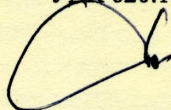


Бдд. ДАБ. 53. 054
П. 91

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

Пушкар Петро Васильович

УДК 620.193 : 622.226



**ОЦІНКА ДОВГОВІЧНОСТІ НАСОСНИХ ШТАНГ З
УРАХУВАННЯМ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ФАКТОРІВ**

Спеціальність 05.05.12 – Машини нафтової та газової промисловості

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Івано-Франківськ – 2007

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

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
ІВАСІВ Василь Михайлович,
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, директор науково-дослідного інституту нафтогазової енергетики і екології.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
ПЕТРИНА Юрій Дмитрович,
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, завідувач кафедри „Технологія нафтогазового машинобудування”;

кандидат технічних наук, доцент
КИЧМА Андрій Олексійович,
Національний університет „Львівська політехніка” (м. Львів),
доцент кафедри „Легкі машини”

Провід

ститут”

Захист спеціалізованої вченої ради національного технічного університету нафти і газу м. Івано-Франківськ

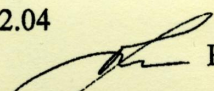
на засіданні спеціалізованої вченої ради Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу м. Івано-Франківськ, вул. Січових героїв, 76019,

З дисертації вченої ради національного технічного університету нафти і газу м. Івано-Франківськ

в бібліотеці спеціалізованої вченої ради Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу м. Івано-Франківськ, вул. Січових героїв, 76019.

Авторецензії

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

 Корнута О.В.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Колона насосних штанг (КНШ) є однією із найслабших ланок штангових свердловинних насосних установок (ШСНУ). Саме насосні штанги різко обмежують їх надійність і довговічність. Це пов'язано із надзвичайно важкими умовами роботи насосних штанг. Змінні навантаження розтягу та згину, вплив корозійно-активного середовища, тертя об колону насосно-компресорних труб, особливо в похилоспрямованих свердловинах, відкладення асфальто-смоляно-парафінових речовин та інші експлуатаційні фактори призводять до появи та інтенсивного розвитку корозійно-втомних тріщин і, як наслідок, до руйнування колони штанг. Такі аварії пов'язані з великими матеріальними затратами на ремонт і відновлення експлуатації свердловин.

Сучасні тенденції розвитку нафтовидобувної галузі полягають у збільшенні середніх глибин свердловин та все більшому поширенні буріння похило-спрямованих свердловин. Такі умови значно ускладнюють роботу колони насосних штанг, що пов'язано з появою напружень згину в тілі штанг та зношуванням штанг внаслідок тертя по внутрішній поверхні насосно-компресорних труб на скривлених ділянках. У зв'язку з цим проблема забезпечення надійності колони насосних штанг є надзвичайно актуальною. Важливе теоретичне та практичне значення для вирішення цієї проблеми має розробка методів оцінки довговічності колони насосних штанг з урахуванням впливу суттєвих експлуатаційних факторів, що підкреслює актуальність вирішення задачі, представленої в даній дисертаційній роботі.

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

Дисертаційна робота виконана в рамках Національної програми "Нафта і газ України до 2010 року"; тема Д-9/04-П "Розробка наукових технологій подовження ресурсу та підвищення ефективності роботи нафтогазового обладнання" (Державний реєстраційний № 0104U004087), в якій здобувач брав безпосередню участь як виконавець.

Мета і завдання дослідження.

Метою дисертаційної роботи є вдосконалення методів оцінки довговічності колони насосних штанг з урахуванням впливу суттєвих експлуатаційних факторів.

Для досягнення цієї мети сформульовані наступні задачі:

- Здійснити статистичний аналіз аварійності елементів КНШ і визначити вплив експлуатаційних факторів на їх довговічність.
- Розробити методику аналітичного розрахунку напружень і зусилля притискання КНШ до стінки насосно-компресорних труб (НКТ) на викривлених ділянках
- Удосконалити засоби для вимірювання зусиль у верхній частині штангової колони.
- Провести експериментальні дослідження з оцінки навантаженості КНШ в експлуатаційних умовах та розробити експериментальний метод раціонального вибору значень верстата-качалки.
- Удосконалити розрахунок вантаженості КНШ.



- Розробити методику прогнозування довговічності КНШ в конкретних умовах експлуатації.

Об'єктом досліджень є штангова свердловинна насосна установка.

Предмет досліджень – колона насосних штанг.

Методи досліджень. Дослідження проводились за допомогою математичного моделювання об'єкта досліджень та експериментальних методів вимірювання навантажень на діючих ШСНУ і досліджень параметрів довговічності насосних штанг на лабораторних установках.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Удосконалено метод оцінки довговічності і залишкового ресурсу насосних штанг за допомогою кінетичних кривих втоми, з урахуванням характеру їх навантажування та термінів і умов експлуатації.

2. Дістала подальший розвиток теорія визначення напружень в штангах і зусиль притискання НШ до НКТ із урахуванням радіуса викривлення вісі свердловини та кута її нахилу.

3. Досліджено залежності навантаженості КНШ від параметрів нафтогазової суміші, а саме густини і динамічного рівня.

4. Вперше розроблено розрахунково-експериментальний метод визначення раціонального з точки зору ефективності роботи ШСНУ з урахуванням зміни динамічного рівня нафтогазової суміші.

Наукове значення отриманих результатів. Наукове значення роботи полягає в розвитку методів оцінки довговічності та залишкового ресурсу колони насосних штанг шляхом урахування суттєвих експлуатаційних факторів, а саме: складного характеру навантажування, густини і динамічного рівня нафтогазової суміші, викривленості свердловин.

Отримало подальший розвиток уявлення про фактори, що впливають на процес поступового накопичення корозійно-втомних пошкоджень насосних штанг.

Представлені методи урахування багаточастотності процесу навантажування та напружень низького рівня можуть бути застосовані при оцінці довговічності інших машин нафтової та газової промисловості.

Обґрунтування і достовірність отриманих наукових результатів. Отримані основні положення дисертації, що складають наукову новизну, сформульовані висновки і рекомендації науково обґрунтовані із залученням математичних методів теорії диференціальних рівнянь, статистичних методів обробки й аналізу результатів експериментальних досліджень.

Практичне значення одержаних результатів.

