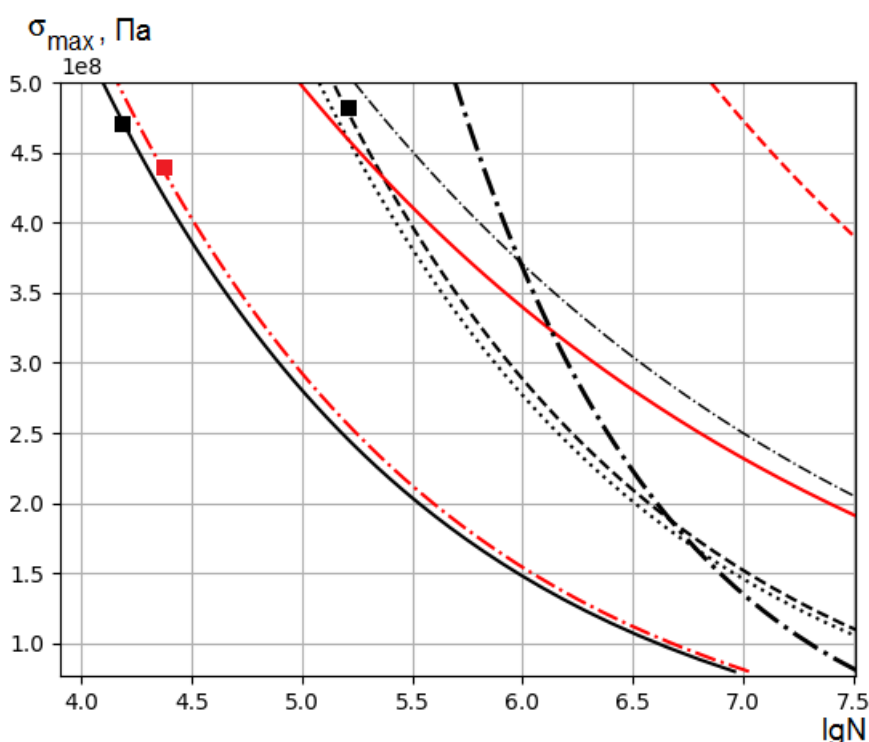


Рисунок 12 – Параметри НКТ з зовнішньою тріщиною і БС (а) та види моделювання контакту поверхонь сталевих труби та БС (б, в)



без БС в %3 водному розчині NaCl (■—);
 без БС на повітрі (—);
 з БС $t=5,5$ мм в %3 NaCl (■- -);
 з БС $t=5,5$ мм на повітрі (- -);
 з БС $t=0,5$ мм в %3 NaCl (· · ·);
 з БС $t=5,5$ мм в %3 NaCl, без моделювання адгезії (■- · -);
 гладкий зразок в %3 NaCl (дані інших авторів) (- · -, жирна);
 гладкий зразок на повітрі (дані інших авторів) (- · -, тонка)

Рисунок 13 – Криві втоми гладких зразків зі сталі 20Н2М та криві росту тріщини від $a=0,5$ до $a=4,5$ мм в НКТ

Таблиця 2 – Залежність максимальних σ_m в зоні дефекту (МПа) від h та R (мм) в ШН 22 мм для навантаження, що відповідає напруженню розтягу в тілі $\sigma_p=150$ МПа

		з БС $db=30$ мм і $2lb=100$ мм						без БС					
h	R	5	10	15	20	25	30	5	10	15	20	25	30
2		259	236	224	216	211	207	263	240	227	219	214	210
4		327	293	283	275	270	266	334	300	288	280	275	271
6		451	389	369	362	357	353	486	401	382	373	368	365
8		670	553	527	516	507	501	786	588	557	543	536	530
10		1349	802	790	765	755	746	1870	905	865	843	828	817

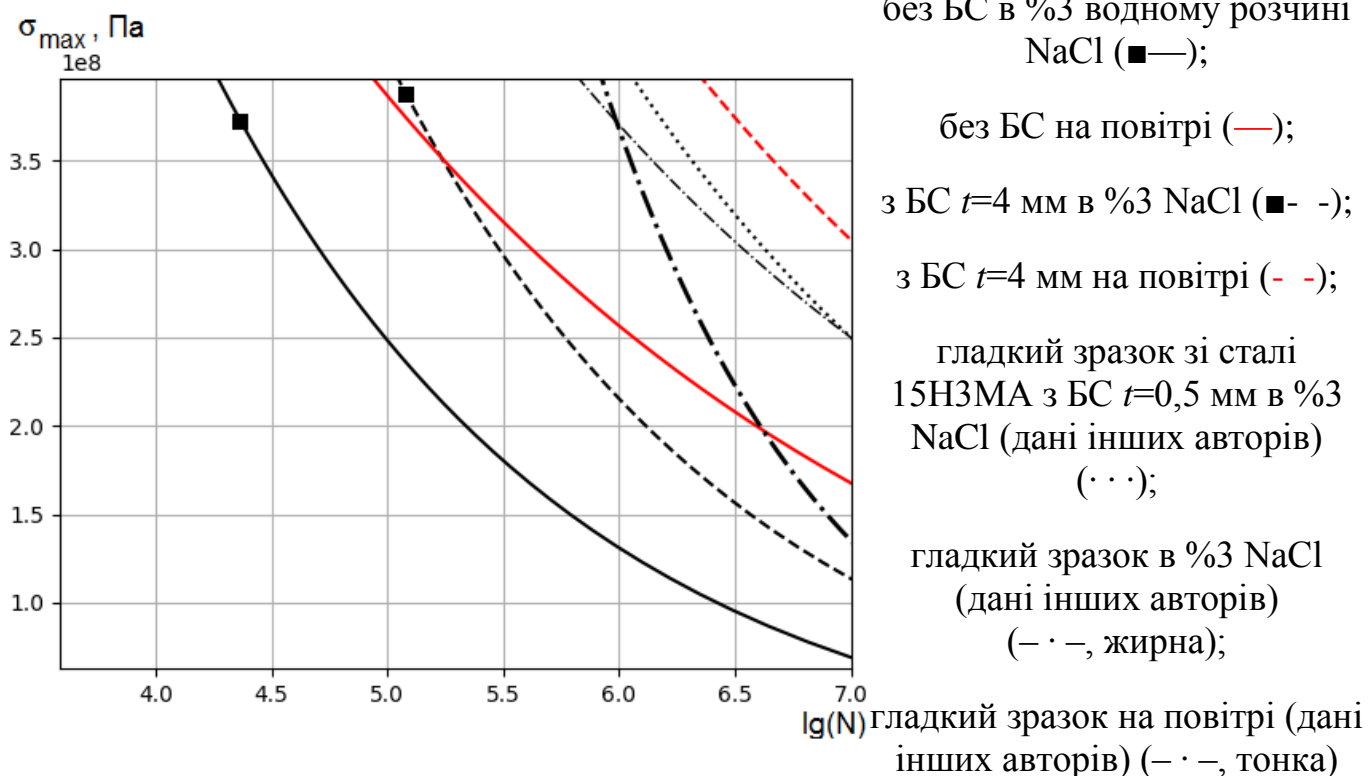


Рисунок 14 – Криві втоми гладких зразків зі сталі 20Н2М та криві росту тріщини від $a=1$ мм до $a=10$ мм в ШН діаметром 22 мм

