

522.24.033(043)
A86

**ІВАНО-ФРАНКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ НАФТИ І ГАЗУ**

Артим Володимир Іванович

УДК 620.178.3

**ПІДВИЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ НАДІЙНОСТІ
ТРУБНИХ І ШТАНГОВИХ КОЛОН ДЛЯ БУРІННЯ
ТА ВИДОБУВАННЯ НАФТИ І ГАЗУ**

Спеціальність 05.05.12 – машини нафтової та газової промисловості

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук



Івано-Франківськ – 2010

Дисертацією с рукопис

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

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
Івасів Василь Михайлович,
Івано-Франківський національний технічний
університет нафти і газу,
професор кафедри нафтогазового обладнання,
лауреат Державної премії України
в галузі науки і техніки.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Лисканич Михайло Васильович,
Івано-Франківський національний
технічний університет нафти і газу,
професор кафедри теоретичної механіки;

доктор технічних наук, професор
Бойко Анатолій Іванович,
Національний університет біоресурсів і
природокористування України

юпетровськ,

Захист
спеціалізація
технічна
76019,

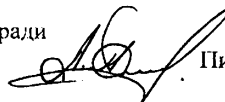
на засіданні
національному

З дисертації
Франківський
адреса:

Івано-Франківський
і газу за

Автор:

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради
кандидат технічних наук, доцент



Пилипів Л.Д.



ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Забезпечення надійної роботи деталей машин є складною і багатоплановою задачею. Її можна вирішити тільки шляхом поєднання зусиль на окремих етапах: від стадії проектування, де закладається надійність, через стадію виготовлення, де вона забезпечується технологічно, до стадії експлуатації, де надійність повинна реалізуватися. Слід враховувати механізми руйнування матеріалів, які можуть проявити себе під час експлуатації, такі як, у першу чергу, втомні процеси, часто поєднані з корозією. Однак, незважаючи на величезну кількість теоретичних і експериментальних досліджень, які проводилися і проводяться в усіх розвинутих країнах, і значний прогрес у розумінні процесів руйнування, аварії, пов'язані з корозійною втомою, все ще є звичайним явищем. Статистичні дані свідчать, що понад 90% усіх руйнувань інженерних конструкцій, що трапляються у світі, є безпосереднім наслідком втомних і корозійно-втомних процесів. Тому проблема підвищення експлуатаційної надійності машин, які працюють в умовах корозійної втоми є актуальною, особливо для відповідальних деталей, руйнування яких може призвести до важких аварій. Це повністю стосується трубних і штангових колон, аварії з якими пов'язані зі значними матеріальними збитками.

Проблема підвищення експлуатаційної надійності трубних і штангових колон для буріння та видобування нафти та газу нерозривно пов'язана з проблемою оцінки їх навантажування. Особливістю роботи елементів трубних і штангових колон є надзвичайно складний характер навантажування, пов'язаний, у першу чергу, із його нестационарністю та багаточастотністю. Це значно ускладнює оцінку довговічності і залишкового ресурсу колон, що спричинено відсутністю ефективних, науково обґрунтованих методів оцінки корозійно-втомного пошкодження деталей машин, які працюють у таких складних умовах. Крім цього, на сьогоднішній день у світі немає загальноприйнятих теоретичних методів, які б давали можливість адекватно змоделювати навантаження елементів трубних і штангових колон. Зважаючи на складність проблеми, жодним теоретичним методом неможливо врахувати всі важливі чинники, більшість з яких має випадковий характер. Тому актуальним і важливим як для теорії, так і практики питанням є оцінка експлуатаційної навантаженості колон.

Отже, проблема підвищення експлуатаційної надійності трубних і штангових колон для буріння та видобування нафти вимагає розв'язку комплексу задач з розроблення ефективних методів оцінки корозійно-втомної довговічності та залишкового ресурсу колон за їх експлуатаційною навантаженістю, що і є метою даної дисертаційної роботи.

Великий внесок у розвиток обраного напрямку внесли такі відомі вітчизняні та закордонні вчені як Баграмов Р.О., Вірновський О.С., Вудс Г., Дреготеску Н.Д., Дубленич Ю.В., Ібрагімов І.Х., Івасів В.М., Карпаш О.М., Копей Б.В., Крижанівський Є.І., Круман Б.Б., Лачінян Л.А., Лубінський А., Малько Б.Д.,

Міле К., Похмурський В.І., Почтенний Є.К., Саркісов Г.М., Сароян О.Е., Сергєєв С.Т., Слоннеджер Д., Харченко Є.В., Фасрман І.Л. та інші.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційну роботу виконано в межах наукового напрямку Національної програми "Ресурс" (постанова Кабінету Міністрів від 08.10.04 р. № 1331).

Окремі розділи дисертації розроблялися під час виконання науково-дослідних тем:

Д-1-07-Ф "Дослідження нових енергоресурсозберігаючих, екологічнобезпечних технологій видобування та транспортування вуглеводнів" (Державний реєстраційний № 0107U001558);

Д-9-10-Ф "Удосконалення наукових основ управління технологічними процесами видобування та транспортування нафти і газу з мінімальними енергозатратами" (Державний реєстраційний № 0110U000145);

Д-9/04-П "Розробка наукових технологій подовження ресурсу та підвищення ефективності роботи нафтогазового обладнання" (Державний реєстраційний № 0104U004087);

11-102-6 "Розробка методу прогнозування залишкового ресурсу та критичних деформацій газопроводів за допомогою індикаторів навантаження після ремонту його ділянок" (Державний реєстраційний № 0103U001613);

27-2003 "Розроблення СОУ "Оцінка фактичної навантаженості і прогнозування залишкового ресурсу підводного трубопроводу" ДАТ "Чорноморнафтогаз" (Державний реєстраційний № 0103U007204);

9/1069-НТП "Розробка методики та засобів аналізу технічного стану глибинного обладнання СШНУ на основі ідентифікації діаграми навантаження".

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є підвищення експлуатаційної надійності трубних і штангових колон для буріння та видобування нафти шляхом розроблення ефективних методів оцінки корозійно-втомної довговічності та залишкового ресурсу колон за їх експлуатаційною навантаженістю.

Для реалізації поставленої мети потрібно вирішити такі **завдання**:

- дослідити сучасний стан проблеми підвищення експлуатаційної надійності трубних і штангових колон для буріння та видобування нафти;
- дослідити процес навантажування елементів бурильних і штангових колон за допомогою удосконалених методик та засобів його оцінки;
- оцінити вплив викривленості свердловин на циклічну навантаженість бурильних і штангових колон;
- дослідити процес накопичення втомного і корозійно-втомного пошкодження в елементах бурильних і штангових колон;
- розробити методи комплексної оцінки впливу навантажування на втомне і корозійно-втомне пошкодження елементів бурильних і штангових колон.

Об'єктом досліджень є втомне і корозійно-втомне пошкодження елементів трубних і штангових колон.

Предмет досліджень – вплив навантажування трубних і штангових колон на їх експлуатаційну надійність.

Методи досліджень. Дослідження проводились за допомогою комплексного методу, що полягає в сумісному використанні фізичного, математичного та комп'ютерного моделювання об'єкта досліджень та експериментальних методів для підтвердження адекватності отриманих результатів на діючому обладнанні та на лабораторних установках. Отримані основні положення дисертації, що складають наукову новизну, сформульовані висновки і рекомендації науково обґрунтовано із залученням математичних методів теорії диференціальних рівнянь, кінетичної теорії втоми, статистичних методів обробки й аналізу результатів експериментальних досліджень.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Уперше розроблено чотирипараметричне рівняння кривої корозійної втоми, яке відрізняється запропонованим рівнянням нижньої гілки та дає змогу проводити розрахунок назначеного ресурсу елементів трубних і штангових колон з урахуванням корозійно-втомного пошкодження за дії характерних для елементів колон циклів напружень з амплітудами, нижчими за умовну границю корозійної витривалості.

2. Уперше розроблено розрахунково-експериментальний метод оцінки залишкового ресурсу трубних і штангових колон за допомогою запропонованої системи рівнянь для визначення еквівалентних за пошкоджуючою дією напружень та кількості циклів навантажування, який дає змогу розрахувати залишковий ресурс елементів колон за результатами досліджень натурних зразків з різним ступенем накопиченого корозійно-втомного пошкодження.

3. Удосконалено розрахунково-експериментальний метод оцінки навантаженості трубних і штангових колон за допомогою індикаторів навантаження, який ґрунтується на використанні закономірностей кінетики зниження границі витривалості індикаторів, виділенні певної кількості рівнів амплітуд напружень і визначенні за запропонованою системою рівнянь на кожному рівні еквівалентної за пошкоджуючою дією кількості їх циклів, що дає змогу проводити поточну інтегральну оцінку навантаженості колон.

4. Удосконалено метод підсумовування втомних пошкоджень елементів трубних і штангових колон за випадкового навантажування, особливістю якого є використання окремих коефіцієнтів впливу на відхилення від лінійної гіпотези накопичення пошкодження багаточастотності та розподілу амплітуд на окремих частотах, що дає змогу врахувати дані чинники під час розрахунків експлуатаційної надійності трубних і штангових колон.

5. Удосконалено метод схематизації випадкового процесу навантажування, який полягає у визначенні екстремумів за поетапного згладжування процесу шляхом заміни висхідних розмахів на їх середні значення і дає змогу врахувати розподіл амплітуд у часі та багаточастотність випадкового процесу навантажування трубних і штангових колон.

6. Удосконалено метод приведення асиметричних циклів напружень з середнім напруженням розтягу до симетричних з використанням запропонованих кусково-лінійних рівнянь для оцінки чутливості матеріалу до асиметрії циклів, що дає змогу проводити розрахунок довговічності елементів трубних і штангових колон в умовах дії типового для них низькоамплітудного асиметричного навантаження.

Практичне значення одержаних результатів.

Практичне значення одержаних результатів полягає в:

- розробці удосконаленого засобу вимірювання навантажень у верхній частині штангової колони, який дає змогу виділяти високочастотні цикли навантажень і проводити безпосередній запис результатів вимірювань для їх комп'ютерної обробки (патент України № 21964). Засіб упроваджено в НГВУ “Надвірнанафтогаз” ВАТ “Укрнафта”, а також у навчальному процесі на кафедрі нафтогазового обладнання ІФНТУНГ з дисципліни “Машини і обладнання для видобутку нафти і газу”;

- розробці удосконалених методик розрахунку напружено-деформованого стану елементів трубних і штангових колон на викривлених ділянках свердловини з урахуванням розтягу. Теоретичні та експериментальні дослідження використано при розробленні керівних документів: „Інструкція по розрахунку і вибору колони насосних штанг”, впровадженій у ГПУ „Полтавагазвидобування”, Надвірнянському та Чернігівському НГВУ ВАТ “Укрнафта”; „Інструкція по забезпеченню надійності бурильної колони на викривлених ділянках свердловини при комбінованому способі буріння”, впровадженій у ДАТ “Чорноморнафтогаз”.

- оцінці параметрів кінетичних кривих корозійної втоми насосних штанг з різним пошкодженням (0, 4, 8 років експлуатації на глибині 1000 м), що можуть використовуватися під час розрахунку назначеного і залишкового ресурсу штангових колон за їх експлуатаційним навантаженням;

- удосконаленні методик проведення та оброблення результатів експериментальних досліджень з оцінки параметрів кінетичних кривих корозійної втоми елементів трубних і штангових колон.

Теоретичні методи оцінки експлуатаційної надійності трубних і штангових колон впроваджено в навчальному процесі на кафедрі технології нафтогазового машинобудування ІФНТУНГ з дисципліни “Методи забезпечення точності і надійності в машинобудуванні” і кафедрі комп'ютеризованого машинобудівного виробництва ІФНТУНГ з дисципліни „Технологічні методи забезпечення якості виробів”.

Положення, що виносяться на захист:

- 1) методи підсумовування корозійно-втомних пошкоджень і схематизації випадкового процесу навантажування елементів трубних і штангових колон;
- 2) чотирипараметричне рівняння кривої корозійної втоми, яке дає змогу проводити розрахунок назначеного ресурсу елементів трубних і штангових колон з урахуванням корозійно-втомного пошкодження за дії характерного для елементів колон низькоамплітудного навантаження;

- 3) розрахунковий метод урахування впливу параметрів низькоамплітудного навантаження з середнім напруженням розтягу при розрахунках ресурсу бурильних і штангових колон;
- 4) розрахунково-експериментальні методи оцінки залишкового ресурсу бурильних і штангових колон за результатами досліджень натурних зразків з різним ступенем накопиченого корозійно-втомного пошкодження та оцінки навантаженості елементів бурильних і штангових колон за допомогою індикаторів навантаження.