Результати досліджень, викладені в роботі, можуть бути використані на нафтовидобувних підприємствах, які застосовують штангові свердловинні насосні установки для видобування нафти. Їх практичне значення полягає в:

- розробці удосконаленого засобу вимірювання навантажень у верхній частині штангової колони, який дозволяє виділяти високочастотні цикли навантажень КНШ і проводити безпосередній запис результатів вимірювань для їх обробки на ПЕОМ;

– встановленні залежності зміни навантаженості КНШ від висоти динамічного рівня газонафтової суміші при різних значеннях її густини для існуючих конструкцій ПСНУ.

Проведені в роботі теоретичні та експериментальні дослідження використані при розробленні керівного документу „Інструкція по розрахунку і вибору колони насосних штанг”, впроваджених в ГПУ „Полтавагазвидобування” та Чернігівському НГВУ ВАТ “Укрнафта”. Розроблений засіб вимірювання навантажень у верхній частині штангової колони застосовується в учбовому процесі на кафедрі нафтогазового обладнання ІФНТУНГ.

Особистий внесок здобувача. Основні положення та результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно. У роботах, опублікованих у співавторстві, дисертанту належить: [1] – аналіз впливу викривленості свердловин на аварійність елементів колони насосних штанг, де особистий внесок здобувача складає 30%; [2] – удосконалення конструкції динамографа, де особистий внесок здобувача складає 30%; [3] – проведення експериментальних досліджень та аналіз результатів, де особистий внесок здобувача складає 30%; [4] – розроблення математичної моделі накопичення втомних пошкоджень при дії напружень, нижчих за границю витривалості, де особистий внесок здобувача складає 30%; [5] – проведення експериментальних досліджень та аналіз результатів, де особистий внесок здобувача складає 40%; [6] – обґрунтування доцільності використання методу вкладених циклів при моделюванні накопичення втомних пошкоджень в умовах випадкового навантажування, де особистий внесок здобувача складає 30%; [7] – аналіз впливу відношень амплітуд та частот двочастотного процесу навантажування на довговічність деталей машин, де особистий внесок здобувача складає 50%; [9] – аналіз впливу широкополосності випадкового процесу навантажування на накопичення втомних пошкоджень, де особистий внесок здобувача складає 40%; [10] – проведення експериментальних досліджень та аналіз результатів, де особистий внесок здобувача складає 40%; [11] – розроблення математичної моделі прогнозування залишкового ресурсу деталей у типових умовах експлуатації, де особистий внесок здобувача складає 30%.

Одна робота [8] виконана без співавторів.

Апробація результатів дисертації. Основні результати роботи доповідались та обговорювались на: 6 Міжнародному симпозиумі українських інженерів-механіків, Львів, 2003; Міжнародних наукових конференціях, м. Бая-Маре, Румунія, 2004, 2006; II Міжнародній науково-технічній конференції “Проблеми динаміки і міцності в газотурбобудуванні” – Київ, 2004; 7 Міжнародному симпозиумі українських інженерів-механіків, Львів, 2005.

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано 11 робіт, з яких 8 статей у фахових виданнях України, 3 – у збірниках праць та тез міжнародних конференцій.

Структура дисертації. Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел, що містить 151 назву на 15 сторінках, а також 2 додатків на 48 сторінках. Загальний обсяг дисертації становить 142 сторінки, в тому числі 54 рисунки (зокрема 11 на окремих сторінках) та 12 таблиць (зокрема 1 на окремій сторінці). Повний обсяг роботи – 218 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, визначені умови роботи штанг та існуючий стан аварійності обладнання штангової свердловинної насосної установки. Сформульовані мета роботи, задачі та методи досліджень, наукова новизна, практичне значення отриманих результатів, а також перелік місць апробації роботи.

У першому розділі проведено аналіз основних факторів, які впливають на навантажування і довговічність свердловинного обладнання ШСНУ.

Визначено, що найбільш небезпечними є аварії, пов'язані з поломкою штанг, оскільки вони приводять до значних простоїв всієї ШСНУ, викликаних лавильними та відновлювальними роботами.

Для статистичного аналізу на свердловинах НГВУ „Надвірнанафтогаз” за три роки (2002-2004 рр.) були зібрані дані, які дозволяють проаналізувати вплив експлуатаційних факторів: діаметра плунжера свердловинного насоса, глибини спуску насоса, газового фактора, обводненості продукції, наявності парафіно-смолистих відкладень, інтервалу кривизни свердловини на кількість відмов колони, пов'язаних з руйнуванням штанг. Із загальної кількості відмов руйнування муфти становило 21,7%, руйнування різьби штанги – 18,6%, обрив по тілу насосної штанги – 11,3%, руйнування плунжера насоса – 3,1%, відгвинчування – 7,2%, руйнування свердловинного штока – 8,2%, заміна свердловинного штока – 29,9%.

Найчастіше відмови відбувалися в інтервалі 1750...2100 м. В основному це пов'язано з експлуатацією ШСНУ на Довбушансько-Бистрицькому родовищі, де спостерігається найбільша викривленість свердловин.

Вагомий внесок у розв'язання задач аналізу роботи, розвитку теоретичних основ розрахунку навантажень, діючих на колону штанг, та аналізу надійності свердловинного обладнання внесли відомі вчені: Вірновський А.С., Молчанов Г.В., Круман Б.Б., Адонін А.Н., Пірвердян А.М., Белов І.Г., Крижанівський Є.І., Малько Б.Д., Колей Б.В., Кастроп Д., Мілс К.Н., Слоннеджер Д.С., Джонсон Д.О., Драготеску Н.Д. та ін.

Провівши велику кількість досліджень, автори дійшли висновку, що розбіжність між розрахунковими і реальними навантаженнями залежить від умов роботи штангової свердловинної насосної установки. Найбільші величини мають статичні навантаження, які нерівномірно розповсюджуються по довжині штангової колони і приймають різні значення для руху колони штанг вгору та вниз. Складовою статичних навантажень виступають сили тертя між штангами та насосно-компресорними трубами, які залежать від геометрії свердловини. Так, якщо в вертикальних свердловинах їх доля в загальному навантаженні може бути не більша за 1-5%, то в похилих свердловина вплив сил тертя різко зростає.

Внаслідок проведених досліджень визначено, що при розподілі відмов колони штанг по її довжині можна виділити чотири максимуми:

– перший знаходиться безпосередньо вгорі колони і в основному спричинений обривами полірованого штока;

- другий відповідає дії максимального розтягуючого навантаження на колону в верхній частині другої ступені штангової колони;
- третій зумовлений дією стискаючих навантажень та спіралеподібним згином у нижній частині колони штанг;
- четвертий максимум знаходиться безпосередньо над насосом і частково це обриви штока самого насоса, спричинені дією додаткових напружень згину.

