

622.276.53.054

Б-23

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

Бандура Вікторія Валеріївна

.054(043)

УДК 622.276.53:621.671(047)

Б23

**РОЗРОБКА МЕТОДУ ВІБРАЦІЙНОГО КОНТРОЛЮ
ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ШТАНГОВИХ
ГЛИБИННО-НАСОСНИХ УСТАНОВОК
ДЛЯ ВИДОБУТКУ НАФТИ**

05.11.13. Прилади і методи контролю та визначення складу речовин

АВТОРЕФЕРАТ

**ДИСЕРТАЦІЇ НА ЗДОБУТТЯ НАУКОВОГО СТУПЕНЯ
КАНДИДАТА ТЕХНІЧНИХ НАУК**



Івано-Франківськ - 2000

Дисертацією є рукопис

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

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор

Заміховський Леонід Михайлович,

Івано-Франківський державний технічний

університет нафти і газу,

завідувач кафедри автоматизованого управління.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, доцент

Копей Богдан Володимирович,

Івано-Франківський державний технічний університет нафти і газу,

професор кафедри нафтового обладнання;

доктор технічних наук, професор

Поджаренко Володимир Олександрович

Вінницький державний технічний університет,

завідувач кафедри метрології та промислової автоматики.

K/CSC

Провідна установа: ВАТ "Український нафтовий інститут",

науково-дослідний відділ видобутку нафти, газу і конденсату,

Київ

спеціалізованої вченої
університеті нафти і

Івано-Франківського державного
технічного університету нафти і газу (вул.
Карпатська, 15)

Дранчук М.М.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Сьогодні більше 70% діючого фонду нафтових свердловин України оснащені штанговими глибинно-насосними установками (ШГНУ), за допомогою яких видобувається до 50% всієї нафти. Це пояснюється відносною простотою конструкції ШГНУ, яка забезпечує їх надійність, зручність експлуатації мало- та середньодібних свердловин і обумовлює тенденцію їх подальшого збільшення.

В той же час, як показує практика, незважаючи на простоту конструкції ШГНУ, при їх експлуатації мають місце багаточисельні відмови і аварії. Будь-яка відмова ШГНУ пов'язана з необхідністю проведення підземного ремонту свердловини, тривалість якого з подальшим освоєнням свердловин може сягати декількох діб, а витрати на його проведення деколи співставимі з вартістю самого обладнання.

У зв'язку з цим питання контролю технічного стану (в подальшому – стану) ШГНУ є одним з центральних і вимагає використання методів технічної діагностики.

Аналіз сучасного стану методів діагностування ШГНУ показав, що найбільш розповсюдженими залишаються динамометричний та ватметрографічний методи, які мають ряд недоліків. Так, динамометричний метод може застосовуватися лише у випадках, коли мають місце незначні спотворюючі збурення – мале число качань, невелика глибина свердловини та ін., а на точність оцінки стану ШГНУ при використанні ватметрографічного методу впливають додаткові спотворення ватметрограм, обумовлені кінематикою верстата-качалки (ВК), ступінню його зрівноваженості, характеристикою привідного електродвигуна ВК, величиною його завантаження, тощо.

В той же час така діагностична інформація як вібрація, котра супроводжує роботу ШГНУ і обумовлена її кінематикою і конструктивними особливостями, не використовувалась для контролю її стану, хоча відомо, що певні види відмов призводять до зміни характеристики вібраційних процесів (діагностичних ознак), які супроводжують роботу ШГНУ.