На базі Abaqus/CAE розроблено СЕМ частини ШН в зоні піделеваторного бурта та макрос мовою Python для автоматизації процесу зміни параметрів, перебудови моделі, симуляції та отримання результатів. Матеріал ШН – сталь 40. Осьове навантаження розтягу утворює напруження в тілі ШН $\sigma_{роз}$. Навантаження згину промодельовано дотичним напруженням $\sigma_{зг}$ до уявного перерізу тіла ШН, який розташований на відстані 200 мм від головки. На віддалі 400 мм від головки розташовано центратор ШН. Просимульовано два кроки навантаження, які утворюють один цикл навантаження під час роботи колони ШН і відповідають її ходу вверх ($\sigma_{роз}=170$ МПа, $\sigma_{зг}=0$ МПа) і вниз ($\sigma_{роз}=0$ МПа, $\sigma_{зг}=3$ МПа). В таких умовах збільшення радіусу скруглення r між піделеваторним буртом і тілом ШН діаметром 22 мм з 67 мм до 500 мм призводить до збільшення коефіцієнта запасу втомної міцності D за критерієм Брауна-Міллера орієнтовно в 1,2 рази. Отримано регресійну залежність $D=f(r, \sigma_{зг})$. Рекомендовано застосовувати СЕМ та макрос для аналізу та оптимізації ШН іншого типорозміру чи конструкції для будь-яких значень навантажень або властивостей матеріалів.

Аналіз відомих конструкцій протекторів для ШН із урахуванням їхніх гідродинамічних і зносостійких характеристик показав, що найкращі експлуатаційні характеристики мають протектори з малою площею поперечного перетину, великою площею тертя (контакту) з НКТ та достатньою площею зчеплення з ШН. У SOLIDWORKS Flow Simulation розроблено параметричну гідродинамічну СЕМ дволопатевого протектора та запропоновано методику оптимізації його параметрів за критеріями мінімального гідродинамічного опору та максимальної площі тертя. Методика основана на ітераційному алгоритмі, який містить етапи: побудова плану експерименту, побудова регресійної моделі за узагальненим критерієм (зважена сума), пошук мінімуму. Отримано регресійні залежності для вибору значень параметрів в залежності від важливості кожного критерію. Для протектора з гвинтовими лопатями отримані залежності сили гідродинамічного опору та крутного моменту від кількості поворотів гвинтової лінії. Для збільшення крутного моменту слід змінювати профіль канавки шляхом застосування неоднакових радіусів скруглення ребер лопатей. Високий крутний момент і достатня кількість протекторів на колоні дозволять запобігти самовідгвинчуванню ШН та зменшити навантаження на штангообертач.

У шостому розділі розроблено принципи побудови інформаційної системи для проектування та підтримки ЖЦ обладнання ШСНУ (ІС), що базується на множині моделей обладнання ШСНУ, його відмов, базі знань з проблем надійності та мові Python. Компоненти ІС доступні в додатках та GitHub (vkorey/PU. URL: <http://github.com/vkorey/PU>) як вільне програмне забезпечення.

На основі принципу ізоморфізму закономірностей складних систем та міждисциплінарного аналізу цих закономірностей у різних природних та штучних системах розроблено абстрактну модель ІС. Модель відображає тільки найбільш загальні її характеристики, шляхом дихотомічного ділення ЖЦ виробу виділяє класи функціональних елементів ІС та їхню ієрархію, а також володіє основними закономірностями складних систем. Клас елемента ІС описує множину однотипних спеціалізованих елементів ІС, які призначені для досягнення певних цілей ІС та можуть взаємодіяти з іншими елементами для досягнення заданого рівня синергії. Наведено орієнтовні змістові інтерпретації класів. Ця модель є якісною і є основою для розробки більш складних кількісних математичних моделей ІС. Розроблено ізоморфні до абстрактної моделі динамічні математичні моделі ІС, які описуються системою диференціальних рівнянь, зокрема модель "гармонічний осцилятор" з чотирма змінними. Виконано аналіз бінарних відношень між класами моделі та виділено типи відношень. Запропоновано способи розрахунку рівня синергії підсистем моделі. Модель є ізоморфною до структур цілеспрямованої діяльності в різних складних ІС і має фрактальну структуру, тобто може описувати не тільки ІС підтримки всього ЖЦ виробу, але й будь-якого його етапу: проектування, виробництва, експлуатації. Подано приклад класифікації розроблених в роботі елементів ІС підтримки ЖЦ обладнання ШСНУ та визначення класів їхніх бінарних відношень з метою обчислення рівня синергії. Запропоновано алгоритм функціонування ІС, який включає механізми ізоморфні до механізмів складних систем.

Запропоновано підхід до побудови експертних систем з проблем надійності обладнання ШСНУ, які описують фактори, що впливають на надійність, та

дозволяють логічне виведення нових знань. Підхід базується на семантичних мережах, логіці предикатів, мові OWL та використанні об'єктно-орієнтованих конструктивів мови Python для створення класів, індивідів, атрибутів і відношень онтології. Як і в OWL, факти бази знань формалізуються у вигляді триплетів («суб'єкт», «предикат», «об'єкт»), наприклад («згвинчування РЗ», «є причиною», «зменшення втоми»). Тут суб'єкт і об'єкт – це індивіди класу «Фактор», а предикат – об'єктна властивість. За допомогою мови Python користувач може створювати власні способи подання і виведення знань. Основні переваги підходу – універсальність і широкі можливості цієї мови, легке розширення функціональності системи без необхідності винаходити ще одну спеціальну мову подання знань чи запитів до них, проста інтеграція в інші інформаційні системи.