Другий розділ присвячений розробці методик експериментального дослідження навантаженості та довговічності насосних штанг. На даний час існують кілька методик експериментальних досліджень навантаженості КНШ в експлуатаційних умовах. Незважаючи на велику кількість методів, за допомогою яких можна проводити оцінку технічного стану елементів ШСНУ, для оцінки навантаженості як свердловинного, так і наземного обладнання в усьому світі переважно використовуються два основних методи: динамографічний, який ґрунтується на оцінці навантаження в точці підвіски штанг та ватметрографічний, в основі якого лежить контроль графіків потужності або зміни електричного струму електродвигуна. На нафтових родовищах України основним методом, за яким визначається навантаження в верхній частині штангової колони та проводиться аналіз технічного стану свердловинного обладнання, залишається метод аналізу динамограм, отриманих за допомогою гідравлічних динамографів.

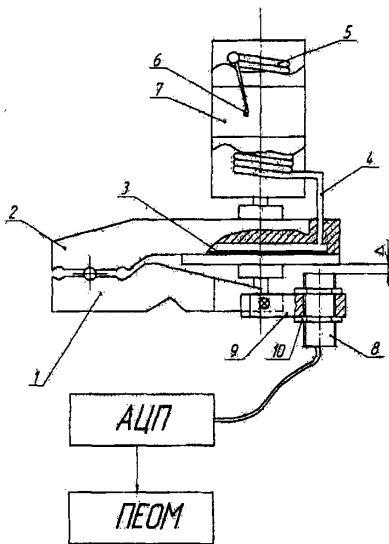


Рис. 1. Гідравлічний динамограф з розміщеним індуктивним давачем малих переміщень

Ці прилади широко використовуються на нафтовидобувних підприємствах вже понад 50 років і тому оператори мають значний досвід з їх отримання та обробки і можуть визначити по них не тільки максимальні та мінімальні навантаження, але й технічний стан свердловинного обладнання. Значним недоліком цих приладів є складність обробки результатів вимірювань з використанням ПЕОМ та низька чутливість до динамічних високочастотних навантажень. Для усунення цього недоліку на нижній планці силівимірювального вузла гідравлічного динамографа ГДМ-3 розміщено індуктивний давач малих переміщень (рис.1). Давач вимірює зміну зазору Δ між верхньою та нижньою планками силівимірювального вузла і формує вихідний сигнал, який після обробки в аналого-цифровому перетворювачі поступає для обробки в ПЕОМ. Границя приведеної похибки вимірювання положення таким динамографом в робочому температурному діапазоні (-20...+70 °С)

складає максимально 1,5%. Дана конструкція пройшла експериментальну перевірку на Довбушансько-Бистрицькому нафтовому родовищі НГВУ "Надвірнанафтогаз" ВАТ "Укрнафта".

Відомо, що зношування штанг найчастіше відбувається в нижній частині КНШ, де через складний напружений стан нерідко насосні штанги руйнуються через корозійно-втомні пошкодження. Таким чином, маємо справу з цілим комплексом руйнівних факторів, які одночасно впливають на насосну штангу: втома, корозія і зношування. Для насосних штанг найбільш актуальним є вирішення прямої задачі трибофатики, тобто визначення впливу зношування на опір втомі. Задача ускладнюється непрогнозованим впливом корозійного середовища як на два основні руйнівні фактори, так і на їх взаємодію. Для дослідження процесу зношування в корозійному середовищі в зоні прогнозованого злому штанги до експериментальної установки ІКШ-25 розроблено спеціальну насадку, яка монтується на тілі натурального зразка насосної штанги (рис.2) та імітує процес тертя НШ по НКТ.



Рис.2. Установка для корозійно-втомних фрикційних досліджень

Основне завдання, яке дозволяє вирішувати насадку, це – наскільки суттєвий вплив на опір корозійній втомі справляє фрикційна складова. Тому зупинилися на порівняльних випробуваннях з побудовою кривих корозійно-втомної довговічності без і з зношуванням при зусиллі притискання, яке найбільш типове для більшості свердловин.

У третьому розділі розглядаються теоретичні дослідження впливу експлуатаційних факторів на довговічність насосних штанг. Основними змінними

параметрами обладнання ШСНУ, від яких залежить зміна навантаженості штангової колони, є параметри газорідної суміші, що видобувається з свердловини. Діапазон можливої зміни параметрів свердловинного обладнання: площі плунжера свердловинного насоса $A_{пл}$, довжини колони штанг L , динамічного рівня $L_{дин}$ та густини газорідної суміші $\rho_{рід}$, гирлового тиску $p_{гирл}$ та тиску газу в міжтрубному просторі $p_{затр}$ приводиться в табл. 1.

Таблиця 1 Діапазон можливої зміни параметрів глибинного обладнання

Параметр	$A_{пл}$, мм	L , м	$L_{дин}$, м	$\rho_{рід}$, кг/м ³	$p_{гирл}$, МПа	$p_{затр}$, МПа
Мін.	28	200	0	600	0,5	0,1
Макс.	95	2200	2200	1000	2	15

Визначено, що найбільш суттєвими факторами, які впливають на зміну навантаженості при роботі ПСНУ, виступають динамічний рівень та густина газорідинної суміші.

При низькому динамічному рівні, який складає до 100 м від прийому насоса, в залежності від густини рідини, ця сила може досягати $0.4 \div 0.65$ кН для насоса з діаметром плунжера 28 мм та $4.8 \div 7.7$ кН – для насоса з діаметром плунжера 93 мм. При цьому зміна густини газорідинної суміші від $\rho_{\text{рід}} = 1000$ кг/м³ до $\rho_{\text{рід}} = 600$ кг/м³ призводить до зростання навантаження на $\Delta F_1 = 0.25$ кН для насоса з діаметром плунжера 28 мм та на $\Delta F_1 = 2.9$ кН – для насоса з діаметром плунжера 93 мм. Таким чином, залежність навантаження від густини рідини зростає при збільшенні діаметра насоса. Збільшення динамічного рівня призводить до зростання сили тиску за лінійним законом і залежить від густини газорідинної суміші. Так, наприклад, для насоса з діаметром 28 мм при динамічному рівні 400 м та густині суміші $\rho_{\text{рід}} = 600$ кг/м³ (вміст води менше 10%, високий газовий фактор) $F_{\text{нр}} = 1.51$ кН, а при густині $\rho_{\text{рід}} = 1000$ кг/м³ (обводненість більше 80%) $F_{\text{нр}} = 2.48$ кН (рис. 3). Тобто зростання динамічного рівня до 400 м призвело до збільшення сили на прийомі насоса в 2.5 рази при $\rho_{\text{рід}} = 600$ кг/м³, а при зростанні густини газорідинної суміші до $\rho_{\text{рід}} = 1000$ кг/м³ – в 4.1 рази. Встановлено, що при одночасній зміні цих параметрів їх вплив більш складний, оскільки зменшення густини рідини приводить до сповільнення інтенсивності спадання максимального навантаження й до зростання мінімального.