Особистий внесок здобувача.

Із наукових праць, які опубліковано у співавторстві, на захист винесено їх основні частини, розроблені особисто дисертантом. Зокрема, [1] – розроблення і обґрунтування методу вкладених циклів; [2] – оцінка впливу низьких напружень на накопичене пошкодження матеріалу бурильних труб; [3] – розроблення блоку навантаження, оцінка результатів; [4] – розроблення методу оцінки залишкового ресурсу довгомірних об'єктів за результатами досліджень моделей-“вирізок”; [5] – розроблення методу підсумовування втомного пошкодження за випадкового навантажування; [6], [20], розроблення принципової схеми визначення положення бурильної колони; [7] – розроблення методики оцінки довговічності та залишкового ресурсу довгомірних об'єктів; [8] – розроблення програмного забезпечення для розрахунку довговічності з урахуванням зниження границі витривалості; [9], [31] – удосконалення методу урахування асиметрії циклу під час розрахунків на довговічність; [10] – проведення експериментальних досліджень та аналіз результатів; [11] – розроблення методу оцінки залишкового ресурсу насосних штанг за кінетичними кривими втоми; [12] – аналіз результатів тарування удосконаленого динамографа; [13], [37] – оцінка впливу навантаженості на довговічність насосних штанг; [14] – розроблення методики прогнозування залишкового ресурсу за кінетичними кривими втоми; [15] – аналіз відмов колони насосних штанг за відносною глибиною; [16] – розроблення рівняння нижньої гілки кривої корозійної втоми; [21] – Розроблення програмного забезпечення для чисельного розв'язку рівнянь розрахунку напружень згину; [22] – оцінка циклічного навантаження різбових з'єднань бурильних труб; [26], [38] – обґрунтування розробленого рівняння кривої корозійної втоми; [27] – розроблення програми і проведення випробувань, аналіз результатів досліджень довговічності бурильних труб; [32] – розроблення удосконаленої методики урахування низькоамплітудних циклів напружень при розрахунках на довговічність; [34] – обґрунтування доцільності використання методу вкладених циклів для розрахунків довговічності за випадкового навантажування; [35] – обґрунтування методу підсумовування втомних пошкоджень за багаточастотного випадкового навантажування; [36] – розроблення програмного забезпечення для оцінки параметрів динамограми за використання удосконаленого динамографа.

Методики, аналітичні і емпіричні залежності, комп'ютерні програми для виконання розрахунків і отримані результати, які виносяться на захист, належать

особисто автору. Усі винаходи, зроблені в ході виконання роботи, є результатом колективної творчості.

Апробація результатів дисертації. Основні результати роботи доповідались та обговорювались на: 6, 7 Міжнародних симпозиумах українських інженерів-механіків (м. Львів, 2003, 2005); Міжнародних наукових конференціях (м. Бая-Маре, Румунія, 2003, 2004, 2006, 2008); II Міжнародній науково-технічній конференції “Проблеми динаміки і міцності в газотурбобудуванні” (м. Київ, 2004); Міжнародних науково-технічних конференціях „Інтегровані комп’ютерні технології в машинобудуванні” (м. Харків, 2003, 2005); 8 Міжнародній науково-практичній конференції „Нафта і газ України” (Судак, 2004); 2 Міжнародному симпозиумі “Hydrocarbons & Chemistry” (м. Гардея, Алжир, 2004); Міжнародній науково-практичній конференції до 40-річчя ІФНТУНГ (м. Івано-Франківськ, 2007); Міжнародній науково-практичній конференції „Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи його діагностування і прогнозування” (Тернопіль, 2009).

Дисертація в повному обсязі доповідалась та обговорювалась на науковому семінарі кафедр “Буріння нафтових і газових свердловин” і “Нафтогазове обладнання” ІФНТУНГ і науково-технічному семінарі кафедр “Обладнання нафтових і газових промислів” і “Видобування нафти і газу та геотехніки” Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка.

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано 38 робіт, з яких 26 статей у фахових виданнях України, 3 – патенти України, 9 – у збірниках праць та тез міжнародних конференцій.

Структура дисертації.

Дисертація складається із вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел, що містить 267 найменувань на 29 сторінках, та 3 додатків на 68 сторінках. Робота містить 112 рисунків (9 – на окремих сторінках) та 17 таблиць (2 – на окремих сторінках). Загальний обсяг дисертації – 281 сторінка.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовані мета роботи, задачі та методи досліджень, наукова новизна, практичне значення отриманих результатів, а також перелік місць апробації роботи.

У **першому розділі** досліджено сучасний стан проблеми підвищення експлуатаційної надійності трубних і штангових колон для буріння та видобування нафти.

Проведено аналіз аварійності бурильних і штангових колон. Аналіз показує, що домінуючими і найбільш небезпечними їх відмовами є руйнування через корозійно-втомні пошкодження. У першу чергу, це пов’язано з навантаженістю трубних і штангових колон, яка характеризується великою складністю як по довжині, так і в часі.

Зокрема, напруження, які виникають у бурильних колонах (БК) у процесі експлуатації, в більшості випадків є випадковими функціями часу. Специфікою процесу навантажування БК є чітко виражений блоковий характер. Так, можна виділити такі режими роботи БК: спуск, безпосередньо буріння, піднімання. Особливим режимом нерідко є також ремонтно-відновлювальні роботи, пов'язані зі значними перевантаженнями БК. З точки зору аварійності БК дія змінних напружень і, як наслідок, розвиток втомних процесів, має особливу небезпеку. Процес накопичення втомних пошкоджень, на відміну від зношування, не піддається візуальному контролю. За визначених умов період докритичного підростання тріщини може бути меншим, ніж прийнятий період дефектоскопії бурового інструмента. Характерною особливістю відмов такого типу є те, що вони мають вузьколокалізований характер і відбуваються раптово.

Навантажування штангової колони (ШК), на відміну від навантажування БК, не має чітко вираженого блокового характеру, особливо при роботі у малодобітних свердловинах, характерних для України. Але структура процесу надзвичайно складна. На основну детерміновану складову ваги колони штанг (з вагою і без ваги суміші в колоні насосно-компресорних труб) накладається вібраційна, практично випадкова, складова з великим розкидом значень як амплітуд, так і частот. Слід відмітити ще й значний вплив локальних циклічних напружень згину на викривлених ділянках, який є основною причиною корозійно-втомного руйнування ШК у нижній, менш напруженій осьовими силами частині.

Таким чином, особливістю експлуатації трубних і штангових колон є те, що вони підлягають впливу нестационарного навантажування з дуже складною структурою.

Тому проведено аналіз сучасних наукових напрямків до вирішення проблеми оцінки довговічності деталей та елементів конструкцій, які працюють в умовах складного нестационарного навантажування.

Проведений аналіз показав, що на сучасному етапі немає загальноприйнятої дієвої методики оцінки довговічності деталей машин, які працюють в умовах випадкових навантажуваль, особливо зі складною структурою (наприклад, широкосмугові нестационарні випадкові процеси, характерні для трубних і штангових колон). Тому питання розроблення методів, які б дозволили враховувати складність процесу навантажування при розрахунках довговічності, має велику наукову і практичну цінність.

Таким чином, для підвищення експлуатаційної надійності трубних і штангових колон необхідним є проведення детальної оцінки навантаженості і розроблення більш досконалих методів прогнозування їх довговічності та залишкового ресурсу.

Другий розділ присвячено розробці методик та засобів експериментального дослідження навантаженості та довговічності трубних і штангових колон.

Для оцінки експлуатаційної навантаженості бурильної колони під час виконання спуско-піднімальних операцій проведено промислові експериментальні дослідження. Бурильну колону була оснащено спеціальним

перевідником з тензодавачами. Також визначались швидкість і напрям руху бурильної колони. Запис сигналів з давачів здійснювався на багатоканальному швидкодіючому самописці Н 338-4. Усі вимірні засоби пройшли відповідне тарування і налагодження.

Для оцінки навантаженості ШК розроблено захищений патентом України № 21964 удосконалений динамограф з індуктивним давачем малих переміщень. Давач вимірює зміну зазору між верхньою та нижньою планками силовимірального вузла і формує вихідний сигнал, який після обробки в аналого-цифровому перетворювачі поступає для обробки в ПЕОМ. Границя приведеної похибки вимірювання положення таким динамографом у робочому температурному діапазоні складає максимальнo 1,5 %.

Для розроблення методики і засобів оцінки навантаженості колон за допомогою індикаторів навантаження спроектовано і виготовлено випробну установку, яка дозволяє проводити випробування зразків у широкому діапазоні геометричних параметрів жорстким навантажуванням на консольний згин з регулюванням амплітуди деформації в межах 0...10 мм.

Також у розділі наведено методики експериментальних досліджень втомної та корозійно-втомної міцності елементів бурильної колони та насосних штанг.

У **третьому розділі** представлено результати аналітичних і експериментальних досліджень навантаженості трубних і штангових колон.

Експериментальні дослідження навантаженості бурильної колони під час виконання СПО було проведено на свердловині № 908 – Пасічна Надвірнянського управління бурових робіт, оснащеної буровою установкою “Уралмаш-4В”. Дослідження проводились під час спуску бурильної колони з довжиною бурильної колони від 1 свічі довжиною 37 м до 54 свічок загальною довжиною 2000 м та на різних швидкостях. Запис експлуатаційного навантажування на перевіднику здійснювався за загальної довжини БК 190 м, 500 м (рис. 1) і 1580 м.

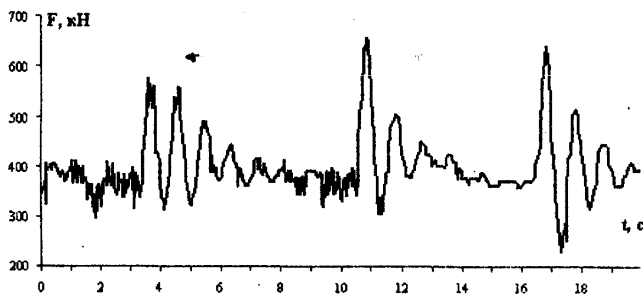


Рис. 1. Приклад запису навантажування у верхній частині бурильної колони під час спуску за довжини колони 500 м

Початковий аналіз записів експлуатаційного навантажування під час спуску показав значний розкид значень асиметрії циклів. Для довжини 190 м і, особливо, 500 м характерною особливістю також є значний вплив високочастотної складової з низькими амплітудами. За довжини 1580 м спостерігається значне збільшення кількості високоамплітудних напружень. Високочастотні напруження, характерні

для менших довжин, майже не спостерігаються. Це пояснюється тим, що при довжині БК 1580 м вже використовувалось гідравлічне гальмо, яке значно зменшує високочастотні коливання.

У розділі також представлені результати експериментальних досліджень навантаженості колони насосних штанг. Дослідження проводились на свердловинах Довбушансько-Бистрицького нафтового родовища, оснащених штанговими свердловинними насосними установками. На свердловинах записувались динамограми за допомогою гідравлічного динамографа ГДМ-3 та розробленої вимірювальної системи з використанням індуктивного давача малих переміщень. При цьому проводився запис діючих зусиль на протязі певного часу, що давало можливість оцінити сталість процесу навантаження. Приклад запису наведено на рис. 2.

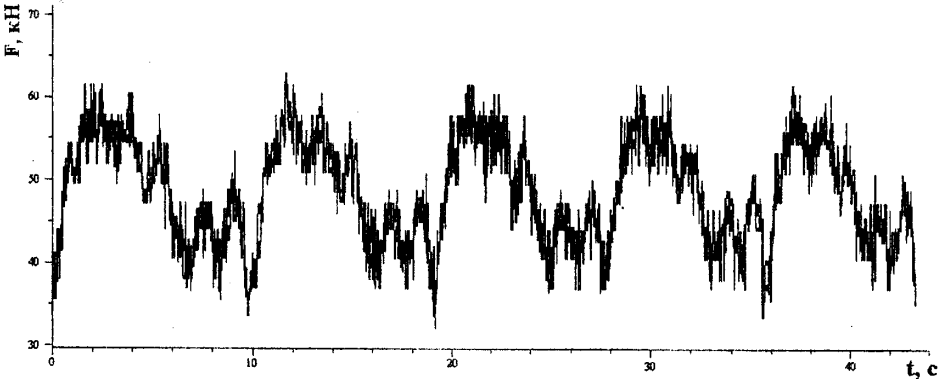


Рис. 2. Приклад запису навантаження верхньої частини штангової колони на свердловині № 90 Довбушансько-Бистрицького нафтового родовища

Як відомо, свердловини України характеризуються значною викривленістю. У такому випадку в процесі роботи, крім змінних напружень розтягу, БК і ШК підлягають впливу додаткових циклічних локальних напружень згину на викривлених ділянках. Тому однією із задач досліджень є визначення напружень у БК і ШК на викривленій ділянці з урахуванням поздовжніх сил розтягу.