Запропоновано принципи розроблення ІС, що створюють передумови до появи в них властивостей складних систем і, таким чином, підвищують їхню ефективність. Наведено приклад ІС різьбових з'єднань ШСНУ, яка:

- є спрямованою на просту і ефективну інтеграцію багатьох різнотипних компонентів, основана на агентно-орієнтованому підході та належить до класу мультіагентних і гібридних інтелектуальних систем;

- є зорієнтованою на зручний і простий опис агентів, їхньої поведінки та взаємодії, динамічне створення та персистентність агентів, розширення функціональності системи шляхом створення нових класів і агентів;

- є розробленою на базі популярної мови Python, дозволяє роботу з системою в оболонці Python, використовує різні вільні Python-пакети та стороннє програмне забезпечення, зокрема бібліотеку pyDatalog та розроблену автором програму для скінченно-елементної симуляції РЗ.

Мультіагентна система містить базу знань з правилами логічного виведення, машину прямого виведення, редактор коду, імітаційні моделі РЗ, результати їх симуляцій та інші компоненти (рис. 15).

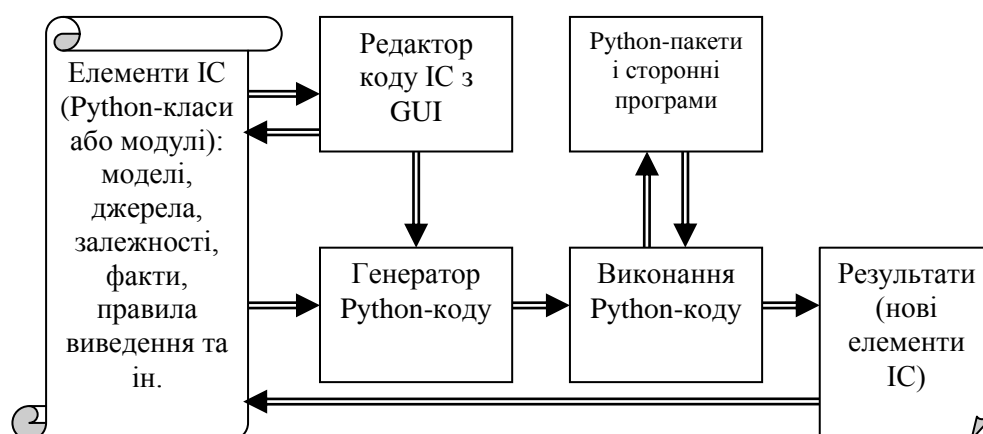


Рисунок 15 – Схема інформаційної системи

База знань містить факти, у яких фактори, що впливають на надійність та довговічність РЗ, пов'язані причинно-наслідковими відношеннями "є причиною" і "є наслідком". Факти можуть мати такі властивості як джерело інформації, залежність величин, імітаційна модель тощо. Правила логічного виведення дозволяють отримувати нові факти з бази знань та імітаційних моделей. Кожний агент має

метод, що визначає правило поведінки агента. Метод повинен повертати логічну істину, якщо його виклик призвів до яких-небудь змін атрибутів агентів. В загальному випадку правила активних агентів застосовуються до тих пір, поки це призводить до змін в системі. Це забезпечує розвиток системи та є передумовою її самоорганізації.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертації наведене нове вирішення наукової проблеми, яка полягає в підвищенні ефективності проектування обладнання комплексно-працевдатної ШСНУ. Ця проблема вирішена шляхом розвитку методології автоматизованого проектування обладнання ШСНУ, що опирається на принципи теорії систем і використовує основу на Python інформаційну систему з гетерогенними елементами (імітаційні моделі обладнання, статистичні моделі відмов, результати симуляції, база знань та інші), та методів комп'ютерного моделювання обладнання ШСНУ, які завдяки системному підходу спрямовані на підвищення адекватності, спрощення використання, розвитку та інтеграції моделей, забезпечення можливості системного дослідження працевдатності та оптимізації параметрів обладнання. Запропоновані рішення призначені для вирішення множин проблем працевдатності ШСНУ для різних умов експлуатації з найменшими витратами. Зокрема отримано наступні результати.

1. На базі індуктивних методів самоорганізації моделей розроблено принципи побудови точних і робастних статистичних моделей відмов колон ШН і полірованого штока: моделей густини імовірності відмов як функції від відносної глибини обриву та моделей класу аварійності колони, які враховують множину факторів, пов'язаних з параметрами ШСНУ та її відмови. Обґрунтовано ефективність застосування методів ансамблів дерев рішень для прогнозування частоти відмов колон ШН (правильність моделей досягає 0,94). Побудовано відповідні моделі, що дозволяють ефективно ідентифікувати високоаварійні колони та їхні інтервали ще на етапі проектування, виявляти причини відмов та приймати рішення щодо забезпечення їхньої працевдатності.

2. Розроблено принципи компонентно-орієнтованого моделювання ШСНУ, спрямованого на моделювання факторів, які розподілені нерівномірно вздовж колони ШН, спрощення створення моделей, їхнього розвитку, використання більшою спільнотою користувачів та інтеграції в ІС. Зокрема розроблено параметричні моделі ШСНУ – модель на основі абстрактних автоматів та мови Python з можливістю моделювання явищ, які важко сформулювати за допомогою диференціальних рівнянь; модель мовою Modelica, яка для моделювання колони ШН використовує стандартні поступальні механічні компоненти. Розроблено алгоритмічні основи та реалізацію програмного каркасу мовою Python для створення компонентно-орієнтованих, подібних на Modelica-моделі, акаузальних моделей ШСНУ та інших динамічних систем без необхідності застосування спеціалізованих мов моделювання. Адекватність моделей підтверджено шляхом порівняння результатів симуляції з практичними динамограмами. Показані приклади застосування моделей для аналізу склопластикових колон, білярезонансних частот ходів і аварійних ситуацій.