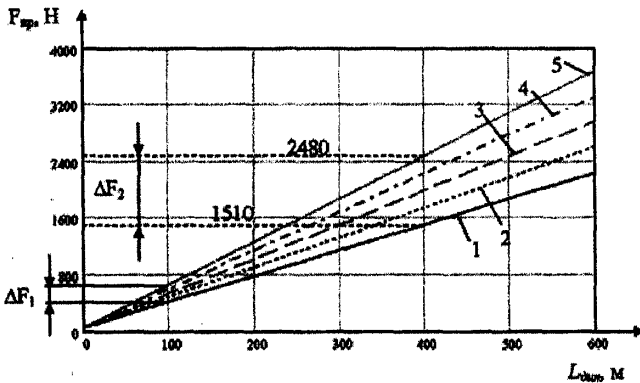


Рис. 3. Вплив динамічного рівня та густини рідини на силу, яка діє на плунжер насоса

- 1 - $\rho_{\text{рід}} = 600$ кг/м³;
- 2 - $\rho_{\text{рід}} = 700$ кг/м³;
- 3 - $\rho_{\text{рід}} = 800$ кг/м³;
- 4 - $\rho_{\text{рід}} = 900$ кг/м³;
- 5 - $\rho_{\text{рід}} = 1000$ кг/м³.

Сучасні тенденції розвитку нафтовидобувної галузі полягають у збільшенні середніх глибин свердловин та все більшому поширенні буріння похило-спрямованих свердловин. Для оцінки довговічності КНШ в умовах одночасної дії зношування і корозійної втоми необхідно знати напруження згину в НШ та силу контактної взаємодії НШ і НКТ на скривленій ділянці. Для цього автором запропоновано рівняння, які дозволяють визначати максимальні напруження згину σ , (Па) та реакцію взаємодії R , (Н):

$$\sigma = \frac{Ed_{um}}{24} \frac{6tg(\varphi/2) - \varphi}{\rho - \rho \cdot \cos(\varphi/2) + a \cdot \cos(\varphi/2)} \varphi \cdot \cos(\varphi/2), \quad (1)$$

$$R = \frac{EI\varphi}{36} \left(\frac{(6tg(\varphi/2) - \varphi)\cos(\varphi/2)}{\rho(1 - \cos(\varphi/2)) + a \cdot \cos(\varphi/2)} \right)^2, \quad (2)$$

де φ – кут викривлення, рад.;

ρ – радіус викривлення, м;

a – різниця внутрішнього діаметра НКТ і зовнішнього діаметра штангової муфти, м;

d_{um} – діаметр штанги, м.

Проведений аналіз залежності зусилля притискання від радіуса викривлення свердловини (рис.4) дозволив встановити, що зменшення радіуса кривизни свердловини призводить до різкого збільшення сили притискання в інтервалі 0...30 м.

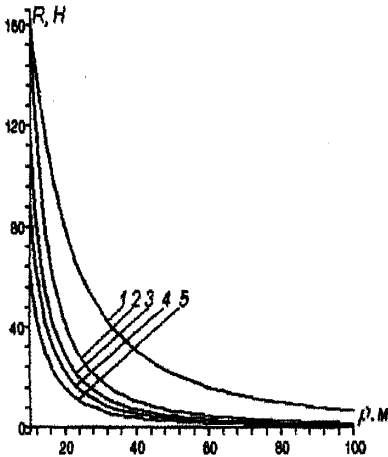


Рис.4. Залежність сили притискання колони штанг від радіуса викривленої ділянки при куті викривлення свердловини: 1 – 6°; 2 – 30°; 3 – 45°; 4 – 60°; 5 – 90°.

Більш детально залежність сили притискання від кута нахилу свердловини показана на рис. 5. Як бачимо, залежність має екстремальний характер з піком при $\varphi=10..20^\circ$. Збільшення радіуса викривлення ділянки до 50 м і більше суттєво нівелює вплив кута нахилу і зменшує силу притискання.

Залежності напружень згину від діаметра штанги, кута нахилу та радіуса викривлення криволінійної ділянки свердловини наведені на рис. 6. Їх аналіз свідчить про лінійну залежність напружень від діаметра штанги (див. рис. 6 а) при інших рівних умовах ($\rho=100$ м, $\varphi=30^\circ$, $a=25$ мм). Збільшення кута викривлення від 0 до 20° ($\rho=100$ м, $d_{um}=19$ мм, $a=25$ мм) різко збільшує напруження (див. рис. 6 б),

але його подальший ріст несуттєво впливає на напруження. В найбільшій степені на напруження впливає радіус викривленої ділянки (див. рис. 6 в). При цьому проведені дослідження при різних параметрах показали, що мінімально прийнятною величиною радіуса викривлення є 50 м.

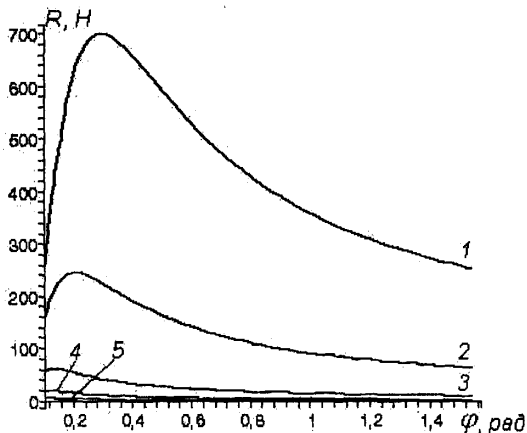


Рис. 5. Залежність сили притискання колони штанг від кута свердловини при радіусі викривленої ділянки:

1 – 5 м; 2 – 10 м; 3 – 25 м; 4 – 50 м; 5 – 100 м.