З використанням розробленої методики чисельного розв'язку проведено оцінку впливу геометрії викривленої ділянки свердловини, зокрема, її кута φ і радіуса викривлення ρ на напруження згину ШК з урахуванням поздовжньої сили розтягу. Деякі результати розв'язку наведено на рис. 3.

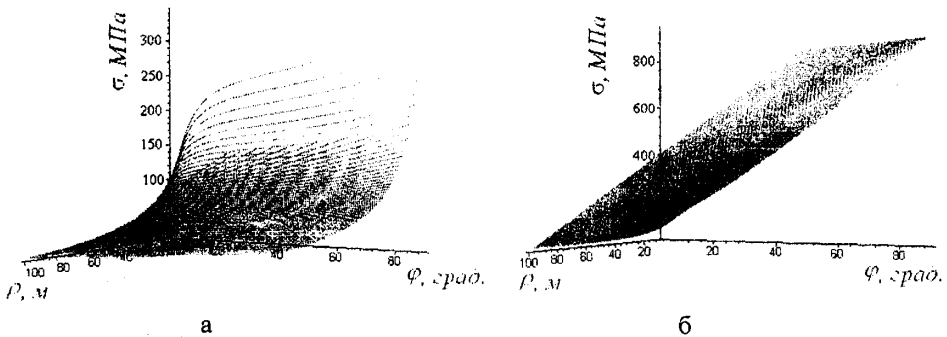


Рис. 3. Локальні напруження згину в ШК при силі розтягу: а – 1 Н; б – 500 Н.

Слід відмітити значний вплив напружень розтягу на амплітуду циклічних напружень згину, а отже, і на довговічність колони штанг на викривленій ділянці. Так, якщо напруження розтягу внизу колони будуть змінюватися від 0 до 1,8 МПа при силі розтягу 500 Н, то напруження згину на ділянці з кутом викривлення 20° і радіусом 50 м – від 50,7 до 207,3 МПа. Таким чином, амплітуда згинаючих напружень досягає 78,3 МПа, що може служити основною причиною корозійно-втомного руйнування колони у нижній частині на викривлених ділянках.

Проведено аналітичні дослідження з визначення сил та напружень в БК на викривленій ділянці з урахуванням розтягу і зазору між БК і стінкою свердловини. Розроблено критерій вибору положення бурильної колони на викривленій ділянці свердловини. Показано, що нехтування силами розтягу та неспівпадінням осі свердловини і бурильної колони може призвести до похибок при розрахунках напружено-деформованого стану та довговічності бурильних труб. Так, наприклад, визначено напруження у поперечному перерізі бурильних труб ТБПК 127 (товщина стінки 8 мм) у криволінійному стовбурі свердловини діаметром 295,3 мм. За відстані від нейтрального перерізу до початку криволінійної ділянки $L_{пл} = 250$ м колона буде доторкатися до нижньої частини стінки свердловини по всій довжині. У цьому випадку напруження згину становить 9,5 МПа. За збільшення $L_{пл}$ до 260 м, сила розтягу зростає і стає достатньою для відриву колони від стінки свердловини. Напруження зростає до 11,9 МПа. За подальшого збільшення $L_{пл}$ (понад 260 м), сила розтягу спричиняє контакт бурильної колони із верхньою частиною стовбура свердловини, а величина напружень збільшується від 15,2 до 40,2 МПа за збільшення $L_{пл}$ до 300 м. За роторного буріння такі циклічні напруження становлять небезпеку прискореного корозійно-втомного руйнування БК, що слід враховувати під час їх експлуатації.

Проведені в роботі теоретичні та експериментальні дослідження використано при розробленні керівних документів: „Інструкція по розрахунку і вибору колони насосних штанг” та „Інструкція по забезпеченню надійності

бурильної колони на викривлених ділянках свердловини при комбінованому способі буріння”.

У четвертому розділі наведено результати дослідження закономірностей накопичення корозійно-втомного пошкодження елементів колон в умовах випадкового процесу навантажування.

Слід відмітити, що у випадку складного випадкового процесу навантажування спостерігаються найбільші розбіжності між теоретичними розрахунками довговічності та залишкового ресурсу і експериментальними результатами. На нашу думку, в першу чергу це пов'язано з недостатнім урахуванням дії двох чинників. По-перше, це вплив послідовності амплітуд циклів напружень. У багатьох випадках таким впливом не можна нехтувати, наприклад, у випадку наявності в блоці навантажування високих, так званих пікових амплітуд напружень, або низьких амплітуд напружень, менших за границю витривалості. По-друге, значення відносного накопичення пошкоджень залежить від коефіцієнту широкосмуговості ε , а саме, його зменшення, тобто збільшення широкосмуговості і складності процесу навантажування, призводить до значного погіршення точності оцінки довговічності за існуючими методами підсумовування пошкоджень. Таким чином, необхідною передумовою створення більш універсального методу підсумовування втомних пошкоджень за складного широкосмугового навантажування є одночасне врахування впливу як послідовності амплітуд циклів напружень, так і багаточастотності процесу навантажування.

Тому для врахування складності процесу навантажування трубних і штангових колон запропоновано метод, який ґрунтується на роздільному врахуванні багаточастотності процесу і його складності на окремих частотах за допомогою окремих коефіцієнтів.

Сумарне пошкодження визначаємо за запропонованою формулою

$$Z_t = \sum_{j=1}^s K_{j1} \sum_{i=1}^p K_{j2} \frac{1}{N_{ij}}, \quad (1)$$

де s – кількість етапів схематизації;

p – кількість циклів напружень на етапі схематизації;

N_{ij} – кількість циклів напружень до руйнування за дії циклу напружень σ_{ij} ;

K_{j1} – коефіцієнт, який враховує вплив напружень попереднього рівня на даний ($K_{i1}=1$);

K_{j2} – коефіцієнт, який враховує нерівномірність амплітуд у часі всередині рівня.

У випадку підсумовування втомного і корозійно-втомного пошкодження елементів бурильних і штангових колон пропонуються рівняння, які враховують найбільший вплив на довговічність амплітуд циклів напружень найнижчих частот.

Аналіз свідчить, що для бурильної колони найбільш руйнівними є цикли напружень найнижчої частоти. Відповідно, рівняння має вигляд

$$Z_i = K_{21} \sum_{j=1}^p K_{22} \frac{1}{N_{i1}} + \sum_{j=2}^s \sum_{i=1}^p K_{j2} \frac{1}{N_{ij}}. \quad (2)$$

Для штангової колони через особливості кінематики приводу свердловинних штангових насосних установок найбільші амплітуди циклів напружень мають дві найнижчі частоти, і відповідне рівняння підсумовування мас такий вигляд:

$$Z_i = K_{21} \sum_{j=1}^p K_{22} \frac{1}{N_{i1}} + K_{31} \sum_{i=1}^p K_{32} \frac{1}{N_{i2}} + \sum_{j=3}^s \sum_{i=1}^p K_{j2} \frac{1}{N_{ij}}. \quad (3)$$

Якщо прийняти в першому наближенні всі $K_j \approx 1$, то дані рівняння будуть відповідати рівнянню Майнера. Тому основну увагу слід спрямувати на визначення K_j . Суть пропонованих коефіцієнтів полягає у виділенні найбільш суттєвих ознак реального процесу широкосмугового навантажування.

Визначення K_{21} , K_{31} і т.д. можна провести з аналізу двочастотних процесів, де накопичено вже значну кількість інформації. У загальному випадку для визначеного матеріалу $K_{j1} = F\left(\frac{\omega_j}{\omega_{j-1}}, \frac{\sigma_j}{\sigma_{j-1}}\right)$.

Визначення коефіцієнта K_j значно полегшується при наявності інформації про матеріал, а саме його реакції на зміну напружень. Доцільно поділити усі матеріали за такими ознаками:

1. Матеріал не реагує на зміну напружень в процесі навантажування і для нього усі $K_j \approx 1$, тобто формула Майнера справедлива в усіх випадках.

2. Матеріал реагує на зміну напружень, але загальна реакція на зміну σ_j на σ_2 і навпаки зрівноважується. Для такого випадку $K_{j2} \approx 1$, а $K_{j1} \neq 1$ при $\sigma_j \neq \sigma_{j-1}$.

3. Матеріал реагує на зміну навантаження. Тоді $K_{j1} \neq 1$, а $K_{j2} = F(\overline{\sigma_j}, D\sigma_j) \neq 1$ і його вплив тим більший, чим більше значення $\frac{D\sigma}{\sigma}$ – варіація процесу.

Для реалізації розробленого методу підсумовування пошкоджень складним є вже перший етап, на якому проводиться схематизація випадкових навантажувальних з приведенням їх до еквівалентних за пошкоджуючою дією закономірних чи блокових. На сучасному етапі поки що немає загальноприйнятої методики вирішення цієї задачі. Існуючі методи схематизації (екстремумів, розмахів, викидів, повних циклів, “дощу” тощо) дають різні розподіли навантажень.

Урахування одночасно історії навантажування та широкосмуговості процесу традиційними методами схематизації є неможливим через їх орієнтацію на розподіл величин амплітуд без визначення їх послідовності (метод повних циклів, “дощу”) чи без врахування широкосмуговості процесу (метод розмахів, метод екстремумів, метод викидів).

У найбільшій мірі поставленій меті відповідає метод, запропонований Є.К.Почтенним спочатку для двочастотного процесу, а пізніше розвинутий для

багаточастотного навантажування. Поетапне виділення максимумів процесу, запропоноване в даному методі, дозволяє провести аналіз процесу як з точки зору послідовності амплітуд, так і широкосмуговості, яка враховується кількістю виділених етапів схематизації. Але даний метод не дає можливості в достатній мірі дослідити структуру процесу, особливо у випадку складного багаточастотного навантажування з випадковими істотно різними амплітудами. При врахуванні тільки максимумів такого процесу існує можливість спотворення реальної картини процесу, особливо завищення середнього напруження циклу σ_{mi} на найбільш низьких виділених частотах.

Найбільш істотно реальна картина процесу відрізняється від схематизованої у двох випадках:

$$\sigma_{\max i} = \text{const}; \sigma_{mi} \cong \text{var}. \quad (4)$$

$$\sigma_{\max i} = \text{var}; \sigma_{mi} \cong \text{const}. \quad (5)$$

За умов (4) даний метод схематизації призводить до зниження реальної складності процесу навантажування. Врахування тільки максимумів процесу не дає можливості оцінити його низькочастотні складові, які можуть суттєво впливати на довговічність деталей при такому характері випадкового навантажування.

У випадку (5) ситуація є протилежною і схематизація за даним методом показує високу складність структури випадкового процесу. Але такий процес характеризується складністю розподілу послідовності амплітуд, а не самої структури. Такий випадковий процес повинен описуватися одноетапною схематизацією, а вже сама складність розподілу амплітуд в часі повинна враховуватися під час аналізу схематизованого процесу. Виділення ж великої кількості низькочастотних складових тільки ускладнює аналіз.

Тому для одночасного врахування впливу як послідовності амплітуд циклів напружень, так і багаточастотності процесу навантажування, розроблено метод схематизації шляхом поетапного виділення середніх значень амплітуд.

Суть методу полягає в наступному. Початковим етапом схематизації є, як і для інших методів, визначення екстремумів процесу $\sigma_{extr i}$. Потім для кожного із сусідніх півциклів визначається амплітуда σ_{ai}^I та середнє значення σ_{mi}^I . Це дає можливість визначити послідовність амплітуд на першій найбільш високій частоті процесу.

На другому етапі розглядається процес, де точками виступають вичислені раніше середні значення σ_{mi}^I . Для цього процесу визначаються екстремальні значення, а інші точки процесу з подальшого розгляду відкидають. Знову визначаються, як і для першого етапу, σ_{ai}^{II} і σ_{mi}^{II} . Таким чином, ми отримуємо розподіл амплітуд та їх послідовність на другій, більш низькій частоті.

Таку процедуру повторюють до того стану, поки на якомусь етапі різниця між максимальним і мінімальним значенням процесу не стане меншою за якусь

наперед визначене значення $[\Delta\sigma]$, наприклад, $[\Delta\sigma] = 0,2\sigma_{-1}$; або не залишаться 2-3 екстремальні точки.

Даний метод позбавлений недоліків, описаних раніше. Так, за умов (4) метод дає більш складну структуру процесу, а за умов (5) – менш складну.