3. Шляхом використання відомих САПР і систем моделювання гідродинаміки і механіки деформівного твердого тіла та розроблених автором програмних компонентів запропоновані принципи побудови та застосування параметричних геометричних моделей, СЕМ та прикладних САПР проблемних деталей та вузлів ШСНУ, які, як показано в роботі, володіють здатністю до простої інтеграції в ІС та використовуються для різностороннього аналізу і оптимізації під час дослідження працездатності та проектування. Зокрема розроблено: гідродинамічні СЕМ кульового зворотного клапана свердловинного штангового насоса та протектора ШН; геометричні моделі та СЕМ РЗ – муфтового РЗ ШН, замкового РЗ та двоопорного РЗ порожнистих ШН, муфтового РЗ НКТ, модель РЗ з довільними геометричними відхиленнями; СЕМ пресового з'єднання тіла склопластикової ШН зі сталеву головою; геометричні моделі та СЕМ ШН і НКТ з корозійними та втомними дефектами і БС.

4. На основі моделей муфтового РЗ ШН отримано залежності для визначення оптимальної величини згвинчування та довжини зарізьбової канавки за критерієм втомної міцності; з метою оптимізації конструкції отримано залежності напружень в небезпечних зонах від міцності матеріалів та геометричних параметрів; шляхом комплексного удосконалення конструкції зменшено еквівалентні напруження в небезпечних зонах на 10...20%; виявлені залежності напружень, контактних тисків та коефіцієнта запасу втомної міцності в різьбі від відхилень максимального діаметра різьби ніпеля, кута профілю та кроку різьби муфти з метою обґрунтування їхніх допустимих значень. За допомогою удосконаленої ітеративної методики проектування обґрунтовано доцільність застосування та розроблено конструкцію двоопорного РЗ для порожнистих ШН, яке володіє більшою міцністю під час згину, кручення та стиску, вищим опором до самовідгвинчування та герметичністю, більш рівномірним розподілом навантаження на витки та більшою втомною міцністю у порівнянні зі стандартним.

За допомогою моделей муфтового РЗ НКТ отримано залежності для визначення оптимальної величини натягу НКТ за критерієм герметичності. Для з'ясування працездатності РЗ в умовах високочастотних вібрацій запропоновано методику аналізу відклику РЗ на гармонічне зовнішнє осьове навантаження частотами 0..20 кГц; отримано залежності контактного тиску на робочій стороні профілю від частоти та залежність резонансної частоти від коефіцієнта тертя. Виявлено можливість порушення герметичності та втомного руйнування РЗ внаслідок високочастотного резонансу. За критеріями герметичності та втомної міцності обґрунтовано можливість застосування різьб ніпелів НКТ з відхиленнями кута профілю внаслідок нарізання некоригованим різцем з від'ємним переднім кутом. Розроблено методики побудови вказаних залежностей.

5. Моделі пресових з'єднань склопластикових ШН використано для отримання розподілів напружень і контактних тисків в з'єднанні; запропоновано методику та залежності для вибору оптимальних параметрів з'єднання – глибини переміщення штампів, границі плинності сталі, довжини обтискання. Проаналізовано відклик з'єднання на гармонічне зовнішнє осьове навантаження та запропоновано методику виявлення небезпечних діапазонів частот з точки зору міцності з'єднання та втомної міцності ніпеля. Рекомендовано збільшення радіусу

скруглення між піделеваторним буртом і тілом ШН в умовах додаткових навантажень згину.

Шляхом використання моделей ШН та НКТ з дефектами та БС отримані регресійні залежності еквівалентних напружень від параметрів дефекту і БС, а також розроблено методику побудови та побудовані криві втоми ШН та НКТ з втомними тріщинами та БС, які підтверджують доцільність ремонту бандажуванням. Аналітичний, чисельний та експериментальний методи обчислення напружень в трубі з БС, товщина якого рівна товщині труби, показали зменшення кільцевих напружень в 1,18-1,54 рази, а осьових – в 1,05-1,21 рази. Для зменшення концентрації напружень запропоновано методику оптимізації конструкції фаски БС.

За допомогою моделей протектора ШН запропоновано принципи оптимізації його параметрів за критеріями мінімального гідродинамічного опору, максимальної площі тертя та максимального крутного моменту.

6. Запропоновані принципи побудови та розроблено експертну систему з проблем надійності РЗ ШСНУ, база знань якої описує фактори, що впливають на надійність, та дозволяє логічне виведення нових знань, у тому числі шляхом симуляції моделей. Підхід оснований на семантичних мережах, логіці предикатів, мові OWL та використанні об'єктно-орієнтованих конструктивів мови Python для створення класів, індивідів, атрибутів і відношень онтології. Основні його переваги – проста інтеграція в ІС, універсальність і широкі можливості мови Python, легке розширення функціональності системи, зокрема можливість створення власних способів подання і виведення знань.

7. На основі міждисциплінарного аналізу закономірностей складних систем розроблено абстрактну модель інформаційної системи підтримки ЖЦ обладнання ШСНУ, яка шляхом дихотомічного ділення виділяє класи компонентів ІС (моделі, результати симуляції, факти бази знань та ін.) та їхню ієрархію, а також володіє основними закономірностями складних систем, що робить її ефективнішою. На основі цієї моделі розвинуто методологічні основи автоматизованого проектування обладнання та інформаційної підтримки життєвого циклу ШСНУ і запропоновані принципи реалізації ІС, яка належить до класу мультиагентних систем, володіє закономірностями складних систем, зокрема здатністю до простого розширення та інтеграції гетерогенних компонентів. Впроваджена ІС використовується в НГВУ "Долинаназфтогаз" для підвищення якості експлуатації ШСНУ та забезпечення їхньої надійності.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації

1. Experimental study of the reinforcement of damaged steel pipe by composite bandage / Kopey B., Rozgonjuk V., **Kopey V.**, Maksymuk O., Scherbina N., Nayda A. // Wiertnictwo Nafta Gaz. 2004. r.21/1. P. 125-134.

2. Finite-element analysis of the tubing thread / Kopey B., **Kopey V.**, Bebnarz S., Savula S. // Wiertnictwo Nafta Gaz. 2006. r.23/2. P. 681-685.

3. Оптимізація товщини композитних бандажів при ремонті трубопроводів з дефектами / Копей Б. В., **Копей В. Б.**, Максимук О. В., Щербина Н. М., Найда А. М.

// Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. 2007. № 2(16). С. 101-107.

4. Копей Б. В., Зінченко Ю. С., **Копей В. Б.** Аналіз поломок насосних штанг в промислових умовах // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. 2008. № 2(18). С. 49-56.

5. **Копей В. Б.** Аналіз способів підвищення ресурсу муфтового різьбового з'єднання насосних штанг // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. 2008. № 4(29). С. 66-72.