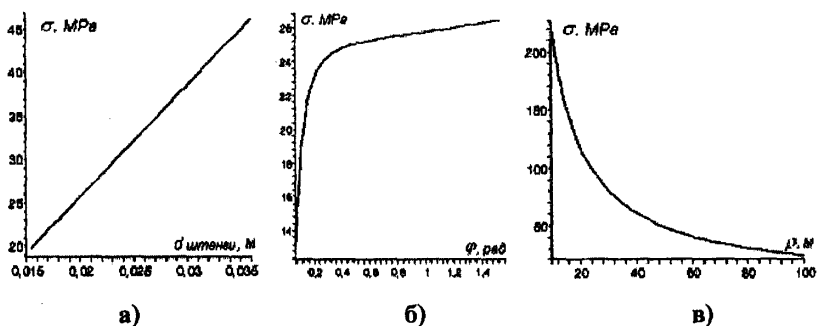


Рис. 6. Залежність максимальних напружень згину штанги на викривленій ділянці свердловини від:

- а) діаметра штанги; б) кута викривлення свердловини;
в) радіуса викривлення свердловини.

Під час роботи ШСНУ насосні штанги перебувають під дією не тільки статичних, але й динамічних навантажень, зумовлених впливом сил інерції та коливаннями колони штанг. Причому в штангах виникають коливання як низьких, так і високих частот. Оскільки параметри газорідної суміші можуть змінюватись в часі, то штанги перебувають під дією випадкового навантаження. В роботі розроблено модель, яка базується на розробленому методі схематизації випадкових процесів та гіпотезі про можливість роздільного урахування складності структури та послідовності амплітуд процесу навантажування. Модель дозволяє враховувати складність процесу навантажування при розрахунках довговічності штанг. Аналіз даних з навантаженості КНШ в експлуатаційних умовах показує значну кількість напружень з амплітудами σ_{\max} , нижчими за границю витривалості штанг, і високим коефіцієнтом асиметрії R . Для їх урахування після схематизації процесу проводиться приведення напружень до еквівалентного симетричного циклу $\sigma_{екв}$ з допомогою запропонованого рівняння

$$\sigma_{екв} = \sigma_0 \psi_1 \frac{1 + \psi}{1 + \psi_1}, \quad (3)$$

де σ_0 – границя міцності матеріалу штанги, МПа;

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

σ_{-1} – границя витривалості при симетричному циклі навантажування;

σ_0 – границя витривалості при віднульовому циклі навантажування.

$\psi_1 = \frac{\sigma_{\max}(1 - R)}{2\sigma_0 - \sigma_{\max}(1 + R)}$ – уточнюючий коефіцієнт впливу високої асиметрії

циклу навантаження.

У четвертому розділі представлені результати експериментальних досліджень навантаженості та довговічності НШ. Дослідження проводились на свердловинах № 4, 88 та 90 Довбушансько-Бистрицького нафтового родовища, оснащених штанговими свердловинними насосними установками. На свердловинах записувались динамограми за допомогою гідравлічного динамографа ГДМ-3 та розробленої виміральної системи з використанням індуктивного давача малих переміщень. При цьому проводився запис діючих зусиль на протязі достатньо тривалого часу, що давало можливість оцінити сталість процесу навантаження (рис.7).

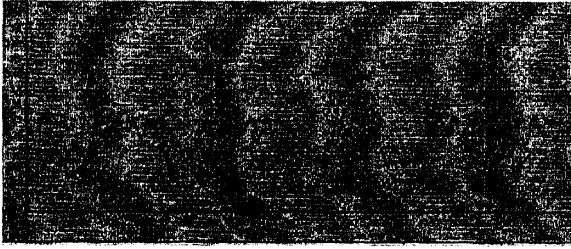


Рис. 7. Експериментальний графік навантаження колони штанг при проведенні досліджень на свердловині № 88 Довбушансько-Бистрицького родовища.

З метою перевірки теоретичних розрахунків проведено аналіз впливу зміни динамічного рівня нафтогазової суміші на навантаженість штангової колони. Для цього після перших вимірів навантажень верстат-качалку було зупинено на 30 хв., після чого проведено зняття наступної динамограми і визначення максимальних та мінімальних навантажень. Порівняльні графіки навантаження, записані на свердловині № 4 Довбушансько-Бистрицького родовища при різних динамічних рівнях, наведені на рис. 8.

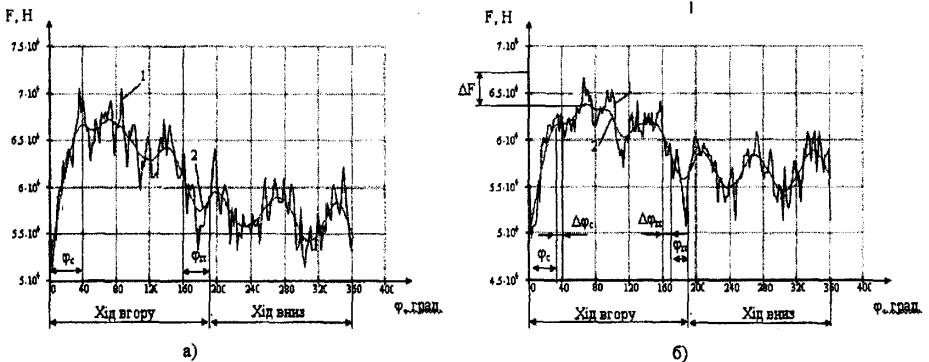


Рис. 8. Графіки навантаження, отримані при проведенні досліджень на свердловині № 4:

а) – первинний; б) – через 30 хв.:

1 – без обробки результатів вимірювання; 2 – при згладжуванні методом найменших квадратів.

У першому випадку максимальні навантаження склали 67256 Н для згладженої динамограми та 70500 Н при врахуванні коливань вищих амплітуд, мінімальні навантаження склали 54321 Н та 51403 Н відповідно. Після зупинки верстата-качалки динамічний рівень рідини за трубами НКТ піднявся, що призвело до зменшення гідродинамічного тиску на плунжер стовпа рідини, яка знаходиться в колоні НКТ, а отже й максимального навантаження. Розроблена методика дозволяє здійснювати підбір раціональних режимів роботи ШСНУ. Знаючи об'єм простору між НКТ та експлуатаційною колоною, можна визначити приплив рідини з пласта та задати необхідне число качань для підтримання

заданої величини динамічного рівня і стабілізації навантаженості штангової колони.