Використання розробленого методу апробовано на прикладі випадкового процесу, для якого проведено схематизацію також згідно з методами “дощу”, повних циклів та врахування одного екстремуму між сусідніми перетинами середнього рівня. Аналіз показав досить близьку відповідність розподілів, отриманих згідно з пропонованим методом і методом “дощу”, який на сьогоднішній день рахується найбільш прийнятним при розрахунках. Але головною перевагою запропонованого методу схематизації є одержання розподілу в часі амплітуд напружень при одночасному визначенні реальної складності структури процесу. Це дає можливість більш повно враховувати історію навантажування та складність структури процесу при розрахунках на довговічність. Таким чином, **підтверджено перше положення, що захищається.**

Процеси навантажування трубних і шлангових колон характеризуються великою асиметрією циклів напруження. У такому випадку за використання рівняння (1) існує проблема оцінки їх пошкоджуючої дії. У зв'язку з тим, що переважно більшість експериментів з визначення параметрів опору втомі елементів колон проводять за симетричного циклу напружень, необхідним етапом є приведення асиметричних циклів до еквівалентних за пошкоджуючою дією симетричних.

Для розрахункового приведення вищих за відповідну границю витривалості асиметричних напружень з коефіцієнтом асиметрії $-1 < R \leq 0$ до симетричних пропонується, виходячи із закономірностей кінетики втомного пошкодження та лінійної залежності характеристики кута нахилу кривої втомі від асиметрії навантаження, використовувати отримане наступне рівняння

$$\sigma_{ekv} = \sigma_{\max} \cdot \left(1 - (1 - \psi) \frac{1 + R}{2} \right), \quad (6)$$

де σ_{ekv} – максимальне напруження симетричного циклу, яке еквівалентне за пошкодженням асиметричному з максимальним напруженням σ_{\max} і коефіцієнтом асиметрії R ;

$$\psi = \frac{2\sigma_{-1}}{\sigma_0} - 1 - \text{коефіцієнт чутливості до асиметрії навантаження};$$

σ_{-1}, σ_0 – границі витривалості при симетричному і віднульовому циклах напружень відповідно.

Аналіз великої кількості експериментів з визначення параметрів опору втомі дає змогу стверджувати, що кут нахилу кривих з рівним ступенем пошкодження в області багатоциклової втомі задовільно описується коефіцієнтом ψ тільки за умови $-1 \leq R \leq 0$, а при $0 < R < 1$ кут нахилу збільшується при зменшенні N . Тому для більшої достовірності приведення

асиметричних циклів пропонується криві рівної пошкоджуваності апроксимувати двома прямими. Для напружень з $-1 \leq R \leq 0$ буде справедливим приведення згідно з (6). Для приведення ж циклів напружень з $0 < R < 1$ скористаємось особливістю діаграми Хейя, а саме тим, що всі криві з рівним ступенем пошкодження сходяться в точці $K(1,0)$. Схему приведення показано на рис. 4.

До симетричного циклу приводимо вище за відповідну границю витривалості асиметричне напруження, показане на рис. 4 точкою $A\left(\frac{\sigma_m}{\sigma_s}, \frac{\sigma_a}{\sigma_s}\right)$.

Для цього проводимо промінь, який виходить з точки $K(1, 0)$ через A до перетину з прямою $R=0$ (точка B). За аналогією з ψ приймемо

$$\psi_1 = -\frac{y(A) - y(K)}{x(A) - x(K)} = -\frac{y(B) - y(K)}{x(B) - x(K)}. \quad (7)$$

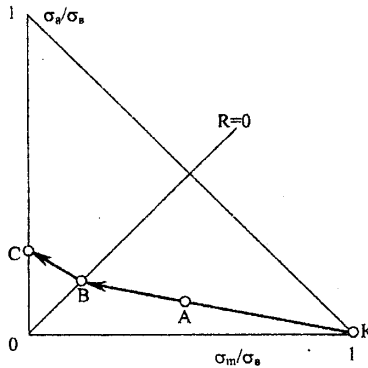


Рис. 4. Схема приведення до симетричного циклу напруження з $R > 0$

Тоді, враховуючи координати точок A і K та умову $\sigma_a(B) = \sigma_m(B)$, отримуємо рівняння

$$\psi_1 = \frac{\sigma_a}{\sigma_s - \sigma_{m1}} = \frac{\sigma_{\max}(1-R)}{2\sigma_s - \sigma_{\max}(1+R)}; \quad (8)$$

$$\sigma_{\max}(B) = 2\sigma_s \frac{\psi_1}{1+\psi_1}; \quad (9)$$

$$\sigma_{\text{екв}} = \sigma_s \psi_1 \frac{1+\psi}{1+\psi_1}. \quad (10)$$

Для обґрунтування можливості використання розроблених рівнянь приведення асиметричних циклів стосовно розрахунків довговічності елементів бурильних і штангових колон проведено аналіз отриманих реалізацій експлуатаційного навантажування бурильних і штангових колон за допомогою діаграми Хейя. Схематизацію процесів навантажування проведено за розробленим методом.

Так, на рис. 5 наведено загальний вигляд діаграми Хейя з накладеним процесом навантажування колони насосних штанг. Точками зображено виділені під час схематизації цикли напружень.

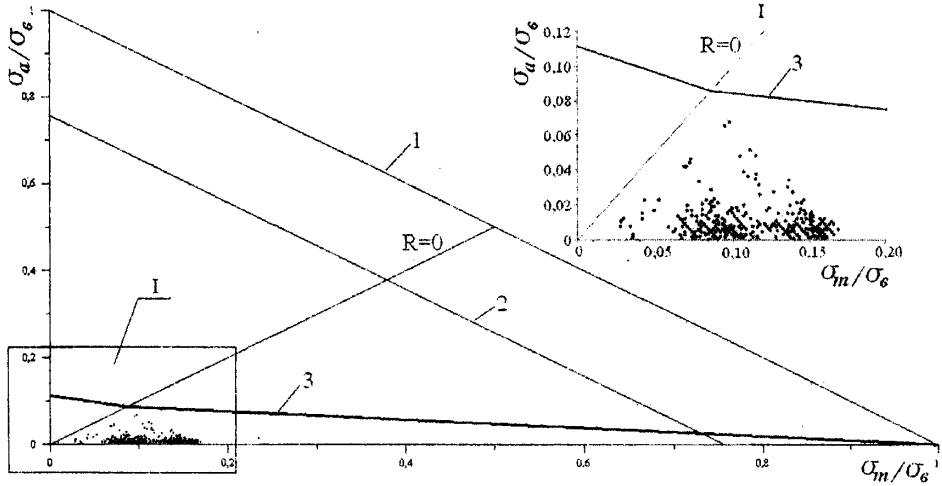


Рис. 5. Загальний вигляд діаграми Хейя

з процесом навантаження колони насосних штанг:

- 1 – лінія статичного руйнування $\sigma_{\max} = \sigma_{\epsilon}$; 2 – лінія границі плинності $\sigma_{\max} = \sigma_m$; 3 – лінія границі витривалості.

З діаграми видно, що характерною рисою процесу є відсутність циклів з амплітудами напружень, вищими за відповідну границю витривалості. Подібну картину спостережено і для процесів навантажування бурильної колони.

Таким чином, проведений аналіз процесів навантажування, які виникають під час експлуатації елементів бурильних і штангових колон, свідчить, що в спектрі напружень найбільше місце займають низькоамплітудні напруження з параметрами σ_{\max} , R , які не перевищують відповідну границю витривалості σ_R . Це вказує на необхідність розроблення уточнених методів приведення низькоамплітудних циклів навантажування для оцінки довговічності бурильних і штангових колон.

Для розроблення такого уточненого методу використано закономірності низькоамплітудного корозійно-втомного пошкодження й особливості побудови ліній однакової пошкоженості на діаграмі Хейя. Згідно з аналізом, для циклів напружень, нижчих за границю витривалості, прийнято модель лінійного зменшення коефіцієнта чутливості залежно від рівня навантаження. За даною моделлю виведено відповідні рівняння приведення. Так, для низькоамплітудного циклу напружень з коефіцієнтом асиметрії $0 < R < 1$

$$\sigma_{ekv} = \sigma_d \psi_1 \frac{1 + \psi_B}{1 + \psi_1}, \quad (11)$$

$$\text{де } \psi_B = \psi \cdot (1 + \psi) \cdot \frac{\sigma_a \cdot \psi_1}{\sigma_{-1} \cdot 1 + \psi_1}.$$

Для низькоамплітудного асиметричного циклу з коефіцієнтом асиметрії $-1 < R < 0$ маємо

$$\sigma_{ekv} = k \cdot x(B) \cdot (1 + x(B)), \quad (12)$$

$$\text{де } x(B) = \frac{k \cdot x(A) - 1 + \sqrt{[1 - k \cdot x(A)]^2 - 4k \cdot y(A)}}{2k};$$

$$k = \psi \frac{1 + \psi}{\sigma_{-1}}; \quad x(A) = \sigma_{\max} \frac{1 + R}{2}; \quad y(A) = \sigma_{\max} \frac{1 - R}{2}.$$

Для оцінки достовірності запропонованих рівнянь приведення проаналізовані результати експериментального дослідження зразків, виготовлених зі сталі 40ХН. Отримано такі параметри кривих втоми за рівнянням

$$N = N_0 \cdot \ln \left\{ 1 + \left[\exp \left(\frac{\sigma - \sigma_R}{V_R} \right) - 1 \right]^{-1} \right\}; \quad (13)$$

$$N_0 = 2 \cdot 10^6 \text{ цикли}; \quad \psi = 0,22;$$

$$\sigma_{-1} = 408 \text{ МПа}; \quad V_{-1} = 29,82 \text{ МПа} \text{ — для симетричного циклу навантаження};$$

$$\sigma_0 = 662 \text{ МПа}; \quad V_0 = 54,91 \text{ МПа} \text{ — для віднульового}.$$

На рис. 6 наведено криві втоми, побудовані за експериментальними дослідженнями, а також криві, побудовані з використанням рівнянь (6) і (10).

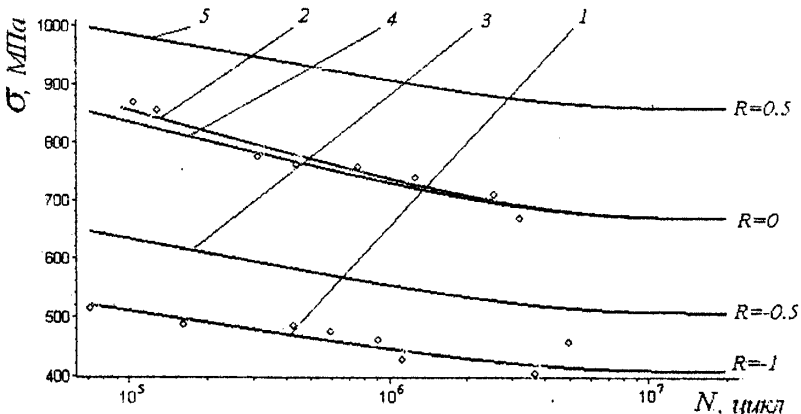


Рис. 5. Експериментальні (1, 2) та приведені (3, 4, 5) криві втоми для зразків зі сталі 40ХН

Таким чином, запропонований метод приведення асиметричних циклів навантаження практично повністю відповідає результатам експерименту. Отже, при аналізі випадкового процесу навантажування трубних і штангових колон можна використовувати запропоноване приведення до еквівалентного симетричного процесу за допомогою рівнянь (6-12), які більш точно враховують чутливість до асиметрії навантаження. Таким чином, **підтверджено друге положення, що захищається.**

Як відомо, трубні і штангові колони працюють у корозійних середовищах бурильного розчину чи газонафтоводяної суміші, підлягаючи впливу корозійного середовища. Але при використанні рівняння (13) для оцінки довговічності та залишкового ресурсу в умовах корозійної втоми ми зустрінемося зі значними труднощами. Крива втоми у формі (13) має нижню гілку, яка асимптотично наближається до границі витривалості. Експериментальні ж дослідження в умовах корозійної втоми показують, що в такому випадку крива не має горизонтальної нижньої гілки.