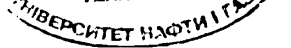
У зв'язку з цим розробка нових віброакустичних методів діагностування ШГНУ і модернізація загальноприйнятих, зокрема динамографічного, є актуальною задачею, яка має важливе народногосподарське значення.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тематика роботи є частиною планових науково-дослідних програм по розвитку нафтопромислового комплексу України і базується на результатах держбюджетних науково-дослідних робіт "Розробка теоретичних та методологічних принципів діагностики обладнання нафтогазового комплексу України", частина науково-дослідної теми 45/1 номер державної реєстрації в УкрНДІНТІ №01980005799 та "Діагностування стану технічних об'єктів на основі обмеженої інформації про переміщення точок їх поверхні", частина науково-дослідної теми Д6-Ф, номер державної реєстрації в УкрНДІНТІ №0198U06 методології діагностування ШГНУ науки "Наукові основи розробки



as1068

Державний науково-технічний центр розробки ційний план Міністерства освіти і науки України
Державний науково-технічний центр розробки нафти і газу, газопромислового технічного



обладнання, поглибленої переробки нафти і газу з метою отримання високоякісних моторних палив, мастильних матеріалів, допоміжних продуктів і нафтохімічної сировини”. Вказаний план входить в національну програму “Нафта і газ України”.

Мета і задачі досліджень. Метою роботи є підвищення надійності ШГНУ на стадії експлуатації та попередження аварій, пов’язаних з обривом свердловинного насоса (СН) та штангової колони (ШК), шляхом контролю за фактичним станом ШГНУ. Останній здійснюється на основі розробленого вібраційного методу.

Для досягнення вказаної мети необхідно вирішити наступні логічно пов’язані задачі:

1. Проаналізувати основні види відмов ШГНУ і закономірності їх виникнення з врахуванням впливових факторів зокрема, вібрації, та сучасні тенденції методів і засобів діагностування ШГНУ.

2. Створити діагностичні моделі ШГНУ. Дослідити закономірності зміни коливних процесів (КП) в ШК, обумовлених зміною стану ШГНУ.

3. Розробити методичне, технічне та програмне забезпечення експериментальних досліджень вібраційного стану ШГНУ в процесі експлуатації.

4. Розробити метод вібраційного контролю стану ШГНУ та провести його промислово апробацію.

Об’єкт дослідження – механізований спосіб видобутку нафти за допомогою ШГНУ, при експлуатації яких виникають різноманітні дефекти, що викликають зміну стану ШГНУ, який не завжди однозначно можна визначити за допомогою відомих (динамографічного та ватметрографічного) методів контролю. Останнє призводить як до зниження ефективності процесу видобутку нафти, так і до виникнення аварійних ситуацій.

Предметом дослідження є встановлення закономірностей зміни коливних процесів в ШК, обумовлених деградаційними (в основному – зносними) процесами в елементах і вузлах СН та розробка на їх основі методу вібраційного контролю стану ШГНУ.

Методи дослідження. При аналізі відмов ШГНУ використовували методи математичної статистики. При розробці діагностичних моделей використані методи математичної фізики, чисельні методи розв’язку задач математичної фізики та теорія звичайних диференціальних рівнянь, методи побудови логічних моделей.

При розробці технічного забезпечення експериментальних досліджень використовувалися методи схемо- і системотехніки, методи вібро- і тензометрії та основні положення теорії статистичних вимірювань. При аналізі результатів експериментальних досліджень і вирішенні задачі віброконтролю ШГНУ, використовувалися: математичний апарат теорії коливань; методи спектрального і кореляційного аналізу; основні положення віброакустичної діагностики та теорії розпізнавання образів, методи статистики та оцінки статистичних зв’язків.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у розвитку нового напрямку – методів вібраційного контролю технічного стану ШГНУ і визначається наступними основними положеннями:

- вперше створена логічна діагностична модель СН, яка дозволяє прослідкувати напрямок розвитку дефектів, класифікувати та визначити зв'язок з іншими дефектами;

- створена математична діагностична модель, яка дозволяє описати коливання ШГНУ з урахуванням реальних умов експлуатації, і в якій, з метою врахування особливого характеру тертя, використано опис процесу коливань на основі рівняння Ван-дер-Поля та проведено оцінку їх параметрів;