Однією з задач даної роботи є визначення залишкового ресурсу насосних штанг в типових умовах експлуатації з допомогою кінетичної діаграми втоми.

Експериментальні дослідження довговічності насосних штанг з різним ступенем корозійно-втомного пошкодження проводили на випробувальній установці ІКШ-25. Натурні зразки відрізали від насосних штанг діаметром 19 мм, виготовлених зі сталі 20Н2М згідно з ГОСТ 13877-80, різного ступеня пошкодження (нові, після 4 і 8 років експлуатації на глибині близько 1000 м).

Генеральна вибірка експериментальних даних показана на рис. 9. В результаті обробки з допомогою розробленої уточненої методики отримали параметри кінетичної діаграми насосних штанг, наведені в таблиці 2.

Таблиця 2 Параметри кінетичної діаграми корозійної втоми насосних штанг

Термін експлуатації K , роки	Q , МПа	σ_R , МПа	V_0 , МПа	N_0 , цикли	\bar{S}_{σ_R} , МПа
$K=0$ (нові штанги)	$3,268 \cdot 10^7$	101,0	429,5	$3,23 \cdot 10^5$	47,8
$K=4$	$2,918 \cdot 10^7$	90,3			31,9
$K=8$	$2,026 \cdot 10^7$	62,6			27,8

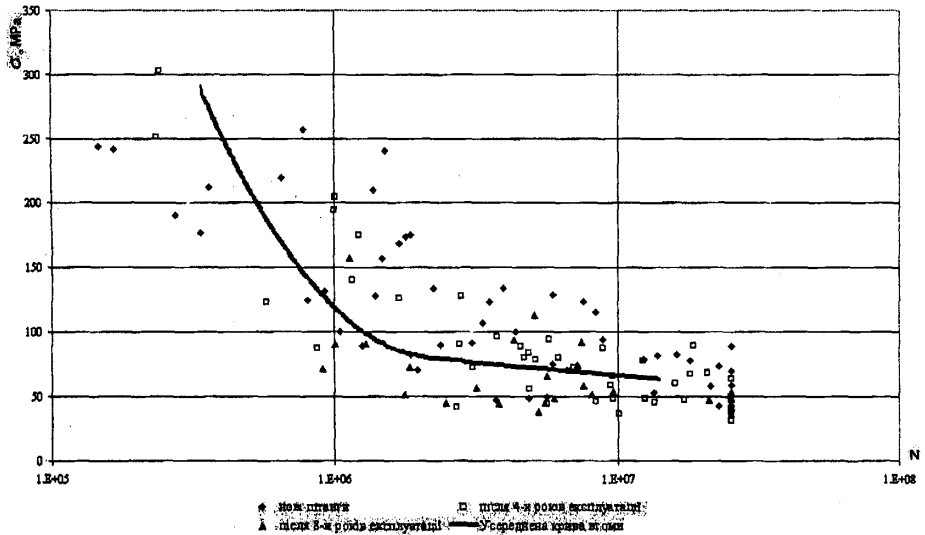


Рис. 9. Результати випробувань та усереднена крива втоми

Завершальним етапом обробки експериментальних даних є оцінка залишкового ресурсу насосних штанг після 8 років експлуатації в типових

умовах. Для імовірності неруйнування 0,5 отримаємо залишковий ресурс $\Delta p = 4,8$ років.

Отже, аналіз проведених експериментальних досліджень з допомогою вдосконаленої методики прогнозування залишкового ресурсу деталей та обладнання в типових умовах експлуатації дозволив визначити параметри кінетичної діаграми корозійної втоми насосних штанг. На основі даних параметрів оцінено залишковий ресурс штанг після визначеного терміну експлуатації.

Також проведено дослідження довговічності колони насосних штанг з урахуванням експлуатаційного навантаження. Згідно з розробленою методикою, оцінка пошкоджуючої дії навантаження проводилась за методом вкладених циклів (рис.10).

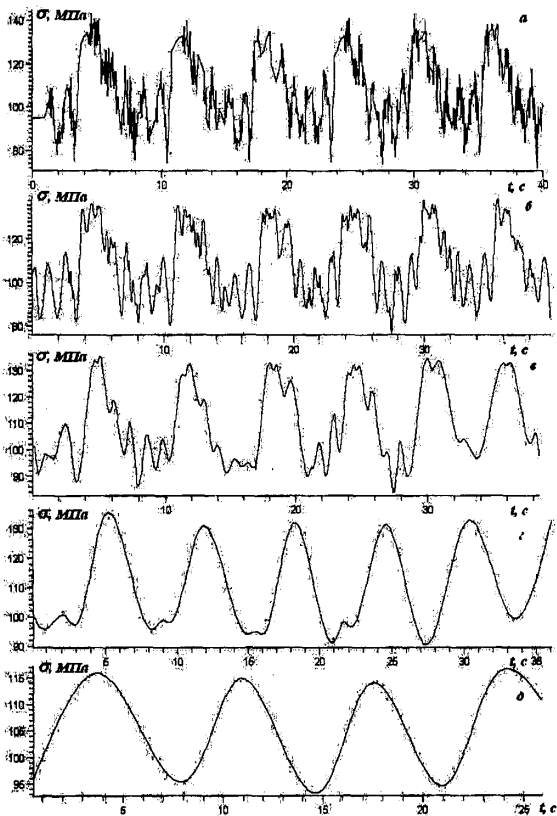


Рис. 10. Схематизований процес навантаження:
а – 1; б – 2; в – 3; г – 4; д – 5 етапи схематизації

Проведені експериментальні дослідження та дослідження з оцінки довговічності НШ інших авторів свідчать про високий рівень статистичного розсіяння довговічності та границі витривалості насосних штанг. Наприклад, лабораторні корозійно-втомні дослідження показали, що для імовірності неруйнування 0,9 границя витривалості $\sigma_{-0,9}$ рівна 21,8 МПа. При такому значенні границі витривалості довговічність в умовах дослідженого блоку навантажування з урахуванням зниження σ_{-1} складає всього 2,5 доби безперервної роботи. Проведені більш глибокі дослідження залежності довговічності від σ_{-1} показали, що довговічність при досягненні границею витривалості значень, нижчих максимального рівня блоку експлуатаційних напружень, не перевищує 3 років безперервної роботи. Таким чином, високий рівень аварійності КНШ в початковий період пояснюється наявністю в ній НШ з низькою границею витривалості, близькою до максимального рівня експлуатаційної навантаженості. Другий пік аварійності, який настає після 8-10 років експлуатації, пояснюється незворотнім процесом поступового накопичення корозійно-втомного пошкодження НШ під час експлуатації, який спричинює зменшення початкового значення границі витривалості до рівня експлуатаційної навантаженості. Наприклад, лабораторні дослідження показали зменшення медіанного значення границі витривалості за 8 років з 101 до 62,6 МПа.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У результаті проведення теоретичних і експериментальних досліджень отримано нове вирішення науково-технічної задачі оцінки довговічності насосних штанг з урахуванням експлуатаційних факторів їх роботи.