Таким чином, існує необхідність урахування нижньої гілки кривої корозійної втоми. Для цього нами пропонується використання трипараметричного рівняння Є.К.Почтенного

$$N_r = \frac{Q}{\sigma} \ln \left\{ 1 + \left[\exp \left(\frac{\sigma - \sigma_{Rr}}{V_0} \right) - 1 \right]^{-1} \right\} \quad (14)$$

для верхньої гілки кривої корозійної втоми в комбінації з розробленим автором рівнянням

$$N_{corr} = \frac{Q_{corr}}{\sigma} \ln \left\{ 1 + \left[\exp \left(\frac{\sigma}{V_{corr}} \right) - 1 \right]^{-1} \right\}, \quad (15)$$

де N_r – кількість циклів до руйнування деталей з імовірністю неруйнування r ;
 σ – максимальне напруження циклу регулярного навантаження з постійним значенням коефіцієнта асиметрії K ;

V_{0R} – параметр з розмірністю напруження;

Q – коефіцієнт витривалості;

σ_R – границя витривалості;

Q_{corr} , V_{corr} – параметри нижньої гілки кривої корозійної втоми.

Перехід з однієї кривої на іншу відбувається за умови $N' = N'_{cor}$ при

$$\sigma = \sigma_R + k, \quad (16)$$

де k – запропонований параметр з розмірністю напруження.

На рис. 8 наведено сукупність кривих корозійної втоми з усіма однаковими параметрами верхньої гілки кривої корозійної втоми і різними k .

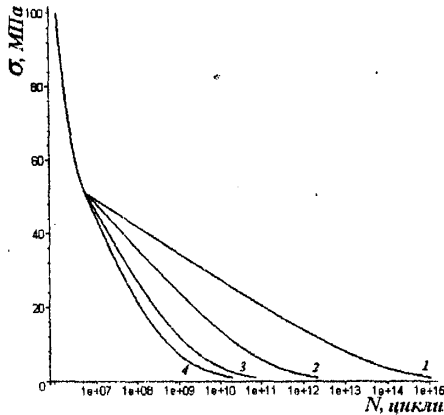


Рис. 8. Крива корозійної втоми:

1 – $k=0,5$ МПа; 2 – $k=1$ МПа; 3 – $k=2$ МПа; 4 – $k=3$ МПа.

Як бачимо, параметр k характеризує кут нахилу нижньої гілки кривої корозійної втоми, а отже, дає можливість врахувати інтенсивність впливу корозійного чинника за низьких напружень. Його визначення необхідно проводити за результатами експериментальних досліджень.

Слід зауважити, що за допомогою рівнянь (14-16) можна враховувати кінетику корозійно-втомного пошкодження і оцінювати параметри кінетичних кривих корозійної втоми. Апробацію рівняння проведено за результатами корозійно-втомних досліджень натурних зразків штанг (див. стор. 22-25). Таким чином, підтверджено третє положення, що захищається.

Також у розділі наведено результати апробації розроблених методів розрахунку довговічності елементів трубних і штангових колон. Результати отримано за допомогою комплексної програми, розробленої для використання в програмному середовищі системи символьного числення *Maple*. Як об'єкт досліджень вибрано замкове з'єднання 3-147 бурильних труб, спектр навантажування для якого можна наближено апроксимувати двочастотним процесом. Проведені розрахунки показали високу чутливість до врахування зниження границі витривалості при накопиченні втомних пошкоджень. Особливо відчутний вплив на довговічність спостерігається при значеннях високочастотної амплітуди близько $(0,7..0,8)\sigma_{-1}$, при яких розрахункова довговічність зменшується більше ніж у 5 разів, а ймовірність неруйнування – з 0,95 до 0,07. Також слід відмітити, що вплив високочастотної складової стає помітним вже при амплітуді $0,5\sigma_{-1}$. Це добре узгоджується з багаточисельними експериментами різних авторів при випадковому навантажуванні.

У п'ятому розділі наведено результати досліджень закономірностей накопичення корозійно-втомного пошкодження елементів трубних і штангових

колон, спрямованих на розроблення ефективних методів оцінки їх навантаженості, довговічності та залишкового ресурсу.

Одним з ефективних засобів оцінки залишкового ресурсу деталей, які працюють в умовах складного навантажування, є кінетичні криві втоми, тобто криві, побудовані для деталей чи зразків з різним фіксованим пошкодженням. Але існуюча методологічна база не дозволяє широко використовувати кінетичні криві втоми через необхідність великої кількості експериментів, а також через складність оцінки ступеня попереднього пошкодження в експлуатаційних умовах.

На основі аналізу експериментальних даних розроблено вдосконалену методику проведення експериментальних досліджень та їх обробки. Методика дозволяє будувати кінетичні діаграми корозійної втоми натурних зразків з достатньою точністю визначення імовірнісних параметрів навіть за обмеженої кількості зразків. Дана методика ґрунтується на закономірностях кінетичних кривих втоми, а саме, на тому, що такі параметри кривої втоми як V_0 і $N_0 = \frac{Q}{\sigma_R}$ –

кількість циклів до нижнього перегину кривої, не залежать від ступеня пошкодження деталі чи зразка. Тому можна стверджувати, що їх значення є медіанними значеннями параметрів V_0 і N_0 для кінетичних кривих втоми з різними ступенями пошкодження. Суть даної методики полягає в наступному.

Натурні деталі чи зразки-моделі групуємо за ступенем їх пошкодження (наприклад, за терміном експлуатації в типових умовах). Потім проводимо серію корозійно-втомних випробувань зі зразками кожної групи. Усі результати зводять у генеральну вибірку і визначають параметри усередненої кривої корозійної втоми. Так як дані параметри визначено на великій кількості експериментальних даних, то довірча імовірність отримання їх медіанних значень буде високою. Подальша обробка експериментальних даних полягає у визначенні тільки двох параметрів кривої (14-16), а саме, σ_{Ri} і k_i для кожного ступеня пошкодження. Алгоритм розрахунку на цьому етапі відрізняється використанням рівностей $\bar{\sigma}_{Ri} = \frac{Q_R}{N_0}$ і $V_0 = const$.

Для розрахунку залишкового ресурсу елементів колон необхідно мати хоча б три криві втоми натурних зразків з визначеним терміном експлуатації p_i в типових умовах, наприклад, за кількістю років експлуатації. При достатньо великих термінах експлуатації в типових умовах можна прийняти еквівалентну кількість циклів напружень за однаковий термін експлуатації ΔN величиною незмінною.

Тоді при $p_1 < p_2 < p_3$ $N_1 - N_2 = \Delta N(p_2 - p_1)$, $N_2 - N_3 = \Delta N(p_3 - p_2)$ і можна записати систему рівнянь

$$\left\{ \begin{aligned} \Delta N(p_2 - p_1) &= \frac{Q_{kin1}}{\sigma_{eq}} \ln \left\{ 1 + \left[\exp \left(\frac{\sigma_{eq} - \bar{\sigma}_{-1kin1}}{V_{-1}} \right) - 1 \right]^{-1} \right\} - \frac{Q_{kin2}}{\sigma_{eq}} \ln \left\{ 1 + \left[\exp \left(\frac{\sigma_{eq} - \bar{\sigma}_{-1kin2}}{V_{-1}} \right) - 1 \right]^{-1} \right\}, \\ \Delta N(p_3 - p_2) &= \frac{Q_{kin2}}{\sigma_{eq}} \ln \left\{ 1 + \left[\exp \left(\frac{\sigma_{eq} - \bar{\sigma}_{-1kin2}}{V_{-1}} \right) - 1 \right]^{-1} \right\} - \frac{Q_{kin3}}{\sigma_{eq}} \ln \left\{ 1 + \left[\exp \left(\frac{\sigma_{eq} - \bar{\sigma}_{-1kin3}}{V_{-1}} \right) - 1 \right]^{-1} \right\} \end{aligned} \right. \quad (17)$$

розв'язком якої будуть шукані величини ΔN і σ_{eq} .

Знаючи ΔN і σ_{eq} , визначаємо медіанний залишковий ресурс Δp після терміну експлуатації p_i за рівнянням

$$\Delta p = \frac{Q_{kini}}{\Delta N \cdot \sigma_{eq}} \ln \left(1 + \left(\exp \left(\frac{\sigma_{eq} - \sigma_{-1kini}}{V_{-1}} \right) - 1 \right)^{-1} \right). \quad (18)$$

За підстановки в (18) імовірнісних значень параметрів σ_{-1kini} і Q_{kini} , отримаємо залишковий ресурс з визначеною імовірністю неруйнування.

Для реалізації методу створено комплексну програму розрахунку параметрів, побудови кінетичних кривих корозійної втоми та розрахунку залишкового ресурсу з різною імовірністю неруйнування.

Розроблений метод прогнозування залишкового ресурсу елементів колон за допомогою кінетичних кривих корозійної втоми дозволяє зменшити витрати на проведення експерименту при збереженні точності оцінки; проводити автоматизовану обробку даних за допомогою розробленого програмного забезпечення; оцінювати навантаження колони та прогнозувати залишковий ресурс в умовах мінімальної інформації про її попередню експлуатацію.

Складність попереднього методу полягає в переведенні результатів довготривалих експериментальних досліджень для інших умов експлуатації. У першу чергу, труднощі пов'язані з необхідністю запису і оброблення процесу навантаження деталей за тривалі проміжки часу, що пов'язано зі значними матеріальними затратами та складностями організаційного та методичного характеру. Тому для усунення цього недоліку удосконалено метод інтегральної оцінки експлуатаційного навантаження трубних і штангових колон за допомогою індикаторів навантаження.

Суть методу полягає у використанні закономірностей накопичення втомного пошкодження індикаторів з попереднім визначеним пошкодженням. Спочатку експериментально визначаємо параметри кінетичних кривих втоми індикаторів. Потім індикатори з різним фіксованим пошкодженням встановлюємо безпосередньо на елемент у верхній частині трубних і штангових колон або, при неможливості такої конструктивної схеми, на спеціальний пристрій, який сприйматиме експлуатаційне навантаження через додаткові елементи. Довговічність індикаторів буде залежати від наперед визначеного попереднього і накопиченого пошкодження. При цьому кожен індикатор сприйматиме цикли напружень, вищі за його кінетичну границю витривалості. Це дає змогу провести

інтегральну оцінку навантажування з виділенням декількох рівнів напружень та визначенням на кожному рівні еквівалентної кількості напружень. Кількість рівнів відповідає кількості індикаторів з різним попереднім пошкодженням, а їх межі – кінетичним границям витривалості індикаторів. Для оптимального поділу навантажування на рівні необхідно знати орієнтовні величини максимальних напружень та границю витривалості елементів трубних і штангових колон, що сприймають дане навантаження. Розроблено відповідні рівняння та комп'ютерну програму для реалізації методу. Таким чином, підтверджено четверте положення, що захищається.

Також у розділі наведено результати апробації розроблених методів оцінки довговічності елементів бурильних та штангових колон за параметрами їх кривих корозійної втоми та даними експлуатаційної навантаженості. Відмічено значний вплив на довговічність розсіяння початкової границі витривалості елементів бурильних і штангових колон та її поступового зниження до рівня експлуатаційної навантаженості через накопичення корозійно-втомного пошкодження циклами напружень з еквівалентними амплітудами, нижчими за фактичну початкову границю витривалості. Наприклад, медіанна границя витривалості насосних штанг знижується до рівня найбільшого напруження блоку навантаження через 5 років неперервної роботи. Довговічність при досягненні границею витривалості значень, нижчих максимального рівня дослідженого блоку експлуатаційних напружень, не перевищує 3 років безперервної роботи, а для імовірності неруйнування 0,9 складає всього 2,5 доби безперервної роботи.

У шостому розділі представлено результати експериментальних досліджень з оцінки навантаженості, довговічності та залишкового ресурсу трубних і штангових колон.

Для апробації розроблених методів і визначення залишкового ресурсу ШК у типових умовах експлуатації проведено експериментальні випробування насосних штанг з різним корозійно-втомним пошкодженням: нових, після 4 і після 8 років експлуатації.

Генеральну вибірку експериментальних даних наведено на рис. 9. У результаті обробки за допомогою розробленої методики отримали такі параметри усередненої кривої втоми (рис. 9) у вигляді (14-16):

$$Q = 6,1 \cdot 10^7 \text{ МПа}; \sigma_{-1} = 61 \text{ МПа}; V_0 = 450 \text{ МПа}; N_0 = \frac{Q}{\sigma_{-1}} = 1 \cdot 10^6 \text{ циклів}; k = 2 \text{ МПа}.$$

Наступним етапом обробки є визначення параметрів кінетичних кривих корозійної втоми насосних штанг. Результати розрахунку, проведені згідно з розробленою методикою, наведено в таблиці 1.