- вперше проведено дослідження статистичних характеристик коливного процесу (КП) в ШК – віброшвидкості її поздовжніх коливань, встановлено, що він відноситься до “нестационарно-періодичних” випадкових процесів та вибрано методи його обробки;

- вперше виділені і досліджені інформативні ділянки КП в ШК за період качань, зміна амплітудних складових спектру яких обумовлена розвитком деградаційних (зносних) процесів в вузлах і деталях СН, що дозволяє використати їх при виборі діагностичних ознак (ДО) стану ШГНУ;

- виявлена і досліджена ДО стану ШГНУ – відношення логарифмічного декремента затухання автокореляційної функції (АКФ) на інтервалах зняття та сприйняття навантаження ШК, зміна якої в часі характеризує зміну стану установки, визначені умови і проведена оцінка ступеню роботоздатності ДО з врахуванням похибки вимірювання.

Практичне значення отриманих результатів полягає в розробці:

- методу вібраційного контролю стану ШГНУ, технічних засобів, в основу яких покладені оригінальні схемні та конструктивні рішення, та програмного забезпечення для його реалізації, які дозволяють отримувати оперативну і достовірну інформацію про стан установки і на її основі проводити ремонт ШГНУ за фактичною потребою;

- методики визначення моменту часу сприйняття навантаження за максимальним значенням взаємкореляційної функції (ВЗФ) між реальною і еталонними наземними динамограмами, використання якої дозволяє відмовитися від додаткового давача переміщення ШК.

Розроблений метод і технічні засоби пройшли промислово апробацію в НГВУ “Надвірна нафтогаз” і прийняті до впровадження НГВУ “Надвірна нафтогаз”, “Борислав нафтогаз”, “Долина нафтогаз” та “Чернігів нафтогаз” ВАТ “Укрнафта”.

Результати теоретичних і експериментальних досліджень впроваджено в навчальному процесі – в робочих програмах дисциплін “Основи теорії надійності та технічної діагностики” і “Проектування систем діагностування”, які читаються для студентів спеціальності 7.0914.01 – “Системи управління і автоматики”.

Особистий внесок здобувача. Основні положення та результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно. Проаналізовано сучасний стан методів діагностування ШГНУ [9], досліджено вплив дефектів ШГНУ на її експлуатаційну надійність [3], створено логічну модель вставного насоса ШГНУ [8] та проведено експлуатаційні дослідження вібростану ШГНУ [2]. В роботах, опублікованих у співавторстві, проаналізовані причини і умови виникнення дефектів ШГНУ [6, 10], виконані математичні перетворення і теоретичні узагальнення отриманих

результатів [4], обгрунтована можливість використання характеристик КП в ШК для оцінки стану ШГНУ [12], запропонована розрахункова схема і ДО для оцінки стану ШГНУ [1,11], визначені умови роботоздатності ДО стану ШГНУ [5]. Прийнята особиста участь в розробці системи контролю вібраційного стану ШГНУ [7].

Апробація результатів досліджень. Основні результати дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на XII, XIII, XIV, XV, XVI, XVII Міжнародних міжвузівських школах семінарах “Методи і засоби технічної діагностики” (м.Івано-Франківськ, 1995, 1997, 1999р.р.), (Йошкар-Ола – 1996, 1998, 2000 р.р.); науково-практичній конференції “Стан проблеми і перспективи розвитку нафтогазового комплексу Західного регіону України” (м.Львів, 1995 рік); науково-технічних конференціях професорсько-викладацького складу Івано-Франківського державного технічного університету нафти і газу (1996, 1997, 1999 р.р.); наукових семінарах кафедри автоматизованого управління (1995 – 2000 р.р.).

Публікації. За результатами досліджень, які викладені в дисертації, опубліковано 13 робіт, з них 4 одноосібних.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, додатків, викладених на 153 сторінках тексту, 45 рисунків, 9 таблиць, списку використаних джерел, який містить 99 найменувань, та 11 додатків на 43 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обгрунтовується актуальність теми дисертації, показано зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, сформульовані мета та задачі досліджень, подані наукова новизна та практичне значення отриманих результатів. Визначений особистий внесок здобувача та приведена інформація про апробацію результатів роботи.