1. Проведено статистичний аналіз аварійності КНШ в НГВУ "Надвірна нафтогаз" за 2002-2004 роки. Знайдені залежності відмов колон від таких параметрів, як діаметр насоса, глибина його спуску, кривизна стовбура свердловини, обводненість, газовий фактор и наявність відкладень парафіну. Виявлено характер залежності частоти різного типу відмов від відносної глибини обриву.
2. Розроблено і обґрунтовано удосконалену аналітичну методику визначення сил та напружень в КНШ на викривленій ділянці з урахуванням зазору між НШ і НКТ. Результати досліджень за розробленою методикою дали можливість встановити, що раціональними з точки зору надійності КНШ є профілі свердловин, в яких радіуси викривлення не менші за 50 м. Досягнення великих кутів нахилу, навіть до горизонтальних ділянок, не є небезпечним при умові великих радіусів викривлення перехідних ділянок.
3. Розроблено удосконалений метод експериментального дослідження навантаження колони насосних штанг. Запропоновано конструкцію гідравлічного динамографа з індуктивним давачем малих переміщень. Проведені лабораторні та промислові дослідження конструкції показали її працездатність для експериментального визначення навантаження колони насосних штанг в експлуатаційних умовах.
4. Проведено оцінку експлуатаційного навантажування колони насосних штанг і його впливу на їх довговічність. Проаналізовано результати експлуатаційного

- навантажування насосних штанг на працюючих свердловинах, які отримані за допомогою розробленої конструкції динамографа з давачем малих переміщень. Розроблено розрахунково-експериментальний метод визначення довжини ходу та числа качань насоса для заданого діаметра плунжера, при яких можлива стабілізація динамічного рівня рідини, тобто узгодження припливу рідини з свердловини та подачі глибинного насосу. Розрахунки, проведені за даною методикою для дослідної свердловини, показали, що для підтримання необхідного динамічного рівня число качань балансира необхідно знизити до $n = 2.15$ кач./хв., а довжину ходу плунжера до 1 м.
5. Удосконалено розрахункову методику приведення до еквівалентного симетричного процесу низьких напружень спектра навантажування, яка враховує чутливість до асиметрії навантажування високого рівня. Обґрунтовано необхідність комплексного урахування параметрів навантажування і характеристик опору втомі НШ, які підлягають впливу багаточастотного навантажування.
 6. Розроблено вдосконалену методику прогнозування довговічності і залишкового ресурсу КНШ в типових умовах експлуатації. З допомогою даної методики визначено параметри кінетичних кривих втомі НШ (нових, після 4 і 8 років експлуатації), а також залишковий ресурс після 8 років експлуатації, який становить 4,8 років. Дослідження показали зменшення медіанного значення границі витривалості за 8 років з 101 до 62,6 МПа.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Пушкар П.В., Павлюк Я.Ю., Матвіїшин Т.Б., Артим В.І. Аналіз відмов колон насосних штанг в НГВУ "Надвірнанафтогаз" // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2006. – № 1. – С. 116-120
2. Івасів В.М., Харун В.Р., Пушкар П.В., Артим В.І., Атаманчук І.С. Удосконалення експериментального дослідження навантаження колони насосних штанг // Науковий вісник ІФНТУНГ. Нафтогазопромислове обладнання. – Івано-Франківськ. – 2005. – № 3. – С. 31-35
3. Івасів В.М., Артим В.І., Харун В.Р., Пушкар П.В. Оцінка експлуатаційної навантаженості та її вплив на довговічність насосних штанг // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2005. – № 4. – С. 77-81.
4. Івасів В.М., Артим В.І., Пушкар П.В., Козак О.М. Врахування напружень низького рівня при розрахунках довговічності деталей машин // Машинознавство. – 2003. – № 12. – С. 17-20
5. Артим В.І., Івасів В.М., Федорович Я.Т., Пушкар П.В. Визначення залишкового ресурсу насосних штанг в типових умовах експлуатації // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2005. – № 2. – С. 79-82
6. Артим В.І., Пушкар П.В. Моделювання накопичення втомних пошкоджень при випадковому навантажуванні // "Авиационно-космическая техника и технология" – Харьков. – 2004. – № 1. – С 19-24

7. Івасів В.М., Артим В.І., Пушкар П.В. Оцінка впливу параметрів двочастотного процесу навантажування на довговічність деталей машин // Вібрації в техніці та технологіях. – 2004. – № 5 (37). – С. 113-116
8. Пушкар П.В. Визначення сил та напружень в насосних штангах на скривленій ділянці свердловини // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – Івано-Франківськ. – 2005. – № 3. – С. – 63-66
9. Karpash O., Ivasiv V., Artym V., Pushkar P. Calculation of fatigue damages upbuilding for complicating loading processes // 36. матеріалів Міжнародної наукової конференції. – м. Бая-Маре, Румунія. – 2004. – С. 355-360
10. Artym V., Pushkar P., Fedorovych Y., Karpuk R. Reliability Research of Pump Rods under Wear-Fatigue Conditions // 36. матеріалів Міжнародної наукової конференції. – м. Бая-Маре, Румунія. – 2006. – С. 21-26
11. Івасів В.М., Артим В.І., Пушкар П.В. Удосконалена методика прогнозування залишкового ресурсу деталей у типових умовах експлуатації / Тези доповідей 7 Міжнародного симпозіуму українських інженерів-механіків. – Львів. – 2005. – С. 102

АНОТАЦІЯ

П.В. Пушкар. Оцінка довговічності насосних штанг з урахуванням експлуатаційних факторів. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.12 – Машини нафтової і газової промисловості. – Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ, 2007.

Дисертацію присвячено удосконаленню методів оцінки довговічності колони насосних штанг з урахуванням впливу суттєвих експлуатаційних факторів.