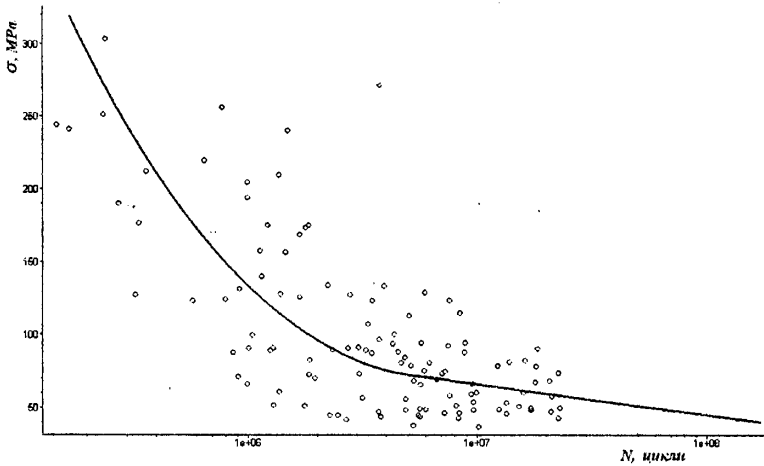


Рис. 9. Результати випробувань та усереднена крива втоми

Аналіз результатів показує тенденцію зменшення розкиду значень довговічності зі збільшенням терміну експлуатації. Це пояснюється тим, що в початковий період роботи (період припрацювання) були відбраковані і зняті з експлуатації усі штанги з високим початковим ступенем пошкодження. Свою роль відіграє і складний характер експлуатаційного навантаження насосних штанг, яке є випадковим багаточастотним процесом з великим розкидом значень амплітуд та асиметрії. Такий складний характер навантаження та вплив корозійного чинника з часом призводить до згладжування закономірно високого розкиду довговічності деталей, тобто в нашому випадку до зменшення середньоквадратичного відхилення границі витривалості насосних штанг.

Таблиця 1

Параметри кінетичних кривих корозійної втоми насосних штанг

Термін експлуатації K , роки	Q , МПа	σ_{-1} , МПа	V_0 , МПа	N_0 , цикли	k , МПа	Q_{cor} , МПа	V_{cor} , МПа	$\bar{s}_{\sigma_{-1}}$, МПа
$K=0$ (нові штанги)	$8,21 \cdot 10^7$	82,1	450	$1 \cdot 10^6$	2,1	$9,2 \cdot 10^{11}$	11	4,5
$K=4$	$7,04 \cdot 10^7$	70,4				$2,64 \cdot 10^{11}$		3,25
$K=8$	$5,47 \cdot 10^7$	54,7				$4,74 \cdot 10^{10}$		3,12

Кінетичні криві корозійної втоми для медіанної імовірності неруйнування наведено на рис. 10.

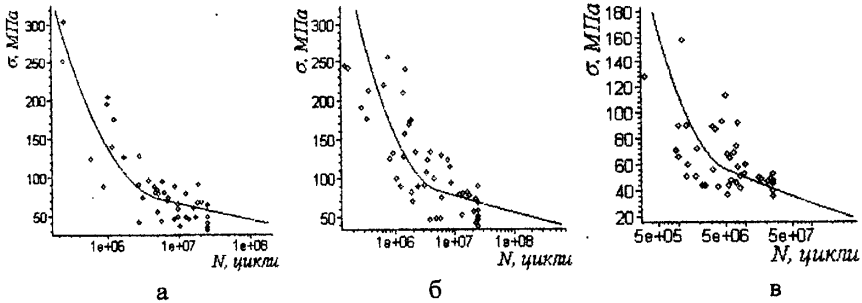


Рис.10. Кінетичні криві втоми насосних штанг:

а – нові штанги; б – після 4 років експлуатації; в – після 8 років експлуатації.

Завершальним етапом обробки експериментальних даних є оцінка залишкового ресурсу насосних штанг після 8 років експлуатації в типових умовах. За достатньо великих термінів експлуатації насосних штанг у стабільних умовах можна вважати еквівалентну кількість циклів напружень за однаковий термін експлуатації ΔN величиною незмінною. Тоді можна використати систему рівнянь (17), розв'язком якої і будуть шукані величини ΔN і σ_{eq} .

Слід відмітити, що у випадку істотно нерівномірної роботи свердловини параметр p_i у рівнянні (17) вже не буде описуватися кількістю років експлуатації і його необхідно розраховувати додатково за спеціальними методиками. Розв'язок даної системи нелінійних рівнянь показаний на рис. 11 як перетин кривих. Отримали $\Delta N = 124000$ цикли і $\sigma_{eq} = 111,3$ МПа.

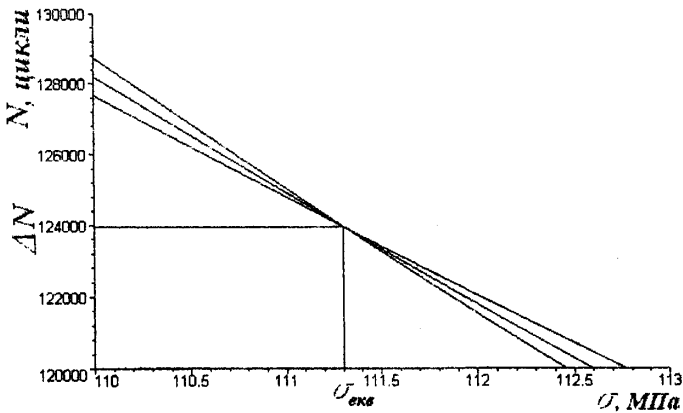


Рис. 11. Визначення еквівалентної кількості циклів за рік ΔN та еквівалентного напруження $\sigma_{екв}$

Тепер, маючи усі необхідні параметри, можна розрахувати залишковий ресурс насосних штанг Δp у роках за рівнянням (18).

Для медіанної імовірності неруйнування отримаємо залишковий ресурс $\Delta p = 8,5$ років.

У розділі також наведено результати експериментальних досліджень з вибору та визначення необхідних параметрів індикаторів навантажування для оцінки навантаженості штангової колони.

У результаті проведених випробувань на тріщиностійкість визначено такі значення параметрів залежності швидкості підростання тріщини за рівнянням $V = C \cdot \Delta K^n$: $C = 2,4 \cdot 10^{-12} \text{ м}^7/\text{Н}^4$; $n = 4$. Також визначено параметр K^* згідно із залежністю $V = 10^{-7} \left(\frac{\Delta K}{K^*} \right)^n$: $K^* = 14,3 \text{ МПа м}^{1/2}$.

Втомні випробовування для визначення параметрів кривої втоми індикаторів (рис. 12) і вирощення початкової тріщини проводились на розробленому стенді.



Рис. 12. Індикатор після проведення експерименту

За результатами втомних випробовувань плоских зразків-індикаторів без вирощеної тріщини визначено такі параметри кривої втоми: $N_6 = 3767600$; $V = 15,5 \text{ МПа}$; $\sigma_0 = 83,7 \text{ МПа}$; $\nu = 0,032$. За використання індикаторів для оцінки навантаженості необхідно мати параметри кривої втоми індикаторів з різною попередньо вирощеною тріщиною. Для зменшення кількості експериментів використано кінетичні криві втоми. Визначено необхідне число відпрацьованих циклів для зниження границі витривалості індикаторів у межах від 83,7 до 40 МПа. Наприклад, для границі витривалості 40 МПа довжина тріщини була рівною 2,32 мм. Маючи достатню кількість індикаторів з різною довжиною початкової тріщини, за розробленою методикою послідовно визначають напруження і кількість циклів за визначений період експлуатації бурильної чи штангової колони.

Проведено оцінку довговічності натурального зразка бурильної труби із замковим з'єднанням 3-147 за результатами блокового випробовування. Параметри та послідовність ступенів блока відповідали експлуатаційному навантаженню, яке діє за роторного буріння на бурильну трубу, розташовану над

ОБТ. Підтверджено кореляцію розрахункової та експериментально визначеної довговічності (коефіцієнт кореляції 0,87). Це вказує на те, що лінійна гіпотеза накопичення втомних пошкоджень за таких умов навантажування є правомірною і її можна використовувати для оцінки експлуатаційної надійності бурильних колон у визначених умовах експлуатації. Дещо більше значення довговічності, яке спостерігається при експерименті, може бути пояснене процесами "тренування" матеріалу зразка на ступенях блоку з низькою величиною напруження.

З метою оцінки закономірностей впливу низьких напружень на втомну довговічність бурильних труб експериментально досліджували накопичення втомних пошкоджень при циклічному ступеневому деформуванні матеріалу бурильних труб за жорсткою схемою навантажування консольним згином.

На циклічну тріщинозміцність досліджували балочні зразки, які були виготовлені безпосередньо із бурильних труб групи міцності "Д" ($\sigma_T=417$ МПа). Для оцінки впливу низьких напружень у кожний варіант блока було введено ступінь навантажування, який викликає напруження, нижчі за границю витривалості матеріалу. На основі проведених досліджень встановлено, що низькі напруження при підсумовуванні втомних пошкоджень не можна оцінювати тільки з точки зору їхньої долі у загальному втомному пошкодженні (рис.13).

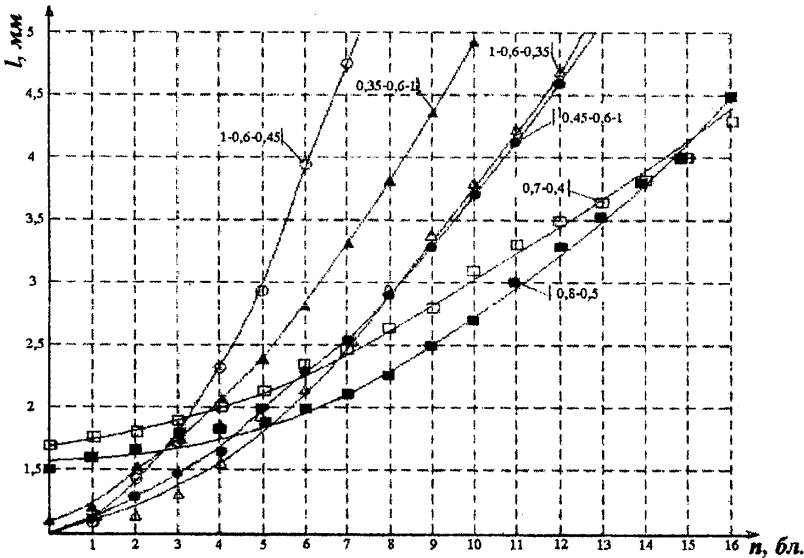


Рис. 13. Залежність росту тріщини від кількості циклів напруження найбільш руйнівного ступеня навантажування за різних варіантів блока

При блокових чи випадкових навантажуваннях зі ступенями, які спричиняють напруження, близькі до границі витривалості матеріалу, на першій

план виходить взаємодія низьких напружень блока чи спектру навантажування з високими, найбільш руйнівними. При цьому в залежності від чинників навантажування така взаємодія може призвести як до збільшення пошкоджень від високих напружень, так і до їх послаблення.

Важливим висновком цього є необхідність врахування послідовності навантажування для розрахунків на втомну довговічність деталей, які працюють в умовах випадкових навантажувальних з високою долею низьких напружень спектру, що має місце при експлуатації бурильної колони.

Тому проведено випробовування натурних зразків бурильної труби за багатоступеневого навантажування з метою оцінки впливу послідовності рівня експлуатаційного навантаження на довговічність труби.

Як об'єкт досліджень вибрано бурильні труби ТБВ 140×11 "Л". Експериментальні дослідження проведено на випробному стенді УКІ-7 в лабораторії корозійно-втомних досліджень Фізико-механічного інституту імені Г.В.Карпенка НАН України.

Для зразка № 1 імітувалась експлуатація труби в бурильній колоні на інтенсивно навантаженій ділянці і напруження ступенів для зразка № 1 охоплювало діапазон довговічності від 140 тис. до 569 тис. циклів.

Для зразків № 2 і 3 діапазон збільшили до повного охоплення багатоциклової втоми, а саме, від $1 \cdot 10^5$ циклів до $1,5 \cdot 10^7$ циклів.

Для зразка № 2 розміщення ступенів навантажування імітувало експлуатацію труби з умови поступового збільшення інтенсивності навантажування з короткочасними витримками за циклічного низькоамплітудного навантаження.

Для зразка № 3 розміщення ступенів навантажування імітувало експлуатацію труби з умови поступового зменшення інтенсивності навантаження з короткочасними ступенями навантаження для зупинки фронту тріщини. Експерименти проводили до повної поломки зразків (рис.14).