6. Копей Б. В., Кузьмін О. О., **Копей В. Б.** Механічні методи зняття відкладень парафіну та асфальто-смолистих речовин з поверхні свердловинного обладнання // Нафтогазова енергетика. 2008. № 3(8). С. 10-14.

7. Сучасні методи боротьби з корозією глибинного обладнання ШСНУ / Копей Б. В., Онищук О. О., Онищук С. Ю., **Копей В. Б.** // Нафтогазова енергетика. 2008. № 2(7). С. 13-16.

8. **Копей В. Б.** Застосування системи CAD/FEA для розрахунку і оптимізації різьбових з'єднань нафтогазового обладнання // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. 2009. № 3(32). С. 43-49.

9. Копей Б. В., Михайлюк В. В., **Копей В. Б.** Моделювання різьб насосних штанг методом скінченних елементів // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. 2009. № 2(20). С. 61-67.

10. Копей Б. В., Кузьмін О. О., **Копей В. Б.** Розроблення з'єднань склопластикових порожнистих насосних штанг та визначення навантажень на них // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. 2010. № 1(23). С. 77-83.

11. **Копей В. Б.** Розроблення та аналіз параметричних скінченно-елементних моделей різьбових з'єднань в Abaqus® // Нафтогазова енергетика. 2010. № 1(12). С. 31-36.

12. **Копей В. Б.** Скінченно-елементний аналіз та оптимізація різьбових з'єднань // Вісник Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут". Серія машинобудування. 2010. № 58. С. 42-47.

13. **Копей В. Б.** Дослідження впливу геометричних параметрів муфтового різьбового з'єднання насосних штанг на напруження у впадинах різьби ніпеля // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. 2010. № 2(24). С. 81-85.

14. **Копей В. Б.**, Петрина Ю. Д. Принципи розробки бази знань з проблем надійності і довговічності різьбових з'єднань // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. 2010. № 4(26). С. 66-69.

15. **Копей В. Б.** Автоматизоване проектування з'єднання тіла склопластикової насосної штанги зі сталеву головою // Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво. 2011. №5. С. 142-147.

16. Використання явища резонансу для комплектування колони насосних штанг / Олійник А. П., Копей Б. В., Зінченко Ю. С., **Копей В. Б.** // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. 2011. №1 (38). С. 69-75.

17. **Копей В. Б.**, Палійчук І. І. Застосування мови програмування Python для побудови баз знань з проблем надійності і довговічності штангових свердловинних насосних установок // Нафтогазова енергетика. 2011. №2(15). С. 12-18.

18. **Копей В. Б.** Імітаційна модель свердловинної штангової насосної установки на основі абстрактних автоматів // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. 2017. №3(64). С. 40-49.

19. **Копей В. Б.**, Копей Б. В., Кузьмін О. О. Принципи побудови моделі свердловинної штангової насосної установки для середовища Maplesoft MapleSim 7 // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. 2017. №2(43). С. 42-52.

20. **Копей В. Б.** Абстрактна модель інформаційної системи підтримки життєвого циклу виробу // Прикарпатський вісник НТШ. Число. 2017. №2(38). С. 71-96.

21. **Korei V. B.**, Onysko O. R., Panchuk V. G. Computerized system based on FreeCAD for geometric simulation of the oil and gas equipment thread turning // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2019. 477:012032. DOI: 10.1088/1757-899X/477/1/012032. (*Scopus*)

22. **Korei V. B.**, Onysko O. R., Panchuk V. G. Component-oriented acausal modeling of the dynamical systems in Python language on the example of the model of the sucker rod string // PeerJ Computer Science. 2019. 5:e227. DOI: 10.7717/peerj-cs.227. (*Scopus, Q1*)

23. **Копей В. Б.**, Онисько О. Р., Жигуц Ю. Ю. Обґрунтування застосування двоопорних різьбових з'єднань пустотілих насосних штанг // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. 2019. №1(46). С. 7-15. DOI: 10.31471/1993-9965-2019-1(46)-7-15.

24. **Korei V.**, Onysko O., Panchuk V. The application of the uncorrected tool with a negative rake angle for tapered thread turning // Ivanov V. et al. (eds) Advances in Design, Simulation and Manufacturing II. DSMIE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Cham : Springer, 2020. P. 149-158. DOI: 10.1007/978-3-030-22365-6_15. (*Scopus*)

25. **Korei V. B.**, Onysko O. R., Panchuk V. G. Principles of development of product lifecycle management system for threaded connections based on the Python programming language // J. Phys.: Conf. Ser. 2020. 1426:12033. DOI: 10.1088/1742-6596/1426/1/012033. (*Scopus*)

26. Onysko O. R., **Korey V. B.**, Panchuk V. G. Theoretical investigation of the tapered thread joint surface contact pressure in the dependence on the profile and the geometric parameters of the threading turning tool // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 2020. 749:012007. DOI: 10.1088/1757-899X/749/1/012007. (*Scopus*)

Праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

27. **Копей В. Б.** Аналіз способів підвищення ресурсу муфтового різьбового з'єднання насосних штанг // Анотації Міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених "Техніка і прогресивні технології у нафтогазовій інженерії", м. Івано-Франківськ, 16-20 вересня 2008 р. Івано-Франківськ : Факел, 2008. С. 55. (*форма участі – очна*)

28. Скінчено-елементний аналіз насосних штанг з зарізьбовими канавками / Копей Б. В., **Копей В. Б.**, Петрина Ю. Д., Михайлюк В. В. // Анотації Міжнародної науково-технічної конференції "Нафтогазова енергетика: проблеми і перспективи". м. Івано-Франківськ, 20-23 жовтня 2009 р. Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2009. С. 67. *(форма участі – очна)*

29. **Копей В. Б.**, Панчук А. Г. Дослідження залежності напружень в муфтовому різьбовому з'єднанні насосних штанг від характеристик матеріалів деталей з'єднання // Сучасні технології в промисловому виробництві : матеріали Всеукраїнської міжвузівської науково-технічної конференції, м. Суми, 19-23 квітня 2010 р. Ч. II. Суми : Вид-во СумДУ, 2010. С. 122-123. *(форма участі – заочна)*

30. **Копей В. Б.** Скінченно-елементний аналіз та оптимізація різьбових з'єднань // Тези доповідей XI Міжнародної науково-технічної конференції "Прогресивна техніка і технологія - 2010", м. Київ, 18-21 травня 2010 р. Київ : НТУУ "КПІ", 2010. С. 99. *(форма участі – очна)*