На основі інформації по відмовам КНШ в „Надвірнанафтогаз” здійснено статистичний аналіз аварійності елементів КНШ і визначено вплив експлуатаційних факторів на їх довговічність. Підкреслено значний вплив викривленості свердловин на частоту та розподіл відмов.

Розроблено методику аналітичного розрахунку напружень і зусилля притискання КНШ до стінок насосно-компресорних труб (НКТ) на скривлених ділянках. За даною методикою проаналізовано закономірності впливу профілю свердловини та параметрів КНШ на зусилля притискання та напруження згину в НШ.

Розроблено методику та необхідні засоби для дослідження впливу тертя НШ по НКТ на її корозійно-втомну довговічність. Результати досліджень дозволили зробити висновок про позитивний вплив фрикційної складової на корозійно-втомну довговічність НШ для мало скривлених свердловин (зусилля притискання до 100 Н).

Значну увагу приділено розробці удосконаленого засобу вимірювання навантажень, діючих в верхній частині штангової колони, який дозволяє виділяти високочастотні цикли навантажень КНШ і проводити безпосередній запис результатів вимірювань для їх обробки на ПЕОМ.

З допомогою розробленого удосконаленого динамографа з індукційним давачем переміщень проведено експериментальні дослідження з оцінки навантаженості КНШ в експлуатаційних умовах та розроблено розрахунково-експериментальний метод раціонального вибору кінематичних характеристик приводу. Удосконалено розрахункові методики оцінки впливу експлуатаційного процесу навантажування на довговічність насосних штанг, а саме, впливу багаточастотності та напружень, нижчих за границю витривалості матеріалу НШ.

Розроблено розрахунково-експериментальний метод з оцінки залишкового ресурсу КНШ в конкретних умовах експлуатації.

Ключові слова: штангова свердловинна насосна установка, динамограф, моделювання навантаження, довговічність, залишковий ресурс.

АННОТАЦИЯ

П.В. Пушкар. Оценка долговечности насосных штанг с учетом эксплуатационных факторов. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.05.12 – Машины нефтяной и газовой промышленности. – Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, Ивано-Франковск, 2007.

Диссертация посвящена усовершенствованию методов оценки долговечности насосных штанг с учетом существенных эксплуатационных факторов.

В первом разделе рассмотрено состояние исследований по тематике диссертационной работы. На основе информации по отказам колонн насосных штанг (КНШ) в „Надворнаянефтегаз” осуществлен статистический анализ аварийности элементов КНШ и определено влияние эксплуатационных факторов на их долговечность. Подчеркнуто значительное влияние искривленности буровых скважин на частоту и распределение отказов.

Рассмотрены работы отечественных и зарубежных ученых, касающиеся прогнозирования долговечности колонны в эксплуатационных условиях. На завершение раздела обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы задачи исследований.

Во втором разделе разработана методика и необходимые средства для исследования влияния трения НШ по НКТ на ее коррозионно-усталостную долговечность.

Значительное внимание уделено разработке усовершенствованного средства измерения нагрузок, действующих в верхней части штанговой колонны, которое позволяет выделять высокочастотные циклы нагрузок КНШ и проводить непосредственную запись результатов измерений для их обработки на ЭВМ.

В третьем разделе разработана методика аналитического расчета напряжений и усилия прижимания КНШ к стенкам насосно-компрессорных труб (НКТ) на искривленных участках. По данной методике проанализировано закономерности влияния профиля буровой скважины и параметров КНШ на усилие прижимания и напряжение изгиба в НШ.

Разработан расчетно-экспериментальный метод оценки остаточного ресурса КНШ в конкретных условиях эксплуатации.

Четвертый раздел посвящен экспериментальным исследованиям нагружения, долговечности и остаточного ресурса колонны насосных штанг. Проведена оценка эксплуатационной нагрузки колонны насосных штанг и его влияния на ее долговечность. Проанализированы результаты эксплуатационной нагрузки насосных штанг на работающих буровых скважинах, которые получены с помощью разработанной конструкции динамографа с датчиком малых перемещений. Разработан расчетно-экспериментальный метод определения длины хода и числа качаний насоса для заданного диаметра плунжера. С помощью данного метода возможно стабилизировать динамический уровень жидкости, т.е. согласовать приток жидкости из буровой скважины и подачу глубинного насоса. Также проведено исследования долговечности колонны насосных штанг с учетом эксплуатационного нагружения.

Анализ проведенных экспериментальных исследований с помощью усовершенствованной методики прогнозирования остаточного ресурса деталей и оборудования в типичных условиях эксплуатации позволил определить параметры кинетической диаграммы коррозионной усталости насосных штанг. На основе данных параметров рассчитан остаточный ресурс штанг после определенного срока эксплуатации.

Ключевые слова: штанговая скважинная насосная установка, динамограф, моделирование нагружения, долговечность, остаточный ресурс.

THE SUMMARY

P.V.Pushkar. Evaluating of rods durability taking into account operational factors. – Manuscript.

Dissertation for a Candidate's degree in 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, 2007.

The statistical analysis of rods string (RS) elements accident rate based on breakdowns data of "Nadvirnaftogas" is carried out and operational factors effect on rods durability is worked out. Significant influence of wells deviation on breakdowns frequency and distribution is emphasized.

The method of analytical calculation of stress and RS press strain to the tubing walls on deviated parts is developed. Principles of well profile and RS parameters influence on press strain and bend strain in rods are analyzed.

The method and wherewithal for research of influence of rod and tubing friction on its corrosion-fatigue durability are developed. Research results gave the possibility to conclude about positive influence of frictional constituent on rods corrosion-fatigue durability for weakly deviated wells (press strain less than 100 N).

Significant attention is focused on development of improved device of loads measurement that act on the top of rod string. Improved dynamograph with induction displacement transducer allows to single out high-frequency cycles of RS loads and to conduct immediate recording of measurement results for its processing.

Experimental researches of RS load evaluating in working conditions by developed dynamograph with induction displacement transducer are carried out. Experimental calculated method of efficient choice of drive's kinematical characteristic is developed. Design methods of evaluating of loading process influence on rods durability, namely, multifrequency and strains influence that are less than endurance limit of rod's material are improved.

Experimental calculated method of evaluating of RS remaining life in specific working conditions is developed.

Key words: oil well pumping unit, dynamograph, loads simulating, durability, remaining life.