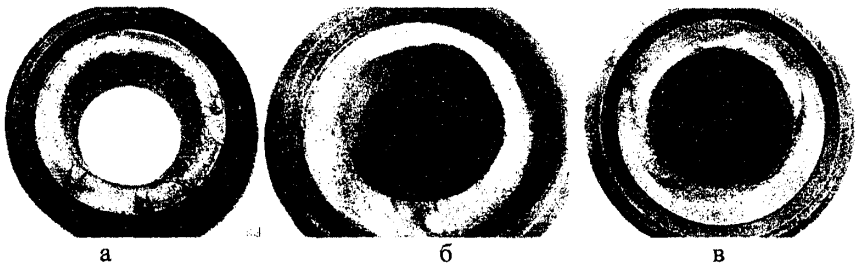


Рис. 14. Вигляд злому зразків:
а – № 1; б – № 2; в – № 3.

Накопичене пошкодження підраховували за рівнянням $d = \sum \frac{n_i}{N_i}$, де n_i - кількість циклів навантаження, N_i - кількість циклів до руйнування. Усі зразки

показали різну довговічність. Так, для зразка № 1 накопичене пошкодження до руйнування склало $d=1,18$, для зразка № 2 – 1,52, для зразка № 3 – 0,8.

Таким чином, аналіз результатів експерименту дозволив підтвердити раніше зроблений висновок про вплив послідовності ступенів навантаження на втомну довговічність труби. Найменшу довговічність отримано за схеми навантажування з послідовним зменшенням амплітуди, навіть до рівня довговічності 15 млн. циклів (зразок № 3), середню – за постійної роботи в ускладнених умовах (зразок № 1), найбільшу – за схеми навантажування з послідовним збільшенням амплітуди (зразок № 2). Імовірність неруйнування при переході зі схеми навантажування з послідовним збільшенням амплітуди до схеми навантажування з послідовним зменшенням амплітуди падає з 0,95 до 0,23.

Відпрацювання бурильних труб у більшості випадків відбувається за схемою навантажування з послідовним зменшенням амплітуди (зразок № 3).

Таким чином, проведені дослідження на втомну довговічність бурильних труб вказують на значні резерви підвищення експлуатаційної надійності і ефективності використання елементів бурильної колони за урахування послідовності рівнів їх навантаженості.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У результаті проведення теоретичних і експериментальних досліджень отримано нове вирішення науково-технічної проблеми підвищення експлуатаційної надійності трубних і штангових колон для буріння та видобування нафти, яке ґрунтується на закономірностях кінетики накопичення корозійно-втомного пошкодження елементів колон і розроблених методах оцінки їх навантаженості, довговічності та залишкового ресурсу.

1. Розглянуто сучасний стан проблеми підвищення експлуатаційної надійності трубних і штангових колон для буріння та видобування нафти і газу. Відмічено, що домінантними і найбільш небезпечними відмовами колон є корозійно-втомні пошкодження їх елементів. У першу чергу це пов'язано з тим, що колони підлягають впливу нестационарного навантажування з дуже складною структурою. Встановлено, що для надійної та ефективної роботи колон для буріння та видобування нафти необхідним є проведення більш детальної оцінки навантаженості і розроблення досконалих методів прогнозування їх довговічності та залишкового ресурсу.

2. Розроблено удосконалені засоби вимірювання навантажень у верхній частині штангової колони (Патент України № 21964) і в бурильній колоні (Патент України № 20126).

Досліджено експлуатаційне навантажування колон на діючих свердловинах. Встановлено, що особливостями експлуатаційного навантажування колон є складний асиметричний процес з великою кількістю випадкових високочастотних низькоамплітудних складових. Так, 90% розподілу циклів напружень у верхній частині штангової колони займають напруження з коефіцієнтом асиметрії більше 0,6 і амплітудами менше 20 МПа. Для бурильної колони коефіцієнти асиметрії

перевищували $R=0,5$ для циклів навантажування при довжинах БК 190 і 500 м, а при довжині колони 1570 м перевищували 0,7. Під час СПО амплітуди всіх приведених напружень є нижчими за $\sigma_{1/2}$, але при довжині колони 1580 м вони вже близькі до 0,9 $\sigma_{1/2}$. Під час прихоплення приведені амплітуди напружень перевищують відповідні границі витривалості елементів колони вже при довжині 500 м.

3. Розраховано локальні напруження згину в елементах колон на викривлених ділянках із урахуванням сили розтягу і параметрів викривлення осі свердловини. Визначено напруження у поперечному перерізі бурильних труб ТБПК 127 (товщина стінки 8 мм) у криволінійному стовбурі свердловини діаметром 295,3 мм. Збільшення відстані від нейтрального перерізу до початку криволінійної ділянки від 250 м до 300 м за роторного буріння призводить до зростання амплітуди напруження згину від 9,5 МПа до 40,2 МПа. Показано, що низькоамплітудне навантаження розтягу внизу штангової колони призводить до локального високоамплітудного напруження згину на викривлених ділянках. Так, якщо амплітуда напруження розтягу в експлуатаційних умовах досягає всього 0,9 МПа, то амплітуда напруження згину на ділянці з кутом викривлення 20° і радіусом 50 м – 78,3 МПа. Таким чином, локальні циклічні напруження згину можуть бути основною причиною корозійно-втомного руйнування колон на викривлених ділянках.

4. Удосконалено метод підсумовування втомних пошкоджень елементів трубних і штангових колон за випадкового навантажування, особливістю якого є використання окремих коефіцієнтів впливу на відхилення від лінійної гіпотези накопичення пошкодження багаточастотності та розподілу амплітуд на окремих частотах, що дає змогу врахувати дані чинники під час розрахунків експлуатаційної надійності трубних і штангових колон.

Удосконалено метод схематизації випадкового процесу навантажування, який полягає у визначенні екстремумів за поетапного згладжування процесу шляхом заміни висхідних розмахів на їх середні значення і дає змогу врахувати розподіл амплітуд у часі та багаточастотність випадкового процесу навантажування трубних і штангових колон. Проведено апробацію методу на змодельованих двочастотних і експлуатаційних випадкових процесах навантажування елементів колон.

Удосконалено метод приведення асиметричних циклів напружень з середнім напруженням розтягу до симетричних з використанням запропонованих кусково-лінійних рівнянь для оцінки чутливості матеріалу до асиметрії циклів, що дає змогу проводити розрахунок довговічності елементів трубних і штангових колон в умовах дії типового для них низькоамплітудного асиметричного навантаження. Проведено апробацію методу за результатами корозійно-втомних досліджень зразків, виготовлених з матеріалу бурильних замків, яка підтвердила відповідність теоретичних викладок з експериментом.

5. Розроблено чотирипараметричне рівняння кривої корозійної втоми, яке відрізняється використанням системи рівнянь для визначення параметрів її

правої гілки і запропонованого коефіцієнта впливу корозійного середовища та дає змогу під час розрахунку довговічності елементів трубних і штангових колон враховувати накопичене корозійно-втомне пошкодження за дії циклів напружень з амплітудами, нижчими за умовну границю корозійної витривалості. Проведено апробацію рівняння для оцінки залишкового ресурсу штангової колони за результатами корозійно-втомних досліджень натурних зразків штанг.

Розроблено розрахунково-експериментальний метод оцінки залишкового ресурсу трубних і штангових колон з використанням запропонованої системи рівнянь для визначення еквівалентних за пошкоджуючою дією амплітуд циклів напружень та кількості циклів навантажування і дає змогу розрахувати залишковий ресурс елементів колон за результатами досліджень натурних зразків з різним ступенем накопиченого корозійно-втомного пошкодження. Експериментально визначено параметри кінетичних кривих корозійної втоми насосних штанг. Проведено оцінку залишкового ресурсу насосних штанг після 8 років експлуатації.

Удосконалено розрахунково-експериментальний метод оцінки навантаженості трубних і штангових колон за допомогою індикаторів навантаження, який ґрунтується на використанні закономірностей кінетики зниження границі витривалості індикаторів, виділенні певної кількості рівнів амплітуд напружень і визначенні за запропонованою системою рівнянь на кожному рівні еквівалентної за пошкоджуючою дією кількості їх циклів, що дає змогу проводити поточну інтегральну оцінку навантаженості колон.

Досліджено накопичення втомних пошкоджень матеріалу бурильних труб (сталь групи міцності "Д") за блокових навантажувальних ступенями, які спричиняють напруження, близькі до границі витривалості матеріалу. Доведено необхідність врахування послідовності навантажування для розрахунків на втомну довговічність елементів колон, які працюють в умовах випадкового навантажування з високою часткою низьких напружень спектру.

Проведено випробування натурних зразків бурильної труби ТБВ 140×11 "Л" за багатоступеневого навантажування з метою оцінки впливу послідовності рівня експлуатаційного навантаження на довговічність різьбового з'єднання труби. Визначено вплив форми блоку навантаження на довговічність конструкції. Найменшу довговічність отримано за схеми навантажування з послідовним зменшенням амплітуди, середню – за постійної роботи в ускладнених умовах, найбільшу – за схеми навантажування з послідовним збільшенням амплітуди. Імовірність неруйнування при переході зі схеми навантажування з послідовним збільшенням амплітуди до схеми навантажування з послідовним зменшенням амплітуди падає з 0,95 до 0,23.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Схематизація випадкового навантажування методом вкладених циклів / Є.І. Крижанівський, В.М. Івасів, В.І. Артим, В.М. Нікітюк // Науковий вісник ІФНТУНГ. – 2002. – № 2. – С.47-54.

2. Дослідження кінетики втомного пошкодження матеріалу бурильних труб в умовах блокового навантажування / В.М. Івасів, Я.Т. Федорович, В.І. Артим, В.В.Гладун, П.В. Пушкар // Науковий вісник ІФНТУНГ. – 2003. – № 1. – С. 39-43.
3. Розрахунок втомної довговічності замкового з'єднання бурильних труб 3-147 при багатоступеневому навантажуванні/ В.М. Івасів, В.І. Артим, М.М. Яворський, Я.І. Козак, П.В. Пушкар // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2003. – № 2. – С. 116-120.
4. Використання локальних моделей для оцінки залишкового ресурсу магістральних трубопроводів / В.М. Івасів, В.І. Артим, В.М. Нікітюк, О.М. Козак // Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій / Під заг. ред. В.В.Панасюка – Львів: Фізико-механічний інститут ім. Г.В.Карпенка НАН України, 2004. – С. 557-562.
5. Артим В. Моделювання накопичення втомних пошкоджень при випадковому навантажуванні / Володимир Артим, Петро Пушкар // Авиационно-космическая техника и технология. – 2004. – № 1. – С 19-24.
6. Методи визначення стійкості неорієнтованих КНБК з двома ОЦЕ / В.М. Івасів, В.І. Артим, І.І. Чудик, М.М. Яворський // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2004. – № 2 (11). – С. 20-24.
7. Методика оцінки втомної довговічності та залишкового ресурсу великогабаритних деталей з допомогою локальних моделей / В.М. Івасів, В.І. Артим, Т.І. Смоляк, О.М. Козак, В.М. Нікітюк // Вісник Тернопільського державного технічного університету. – 2005. – № 1. – С. 19-24.
8. Івасів В.М. Оцінка впливу параметрів двочастотного процесу навантажування на довговічність деталей машин / В.М. Івасів, В.І. Артим, П.В. Пушкар // Вібрації в техніці та технологіях. – 2004. – № 5 (37). – С. 113-116.
9. Урахування напружень низького рівня при розрахунках довговічності деталей машин / В.М. Івасів, В.І. Артим, П.В. Пушкар, О.М. Козак // Машинознавство. – 2003. – № 12. – С. 17-20.
10. Рачкевич Р.В. Визначення функції К-гарування для різьбових з'єднань бурильних труб / Р.В. Рачкевич, В.І. Артим, А.В. Козлов // Науковий вісник ІФНТУНГ. – 2005. – № 1 (10). – С. 82-87.
11. Визначення залишкового ресурсу насосних штанг в типових умовах експлуатації / В.І. Артим, В.М. Івасів, Я.Т. Федорович, П.В. Пушкар // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2005. – № 2. – С. 79-82.
12. Удосконалення експериментального дослідження навантаження колони насосних штанг / В.М. Івасів, В.Р. Харун, П.В. Пушкар, В.І. Артим, І.С. Атаманчук // Науковий вісник ІФНТУНГ. – 2005. – № 3. – С. 31-35.
13. Оцінка експлуатаційної навантаженості та її вплив на довговічність насосних штанг / В.М. Івасів, В.І. Артим, В.Р. Харун, П.В. Пушкар // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2005. – № 4. – С. 77-81.