31. **Копей В.** Скінченно-елементне моделювання та оптимізація параметрів муфтового різьбового з'єднання насосних штанг за критерієм втомної міцності // Комп'ютерні технології: наука і освіта : тези доповідей V Всеукраїнської науково-практичної конференції, м. Івано-Франківськ, 29.09-3.10.2010 р. Київ : Університет "Україна", 2010. С. 109-112. *(форма участі – очна)*

32. **Копей В. Б.**, Панчук А. Г. Оптимізація параметрів з'єднання тіла склопластикової насосної штанги зі сталевую головою // Инновационные технологии в машиностроении : материалы Международной научно-практической конференции, г. Запорожье, 17-21 мая 2011 г. Том 2. Запорожье : Запорожская торгово-промышленная палата, 2011. С. 58-60. *(форма участі – заочна)*

33. **Копей В. Б.**, Венгрынюк Т. П. Моделирование дефектов труб в SolidWorks® // Надежность и безопасность магистрального трубопроводного транспорта : материалы VII Междунар. науч.-техн. конф., Новополоцк, 22 – 25 ноября 2011 г. / под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. В. К. Липского. Новополоцк : Полоц. гос. ун-т, 2011. С. 250-251. *(форма участі – заочна)*

34. **Копей В. Б.**, Петрина Ю. Д., Венгрынюк Т. П. Конечно-элементное моделирование ремонта труб с дефектами стеклопластиковыми бандажами в SolidWorks® // Надежность и безопасность магистрального трубопроводного транспорта : материалы VII Междунар. науч.-техн. конф., Новополоцк, 22 – 25 ноября 2011 г. / под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. В. К. Липского. Новополоцк : Полоц. гос. ун-т, 2011. С. 248-250. *(форма участі – заочна)*

35. **Копей В. Б.** Створення експертної системи з проблем надійності і довговічності різьбових з'єднань в редакторі онтологій Protégé-OWL 3.5 // Збірка наукових праць за матеріалами Міжнародної науково-практичної конференції "Наукові дослідження сучасності. Випуск 4", м. Київ, 30 травня 2012 р. Частина 1. Київ : НАІРІ, 2012. С. 99-101. *(форма участі – заочна)*

36. **Копей В. Б.** Створення експертної системи з проблем надійності і довговічності різьбових з'єднань мовою Python // Збірка наукових праць за матеріалами Міжнародної наукової конференції "Наука - XXI століття. Випуск 2", м. Київ, 27 червня 2012 р. Київ : НАІРІ, 2012. С. 117-122. *(форма участі – заочна)*

37. **Копей В. Б.** Скінченно-елементне моделювання та аналіз втомної міцності насосних штанг в зоні скруглення між піделеваторним буртом і тілом штанги // Тези доповідей Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених та студентів "Техніка і прогресивні технології у нафтогазовій інженерії - 2012", м. Івано-Франківськ, 5-7 листопада 2012 р. Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2012. С. 123-126. *(форма участі – очна)*

38. **Копей В. Б.** Обґрунтування доцільності збільшення довжини розвантажувальної канавки ніпеля насосної штанги // Технологічний аудит та резерви виробництва (Спецвипуск. Матеріали науково-практичної конференції "Наукові підсумки 2012р.", м. Харків, 2012 р.). 2012. № 6/2 (8). С. 7-8. *(форма участі – заочна)*

39. **Копей В. Б.** Моделювання клапана свердловинного штангового насоса методом обчислювальної гідродинаміки в Abaqus/CAE® // Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції "Математичне моделювання прикладних задач математики, фізики, механіки ММАР-2013", м. Харків, 5 – 25 травня 2013 р. Харків : ХНАДУ, 2013. URL: <http://files.khadi.kharkov.ua/images/Fizika.pdf> (дата звернення: 29.02.2016). *(форма участі – заочна)*

40. **Korey V.** Development of model of sucker-rod pumping system by using Maplesim™ software // International scientific and technical conference "Oil and Gas Power Engineering 2013" : abstracts, Ivano-Frankivsk, October 7-11, 2013. Ivano-Frankivsk : IFNTUOG, 2013. P. 116-118. *(форма участі – очна)*

41. **Копей В. Б.** Принципи побудови тривимірної параметричної моделі верстата-гойдалки в SolidWorks® 2012 // Всеукраїнський науково-практичний семінар "Графічна освіта у ВНЗ: стан та перспективи" : збірник тез доповідей, м. Івано-Франківськ, 19-20 вересня 2013 р. Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2013. С. 87-89. *(форма участі – очна)*

42. **Копей В. Б.** Використання вільного програмного забезпечення для розробки системи скінченно-елементного аналізу різьбових з'єднань нафтогазового обладнання // Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції "Машини, обладнання і матеріали для нарощування вітчизняного видобутку та диверсифікації постачання нафти і газу" ПМ – 2016, м. Івано-Франківськ, 16-20 травня 2016 р. Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2016. С. 277-280. *(форма участі – очна)*

43. **Копей В. Б.** Моделювання гармонічного осьового навантажування пресового з'єднання склопластикової насосної штанги // Соціально-економічний розвиток в умовах глобалізації : матеріали XLIX Міжнародної науково-практичної конференції, м. Чернівці, 29-30 листопада 2016 р. Т. 1. Київ : Науково-видавничий центр "Лабораторія думки", 2016. С. 7-10. *(форма участі – заочна)*

44. **Копей В. Б.** Моделювання втомної міцності ніпеля склопластикової насосної штанги // Матеріали II-ї Міжнародної науково-практичної конференції "Теоретичні та практичні аспекти розвитку науки", м. Київ, 29 – 30 листопада 2016 р. Ч. 2. Київ : МЦНД, 2016. С. 22-24. *(форма участі – заочна)*

45. **Копей В. Б.** Компонентно-орієнтоване моделювання кінематики механізмів мовою Python на прикладі механізму верстата-гойдалки // Тези доповідей Міжнародної науково-технічної конференції "Нафтогазова енергетика-2017", м.