У першому розділі проведений аналіз результатів досліджень стану ШГНУ в процесі експлуатації, в якому основну увагу приділено умовам виникнення і розвитку дефектів, та аналізу відмов, що обумовлюють надійність ШГНУ. Проведена детальна класифікація відмов ШГНУ за характером та їх видами, яка послугувала в подальшому основою для побудови логічної діагностичної моделі ШГНУ.

На прикладі НГВУ “Долинанaftогаз” наведені результати статистичного аналізу відмов основних структурних одиниць (СО) ШГНУ за 1998 рік та нанесених ними матеріальних збитків, що підтверджують актуальність проблеми контролю стану ШГНУ в процесі експлуатації.

Критичний аналіз сучасного стану методів і засобів контролю ШГНУ показав, що основним методом діагностування ШГНУ сьогодні залишається динамометричний, на основі якого розроблені різноманітні алгоритми розрахунку динамограм, та перерахунку їх, при необхідності, в плунжерні з використанням як стаціонарних, так і мобільних систем на базі ЕОМ, недоліком яких є висока вартість, складність в користуванні і обслуговуванні. Динамометричний метод не відображує КП в ШК, що, в першу чергу, визначають відмови СО ШГНУ, тому його основним недоліком є значна похибка при визначенні стану ШГНУ, які працюють в свердловинах

з так званим "динамічним режимом", що характерно для нафтопромислів Прикарпаття, а також вплив дефектів механізмів назмної частини ВК та її незрівноваженості на покази динамографа.

Показано, що найбільш перспективними є методи вібродіагностики, особливість яких полягає у використанні в якості джерела інформації про стан ШГНУ характеристик КП, що супроводжують роботу установки і розповсюджуються по ШК як механічному каналі зв'язку та реєструються на гирлі свердловини. Саму ШГНУ при цьому можна розглядати як складну протяжливу динамічну систему з розподіленими параметрами, елементи якої при взаємодії генерують коливання в широкому діапазоні частотного спектру.

Однак вітчизняними і зарубіжними дослідниками роботи по вивченню проблеми забезпечення надійності ШГНУ на основі використання вібродіагностичних методів не проводились. В зв'язку з чим не вивчена природа виникнення і розповсюдження коливань в ШК, не досліджені їх статистичні характеристики, не виявлені раціональні ДО стану ШГНУ, обумовлені впливом дефектів та ін., що стримує розробку методів і засобів діагностування її стану.

На підставі проведеного аналізу сучасного стану проблеми сформульовано мету і завдання дисертаційної роботи.

У другому розділі розглядаються теоретичні положення методу вібраційного контролю стану ШГНУ. Проаналізовані особливості ШГНУ з точки зору об'єкту вібродіагностики та обґрунтовані вимоги до його опису. Встановлено, що конструктивні особливості установки не відповідають вимогам контролепридатності. Це не дозволяє використати серійні технічні засоби і вимагає розробки індивідуальних засобів діагностування. Складний вплив на характеристики КП, що розповсюджуються по ШК, стану вузлів і елементів ШГНУ та рівня їх надійності, свердловинних факторів і параметрів ШК, виключає можливість отримання універсальних рішень. Останнє вимагає різних підходів до розв'язку задач її діагностування.

Оскільки під описом ШГНУ розуміють створення її діагностичної моделі, в результаті аналізу якої в подальшому вибирають ДО, в розділі розглядається побудова логічної і математичної діагностичних моделей ШГНУ. Логічна модель відображає існуючі зв'язки між прийнятими до розпізнавання станами і ознаками станів та базується на результатах досліджень, проведених в першому розділі. Математична діагностична модель дозволяє дослідити процес зародження і закономірності розповсюдження коливань по ШК, обумовлених деградаційними процесами в вузлах і елементах ШГНУ.