14. Івасів В.М. Удосконалена методика прогнозування залишкового ресурсу деталей у типових умовах експлуатації / В.М. Івасів, В.І. Артим, П.В. Пушкар // *Машинознавство*. – 2005. – № 10. – С. 43-46.
15. Аналіз відмов колон насосних штанг в НГВУ "Надвірнанафтогаз" / П.В. Пушкар, Я. Ю. Павлюк, Т.Б. Матвійшин, В.І. Артим // *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. – 2006. – № 1. – С. 116-120.
16. Модель багаточиклового корозійно-втомного пошкодження деталей машин / В.М. Івасів, В.І. Артим, В.В. Гладун, Р.О. Дейнега // *Механічна втома металів*. Під ред. Троценка В.Т. / *Праці колоквиуму*. – Тернопіль, 2006. – С. 198-203.
17. Артим В. Контактні зусилля в колоні насосних штанг у свердловинах складного профілю з урахуванням розтягу / Володимир Артим // *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. – 2007. – № 3. – С. 56-59.
18. Артим В. Урахування корозійного чинника при оцінці довговічності насосних штанг / Володимир Артим // *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. – 2007. – № 4. – С. 140-143.
19. Артим В. Інтегральна оцінка навантаженості відповідальних об'єктів нафтогазової промисловості за допомогою індикаторів навантаження / Володимир Артим // *Нафтогазова енергетика*. – 2007. – № 4. – С. 76-80.
20. Рачкевич Р.В. Визначення положення бурильної колони у криволінійному стовбурі свердловини / Р.В. Рачкевич, В.І. Артим, А.А. Козлов // *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. – 2007. – № 4. – С. 88-91.
21. Рачкевич Р.В. Визначення напружень у бурильній колоні з урахуванням особливостей взаємодії зі стінкою криволінійного стовбура / Р.В. Рачкевич, В.І. Артим, А.А. Козлов // *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*. – 2008. – № 1. – С. 32-39.
22. Вплив локальних напружень на довговічність різьбових з'єднань бурильних труб / В.І. Артим, Р.В. Рачкевич, В.В. Гриців, С.І. Гладкий // *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. – 2009. – № 1. – С. 29-31.
23. Артим В. Оцінка навантаженості бурильної колони під час спуско-піднімальних операцій / Володимир Артим // *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. – 2009. – № 4. – С. 26-32.
24. Артим В. Оцінка довговічності колони насосних штанг в умовах корозійної втоми з урахуванням низькоамплітудних напружень / Володимир Артим // *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*. – 2009. – № 4. – С. 57-62.
25. Артим В. Оцінка пошкоджуючої дії асиметричного навантаження на елементи бурильних і штангових колон / Володимир Артим // *Нафтогазова енергетика*. – 2009. – № 2. – С. 12-18.
26. Урахування корозійного чинника при розрахунку довговічності деталей машин / Р.О. Дейнега, В.І. Артим, Р.В. Рачкевич, В.В. Гриців // *Вісник Тернопільського державного технічного університету*. – 2009. – № 4. – С. 12-18.

27. Артим В.І. Дослідження втомної довговічності натурних зразків бурильних труб ТБВ за багатоступеневого навантажування / В.І. Артим, І.М. Гойсан // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2010. – № 1. – С. 46-52.
28. Пат. 21964 Україна, МПК G01V 13/00. Пристрій для вимірювання навантаження підвіски колони штанг / Пушкар П.В., Харун В.Р., Артим В.І., Івасів О.В.; патентовласник ВАТ “Укрнафта”. – № u 2006 11528; заявл. 01.11.2006; опуб. 10.04.2007, Бюл. № 4. – 6 с.
29. Пат. 21126 Україна, МПК E21B 19/00, G01L 1/00. Пристрій для вимірювання зусиль в колоні бурильних труб / Івасів В.М., Артим В.І., Козлов А.А., Чудик І.І., Юрич А.Р.; патентовласник ІФНТУНГ.– № u 2006 07356; заявл. 03.07.2006; опуб. 15.01.2007, Бюл. № 1. – 4 с.
30. Пат. 18066 Україна, МПК G01N 3/00, G01M 3/00. Процес визначення залишкового ресурсу нафтогазопроводів та збільшення нормативного терміну їх експлуатації за результатами дослідження вирізаних дефектних ділянок / Івасів В.М., Говдяк Р.М., Івченко О.Г., Лопушанський А.Я., Кравець О.А., Дрогомирський М.М., Василюк В.М., Ільницький Р.М., Артим В.І.; патентовласник ІФНТУНГ.– № u200605396; заявл. 17.05.2006; опуб. 16.10.2006, Бюл. № 10. – 6 с.
31. Врахування напружень низького рівня при розрахунках довговічності деталей машин / В.М. Івасів, В.І. Артим, П.В. Пушкар, О.М. Козак // 36. матеріалів 6 Міжнародного симпозиуму українських інженерів-механіків. – Львів. – 2003. – С. 53-56.
32. Fatigue reliability calculations with accounting low stresses / В.М. Івасів, В.І. Артим, О.М. Козак, В.В. Гладун // 36. матеріалів Міжнародної наукової конференції. – м. Бая-Маре, Румунія. – 2003. – С. 163-168.
33. Артим В. Моделювання накопичення втомних пошкоджень при випадковому навантажуванні / Володимир Артим // Міжнародна науково-технічна конференція „Інтегровані комп’ютерні технології в машинобудуванні – ІКТМ-2003”: Тези доповідей. – Харків: Національний аерокосмічний університет, 2003. – С.74.
34. Calculation of fatigue damages upbuilding for complicating loading processes/ О. Karpash, V. Ivasiv, V.Artym, P. Pushkar // 36. матеріалів Міжнародної наукової конференції. – Бая-Маре, Румунія. – 2004. – С. 355-360.
35. Ivasiv V. The Account of Complexity of Loading at Meaning of Reliability of Parts of Machines/ V.Ivasiv, V.Artym, R.Ilnitskiy / 2nd International Symposium on Hydrocarbons & Chemistry. – Ghardaïa: Algeria. – 2004. – P. 84.
36. Харун В.Р. Використання математичної моделі для визначення технічного стану ШСНУ в умовах експлуатації / В.Р. Харун, В.І. Артим, О.В. Прозур // Міжнародна науково-технічна конференція „Інтегровані комп’ютерні технології в машинобудуванні – ІКТМ-2005”: Тези доповідей. – Харків: Національний аерокосмічний університет, 2005. – С. 145-146.

37. Reliability Research of Pump Rods under Wear-Fatigue Conditions/ V.Artym, P. Pushkar, Y.Fedorovych, R. Karpyk // 36. матеріалів Міжнародної наукової конференції. – м. Бая-Маре, Румунія. – 2006. – С. 21-26.
38. Урахування корозійного чинника при розрахунку довговічності деталей машин / Р.О. Дейнега, В.І. Артım, Р.В. Рачкевич, В.В. Гриців // Міжнародна науково-практична конференція „Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи його діагностування і прогнозування”: Праці конференції. – Тернопіль: Тернопільський державний технічний університет імені Івана Пулюя, 2009. – С. 283-288.

АНОТАЦІЇ

Артım В.І. Підвищення експлуатаційної надійності трубних і штангових колон для буріння та видобування нафти та газу. – Рукопис. Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.05.12 – машини нафтової і газової промисловості. – Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ, 2010.

Дисертацію присвячено вирішенню проблем впливу навантажування на накопичення корозійно-втомного пошкодження трубних і штангових колон з метою розроблення ефективних методів оцінки їх довговічності та залишкового ресурсу.

Проведено експериментальні дослідження експлуатаційного навантажування трубних і штангових колон та локальних напружень згину в елементах бурильних колон і колон насосних штанг на викривлених ділянках. Розроблено метод підсумовування втомних пошкоджень при широкосмуговому навантажуванні та відповідний метод схематизації випадкового процесу навантажування. Розроблено метод урахування напружень з високим рівнем асиметрії циклу та чотирипараметричне рівняння кривої втоми для урахування корозійного чинника при оцінці довговічності трубних і штангових колон. Удосконалено розрахунково-експериментальний метод оцінки навантаженості елементів колон за допомогою індикаторів навантаження. Удосконалено розрахунково-експериментальний метод оцінки навантаженості та залишкового ресурсу колон за результатами досліджень натурних зразків з різним ступенем накопиченого корозійно-втомного пошкодження. Результати досліджень експериментально апробовано на натурних зразках елементів свердловинного обладнання.

Комплексне врахування теоретичних і експериментальних досліджень, які ґрунтуються на закономірностях кінетики накопичення корозійно-втомного пошкодження елементів трубних і штангових колон, дало змогу вдосконалити методи розрахунку їх довговічності та залишкового ресурсу.

Ключові слова: трубні та штангові колони, схематизація навантаження, корозійно-втомне пошкодження, довговічність, залишковий ресурс.

Артём В.И. Повышение эксплуатационной надежности трубных и штанговых колонн для бурения и добычи нефти и газа. – Рукопись. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.05.12 – машины нефтяной и газовой промышленности. – Иванов-Франковский национальный технический университет нефти и газа, Иванов-Франковск, 2010.

Диссертация посвящена решению проблемы повышения эксплуатационной надежности бурильных и штанговых колонн для бурения и добычи нефти и газа путем разработки эффективных методов оценки их долговечности и остаточного ресурса по эксплуатационной нагрузке.

Проведена оценка эксплуатационной нагрузки трубных и штанговых колонн с помощью разработанных методик и средств. Проведена оценка контактных усилий и локальных напряжений изгиба в элементах бурильных и штанговых колонн на искривленных участках с учетом силы растяжения и параметров искривления оси буровой скважины. Разработано четырехпараметрическое уравнение кривой усталости с учетом коррозионного фактора при низких напряжениях. Разработан расчетно-экспериментальный метод оценки остаточного ресурса трубных и штанговых колонн по результатам исследований натуральных образцов с разным коррозионно-усталостным повреждением. Усовершенствован метод суммирования усталостных повреждений при широкополосной нагрузке, базирующийся на раздельном учете многочастотности и распределения амплитуд на отдельных частотах. Усовершенствован метод схематизации случайного процесса нагружения с учетом многочастотности процесса и распределения амплитуд во времени, который базируется на определении экстремумов при поэтапном сглаживании процесса путем замены восходящих размахов на их средние значения. Усовершенствован метод учета циклов с положительным средним напряжением, в том числе с амплитудой напряжения, низшей за границу выносливости, при оценке долговечности с учетом кинетики усталостного повреждения. Усовершенствован расчетно-экспериментальный метод оценки нагружения элементов колонн с помощью индикаторов нагрузки, который дает возможность провести интегральную оценку нагружения с выделением нескольких уровней напряжений и определением на каждом уровне эквивалентного количества их циклов. Экспериментально исследовано накопление усталостных повреждений натуральных образцов бурильной трубы ТБВ 140 "Л" с замковым соединением 3-147 и коррозионно-усталостных повреждений насосных штанг с разным сроком эксплуатации.

Комплексный учет теоретических и экспериментальных исследований, базирующихся на закономерностях кинетики накопления коррозионно-усталостного повреждения элементов трубных и штанговых колонн, дал возможность усовершенствовать методы расчета их долговечности и остаточного ресурса и, таким образом, повысить их эксплуатационную надежность.

Разработанные методики и оборудование внедрены в нефтегазовую промышленность.

Ключевые слова: трубные и штанговые колонны, схематизация нагрузки, коррозионно-усталостное повреждение, долговечность, остаточный ресурс.

Artym V. I. Operate reliability raise of pipe and sucker-rod strings for boring and an oil and gas recovery. – Manuscript. Thesis for a doctor's degree on technical sciences on the speciality 05.05.12 – Equipment for Oil and Gas Industry. – Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, 2010.

The thesis is devoted the solution of a problem of operate reliability raise of pipe and sucker-rod strings for boring and oil and gas recovery by development of effective methods of their longevity and a residual resource appraisal on an operating load. Experimental researches of an operating load and peephole cyclic stresses of a flexure in members of drilling and sucker-rod strings on the bent leases have been held. The summation method of fatigue damages of pipe and sucker-rod strings members at a broadband loading and the applicable method of casual process schematization of an loading has been designed. A method for the account of asymmetric cycle stresses high level and a four-parametric equation of a curve fatigue for the account of the corrosive factor have been designed at an appraisal of longevity of boring and sucker-rod strings members. Calculated-experimental methods of an appraisal of boring and sucker-rod strings members loading by means of weight indicators and an appraisal of a residual resource of members of pipe and sucker-rod strings by results of studies of full scale specimens with a different extent of the accumulated corrosion-fatigue fault have been developed. Results of study are approved experimentally on full scale specimens of members of drilling and sucker-rod strings.

The complex account idealized and the experimental researches founded on regularity of kinetics of up building of a corrosion-fatigue fault of pipe and sucker-rod strings members, has given the chance to develop methods of their longevity and a residual resource calculation. Designed methods of application and means are implanted in the oil and gas industry.

Keywords: pipe and sucker-rod strings members, loading schematization, corrosion-fatigue fault, longevity, residual resource.