Івано-Франківськ, 15-19 травня 2017 р. Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2017. С. 362-364. *(форма участі – очна)*

46. **Копей В. Б.**, Копей Б. В., Кузьмін О. О. Принципи побудови моделі свердловинної штангової насосної установки для середовища Maplesoft MapleSim 7 // Тези доповідей Міжнародної науково-технічної конференції "Нафтогазова енергетика-2017", м. Івано-Франківськ, 15-19 травня 2017 р. Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2017. С. 364-365. *(форма участі – очна)*

47. **Копей В. Б.** Імітаційна модель свердловинної штангової насосної установки на основі абстрактних автоматів // Тези доповідей Міжнародної науково-технічної конференції "Нафтогазова енергетика-2017", м. Івано-Франківськ, 15-19 травня 2017 р. Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2017. С. 365-366. *(форма участі – очна)*

48. **Копей В. Б.**, Воробець М. І. Система автоматизованого проектування металополімерних з'єднань на основі вільного програмного забезпечення // Машинобудування очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво (МОМ – 2017) : матеріали тез доповідей XVII Міжнародної науково-практичної конференції, м. Чернігів, 01 – 03 листопада 2017 р. Чернігів : ЧНТУ, 2017. С. 31-33. *(форма участі – заочна)*

49. **Кореї V.**, Panchuk V., Onysko O. Component-oriented modelling of dynamical systems in Python language on the example of the model of the sucker rod string // International conference Innovative Ideas in Science 2017 : book of abstracts, Banja Luka, 02 - 03 November 2017. Banja Luka : University of Business Engineering and Management, 2017. P. 33. *(форма участі – очна)*

50. **Копей В. Б.** Статистичні моделі відмов колон насосних штанг // Матеріали II Міжнародної науково-технічної конференції "Машини, обладнання і матеріали для нарощування вітчизняного видобутку нафти і газу PGE – 2018", м. Івано-Франківськ, 24-27 квітня 2018 р. Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2018. С. 310-313. *(форма участі – очна)*

51. **Копей В. Б.** Прогнозування частоти відмов колон насосних штанг за допомогою ансамблів дерев рішень // Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС – 2018) : матеріали тез доповідей VIII Міжнародної науково-практичної конференції, м. Чернігів, 10–12 травня 2018 р. : у 2-х т. / Чернігівський національний технологічний університет [та ін.]; відп. за вип.: Єрошенко Андрій Михайлович [та ін.]. Т. 2. Чернігів : ЧНТУ, 2018. С. 198-200. *(форма участі – заочна)*

52. **Кореї V.**, Onysko O., Panchuk V. Computerized system based on FreeCAD for geometric simulation of thread turning of oil and gas pipes // 6th International Conference of Applied Science, May 9-11, 2018, Banja Luka, Bosnia and Herzegovina : book of abstracts. Banja Luka : University of Banja Luka, 2018. P. 108. *(форма участі – очна)*

53. **Копей В. Б.** Алгоритм інтелектуальної системи на основі міждисциплінарних досліджень загальносистемних закономірностей // Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем (КМОСС-2018) : матеріали IV Міжнародної науково-технічної конференції, м. Дніпро, 1-2 листопада 2018 р. / Міністерство освіти і науки України, Державний вищий навчальний заклад "Український державний хіміко-технологічний університет". Дніпро : Баланс-клуб, 2018. С. 246-248. *(форма участі – заочна)*

54. **Копей В. Б.**, Онисько О. Р., Жигуц Ю. Ю. Обґрунтування застосування двоопорних муфтових різьбових з'єднань пустотілих насосних штанг // Матеріали доповідей VIII Міжнародної науково-технічної конференції "Прогресивні технології у машинобудуванні РТМЕ-2019", 4-8 лютого 2019 р., м. Івано-Франківськ-Яремче. Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2019. С. 146-149. (*форма участі – очна*)

55. **Kopei V.**, Onysko O., Panchuk V. Principles of the product lifecycle management system development for threaded connections based on the Python programming language // International Conference of Applied Science ICAS 2019 : book of abstracts, May 9-11, 2019, Hunedoara, Romania. Timisoara : Editura EUROBIT, 2019. P. 42. (*форма участі – очна*)

56. **Kopei V. B.**, Kopei B. V. Harmonic axial loading analysis of the tubing threaded connection // Modern achievements of science and education : proceedings of XIV International scientific conference, September 26 - October 3, 2019, Netanya, Israel. Khmelnytskyi : KhNU, 2019. P. 29-37. (*форма участі – очна*)

Праці, які додатково відображають наукові результати дисертації

57. Комп'ютерна програма "Програма для побудови баз знань з проблем надійності і довговічності штангових свердловинних насосних установок" ("SuckerRodPumpingUnitKB") : свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 42157 / **Копей Володимир Богданович**. Дата реєстрації 08.02.2012 // Каталог державної реєстрації. Вип.16/2012. С. 42.

58. Комп'ютерна програма "Модуль для компонентно-орієнтованого моделювання динамічних систем та приклади його застосування для побудови моделей колони насосних штанг" : свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 73098 / **Копей Володимир Богданович**. Дата реєстрації 25.07.17 // Бюл. "Авторське право і суміжні права" № 46/2017. С. 154.

АНОТАЦІЯ

Копей В. Б. Науково-методологічні основи автоматизованого проектування обладнання штангової свердловинної насосної установки. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.05.12 – машини нафтової та газової промисловості. – Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, МОН України, Івано-Франківськ, 2020.

Дисертація присвячена вирішенню актуальної науково-методологічної проблеми ефективного проектування обладнання комплексно-працевдатної штангової свердловинної насосної установки (ШСНУ). Розвинуті принципи побудови статистичних моделей відмов штангової колони та імітаційних параметричних моделей обладнання ШСНУ, зокрема: компонентно-орієнтованих моделей ШСНУ мовами Modelica та Python; скінченно-елементних моделей різьбових з'єднань свердловинного обладнання, пресового з'єднання склопластикової штанги, штанг та труб з дефектами і склопластиковим бандажем; гідродинамічних моделей протектора насосних штанг та клапана свердловинного

насоса. На основі міждисциплінарного аналізу закономірностей складних систем розроблено абстрактну модель інформаційної системи для проектування обладнання і підтримки життєвого циклу ШСНУ та запропоновано принципи її реалізації у вигляді багатоагентної системи з моделями та базою знань. Запропоновано шляхи дослідження і удосконалення обладнання ШСНУ, оптимізації та раціонального вибору значень його параметрів.

Ключові слова: штангова свердловинна насосна установка, працездатність, насосні штанги, насосно-компресорні труби, різьбове з'єднання, статистична модель, імітаційна модель, компонентно-орієнтоване моделювання, метод скінченних елементів, напружено-деформований стан, втомна міцність, управління життєвим циклом виробу, автоматизоване проектування, інформаційна система, мова програмування Python.