За вихідну інформацію при побудові логічної моделі (рис.1) було взято розроблену функціональну схему вставного насоса. Блоки його логічної моделі позначені символами Q_1, Q_2, \dots, Q_n , де $n=k=19$. В логічну модель входять основні конструктивні недоліки, а також монтажні і експлуатаційні дефекти (Q_1 – втрата герметичності приймальної і нагнітальної частини; Q_2 – абразивний знос клапана; Q_3 – механічний знос клапана; Q_4 – запізнювання посадки кульки на сідло клапана; Q_5 – знос плунжерної пари; Q_6 – збільшення зазору в плунжерній парі; Q_7 – заїдання або прихват плунжера; Q_8 – виривання насоса з замкової пружини; Q_9 – висока посадка плунжера; Q_{10} – удар плунжера при ході вниз; Q_{11} – зміна характеристики видобуваної рідини; Q_{12} –

поломка пір'ів якоря; Q_{13} – зазор між опорним кільцем і конусом; Q_{14} – незаповнення циліндра рідиною; Q_{15} – неякісне виготовлення деталей і недбалість збирання вузлів; Q_{16} – поломки в штангах; Q_{17} – поломка стаканів; Q_{18} – відворот або злом клітки клапана; Q_{19} – відворот плунжера). Позначені зв'язки ($X_{i1} \dots X_{in}$ – зовнішні входи; $Z_{i1} \dots Z_{im}$ – входи блоків; $Y_{j1} \dots Y_{j\ell}$ – виходи блоків) і вплив дефектів на інші елементи СН, тобто представлено весь ланцюг розвитку цих дефектів. Розроблена логічна модель дозволила встановити і класифікувати дефекти та визначити напрямки їх розвитку і взаємозв'язок з іншими елементами СН.

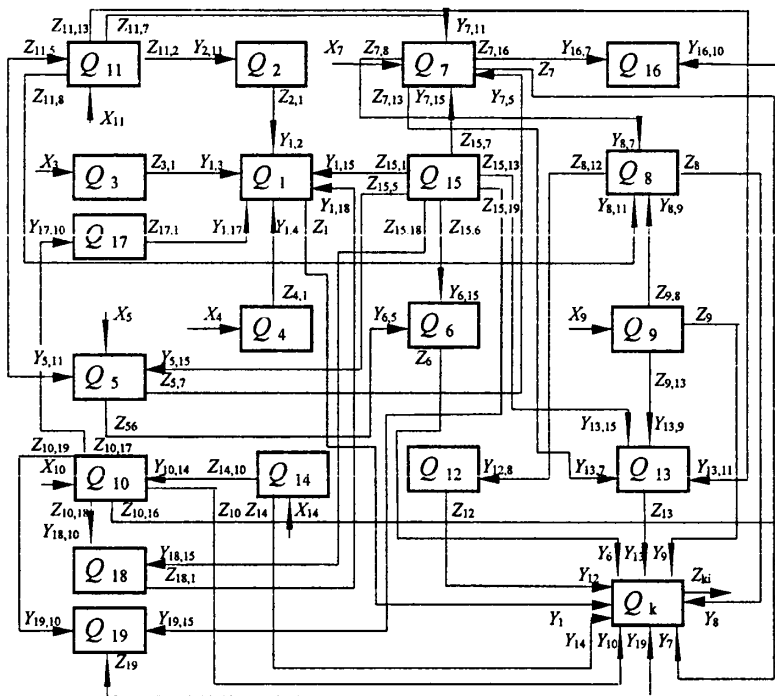


Рис. 1. Логічна модель вставного насоса

Створення математичної діагностичної моделі ШГНУ, яка відноситься до складних коливних систем, пов'язане з значними труднощами. З метою якісної оцінки її вібростану була розроблена детермінована математична модель процесу коливаний ШГНУ з використанням одновимірного рівняння коливаний виду:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = a^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + F(x, t) \quad (1)$$

і граничними умовами, що враховують режим вимушених коливаний верхньої частини ШК, обумовлених рухом балансира, та коливання її нижньої частини, на які впливають такі фактори як тертя, однорідність середовища, конструктивні особливості об'єкта, тощо.