АННОТАЦИЯ

Коне́й В. Б. **Научно-методологические основы автоматизированного проектирования оборудования штанговой скважинной насосной установки.** – Квалификационный научный труд на правах рукописи.

Диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук по специальности 05.05.12 – машины нефтяной и газовой промышленности. – Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, МОН Украины, Ивано-Франковск, 2020.

Диссертация посвящена решению актуальной научно-методологической проблемы эффективного проектирования оборудования комплексно-работоспособной штанговой скважинной насосной установки (ШСНУ). Развита принципы построения статистических моделей отказов штанговых колонн и имитационных параметрических моделей оборудования ШСНУ, в частности: компонентно-ориентированных моделей ШСНУ на языках Modelica и Python; конечно-элементных моделей резьбовых соединений скважинного оборудования, прессового соединения стеклопластиковой штанги, штанг и труб с дефектами и стеклопластиковым бандажом; гидродинамических моделей протектора насосных штанг и клапана скважинного насоса. На основе междисциплинарного анализа закономерностей сложных систем разработана абстрактная модель информационной системы для проектирования оборудования и поддержки жизненного цикла ШСНУ и предложены принципы её реализации в виде многоагентной системы с моделями и базой знаний. Предложены пути исследования и усовершенствования оборудования ШСНУ, оптимизации и рационального выбора значений его параметров.

Ключевые слова: штанговая скважинная насосная установка, работоспособность, насосные штанги, насосно-компрессорные трубы, резьбовое соединение, статистическая модель, имитационная модель, компонентно-ориентированное моделирование, метод конечных элементов, напряженно-деформированное состояние, усталостная прочность, управление жизненным циклом изделия, автоматизированное проектирование, информационная система, язык программирования Python.

ANNOTATION

Kopei V. B. Scientific and methodological bases of computer-aided design of equipment for a sucker rod pumping unit. – Qualification scientific work with the manuscript copyright.

The dissertation for a doctor technical sciences degree in speciality 05.05.12 – machines of oil and gas industry. – Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ministry of Education and Science of Ukraine, Ivano-Frankivsk, 2020.

Using a systems approach and computer modeling methods, an integral set of scientific and methodological solutions, to solve the important problem of effective research and design of equipment of a sucker-rod pumping unit (SRPU) with integrated operability, has been proposed. On the basis of these solutions, the operation of the SRPU equipment in the conditions of static, cyclic and vibrational loading was investigated; dependences of its operability indicators on design, technological and operational parameters are obtained, and based on this, recommendations for the integrated ensuring of its operability are given. The results of the research could be easily implemented.

On the basis of inductive methods of self-organization of models, principles for constructing accurate and robust statistical models of failures of sucker rods and polished rods have been developed: models of the probability density of failures as a function of the relative depth of breakage and models of the sucker rod string accident rate, taking into account many factors associated with the parameters of the SRPU and its failures. The efficiency of application of decision trees ensembles for predicting the failure rate of sucker rod strings by oilfield failure statistics has been substantiated.

The principles of component-oriented modeling of SRPU have been developed. They aimed at: modeling factors that are distributed non-uniformly along the rod string; simplifying the creation of models and their development; using by a large community of users; integrating into the information system. In particular, parametric models of SRPU have been developed: a model based on abstract automata and the Python language with the ability to simulate phenomena that are difficult to formulate with differential equations; a Modelica-model that uses standard translational mechanical components to model the rod string. Algorithmic foundations and implementation of a software framework in the Python language for creating component-oriented, like Modelica-models, acausal models of SRPU and other dynamic systems without the need for specialized modeling languages have been developed. The adequacy of the models and examples of their application for simulating fiberglass strings and near-resonance frequencies of strokes are shown.

On the basis of well-known free and commercial CAD-systems and modeling systems for hydrodynamics and solid mechanics and software components developed by the author, principles for the construction and the use of parametric geometric and finite element models and applied CAD-systems of problem parts and subassemblies of SRPU, which have the ability to easily integrate into an information system and can be used for comprehensive analysis and optimization in operability research and design, are proposed. In particular, the following have been developed: hydrodynamic finite element models (FE-models) of a ball check valve of a downhole sucker rod pump and a sucker rod protector; geometric models and FE-models of threaded connections – coupling

connection of sucker rods, double-shoulder connection of hollow sucker rods, tubing coupling, models of threaded connections with arbitrary geometric deviations; FE-model of the press connection of the fiberglass sucker rod body with a steel head; geometric models and FE-models of rods and tubing with corrosion and fatigue defects and fiberglass bandages. With the help of the developed models, the assessment of the influence of the design, technological and operational parameters of the SRPU downhole equipment on its operability indicators, in particular, characterizing its static and fatigue strength, leaktightness and vibration resistance, was investigated and refined. The ways of research and improvement of the SRPU equipment, optimization and rational choice of the values of its parameters are proposed. In particular, according to the criteria of static and fatigue strength, the design of the connection of the fiberglass rod body with the rod head, threaded connections of rods, connections of hollow rods was improved; dependencies for choosing the optimal make-up torque for rods and tubing connections were obtained; an analysis of threaded connections of tubing under conditions of harmonic high-frequency loading was performed.

An approach to the construction of expert systems on the problems of the reliability of threaded connections of SRPU, which describe the factors, affecting reliability, and allow a logical inference of new knowledge, is proposed. The approach is based on semantic networks, predicate logic, OWL language and the use of object-oriented constructs of the Python language to create classes, individuals, attributes, and relations of an ontology. Its main advantages are simple integration into another system, the flexibility and wide capabilities of the Python language, easy expansion of the system's functionality, in particular, the ability to create your own ways of knowledge representation and reasoning.

Based on the interdisciplinary analysis of regularities of complex systems, an abstract model of the information system for equipment design and SRPU life cycle support (IS) has been developed. The model by dichotomous division of the product lifecycle identifies the classes of IS components (models, simulation results, knowledge base facts, etc.) and their hierarchy, and also has the basic regularities of complex systems. On the basis of this model, the methodological foundations of computer-aided design of equipment and information support of the SRPU lifecycle, as well as the principles of building an IS, which belongs to the class of multi-agent systems, has the regularities of complex systems, in particular, capable of its easy expansion and integration of heterogeneous elements, have been developed.

Keywords: sucker rod pumping unit, operability, sucker rods, tubing, threaded connection, statistical model, simulation model, component-oriented modeling, finite element method, stress-strain state, fatigue strength, product lifecycle management, computer aided design, information system, Python programming language.