Моделювання КП нижньої частини ШК здійснюється з використанням рівняння коливань для абсолютно твердого тіла:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + \left\{ -A + B \left(\frac{dx}{dt} \right)^2 \right\} \frac{dx}{dt} + kx = 0, \quad (2)$$

де m – маса ШК, k – коефіцієнт жорсткості з'єднання вузлів ШК, x – переміщення колони, A, B – постійні демпфування.

Шляхом заміни координат рівняння (2) зводиться до рівняння Ван-дер-Поля. Це дозволяє одержати якісні характеристики процесу коливань за наявності заводів різного характеру, виділити топологічно різні еталонні класи процесу, що характеризуються наявністю дефектів, зміною геометричних характеристик ШГНУ.

Розглянуто також граничні випадки, які характеризуються значеннями параметра ε :

$$\varepsilon = \frac{A}{\sqrt{km}}.$$

Для випадків $\varepsilon \gg 1$ виділено стаціонарні режими роботи, які описуються кривими виду:

$$\varepsilon \ln y(\tau) - \varepsilon \frac{y^2}{2} = \tau + c,$$

що дозволяє аналітично моделювати характеристики КП. У випадку $\varepsilon \ll 1$ точні розв'язки знаходяться за методом асимптотичних розкладів по малому параметру ε .

Виділено характерні частоти КП, що моделюються. Показано, що розроблена модель дає добре узгодження змодельованих характеристик КП в ШК з характеристиками, одержаними експериментальним шляхом. Проведено дослідження передрезонансних явищ, які обумовлюють можливість аварійних ситуацій з ШГНУ.

Встановлено власні частоти λ_{io} за критерієм:

$$\min |\lambda_{io} - \omega_k|,$$

де ω_k – частоти зовнішнього збурення, допустимі для безпечного функціонування ШГНУ.

Для моделювання процесу коливань реалізовано наступну розрахункову схему:

$$v(x, t) = v_1(x, t) + \omega(x, t),$$

де

$$v_1(x, t) = \frac{L-x}{L} \mu_1(t) + \frac{x}{L} \mu_2(t),$$

$$\omega(x, t) = R(x, t) + Q(x, t),$$

$$R(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \left[C_n \cos a \sqrt{\lambda_n} t + D_n \sin a \sqrt{\lambda_n} t \right] \sin \frac{\pi n x}{L},$$

$$x_n = \frac{\pi^2 n^2}{L^2},$$

$$C_n = \frac{2}{\pi n} ((-1)^n \mu_2(0) - \mu_1(0))$$

$$D_n = \frac{4}{a \pi^2 n^2} ((-1)^n \mu_2'(0) - \mu_1'(0))$$

$$Q(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \psi_n(t) \sin \frac{\pi n}{L} x,$$

$$\psi_n(t) = \frac{1}{\sqrt{\lambda_n}} \int_0^t \sin \sqrt{\lambda_n} (t - \vartheta) f_n(\vartheta) d\vartheta,$$

причому:

$$f_n(\vartheta) = \frac{2}{\pi l} \left[(-1)^n \mu_2^*(\vartheta) - \mu_1^*(\vartheta) \right]$$

де L – довжина ШК, $\mu_1(t)$ – функція, що визначає режим вимушених коливань ШК; $\mu_2(t)$ – функція, що моделює коливання нижньої частини ШК і є розв'язком рівняння Ван-дер-Поля, $V(x, t)$ – переміщення точок ШК вздовж вертикальної осі.

Вказана схема реалізована у вигляді програмного продукту, на основі якого проведено тестові розрахунки по дослідженню реальних ШГНУ з метою визначення ступеня адекватності розроблених моделей реальному стану ШГНУ.

У **третьому розділі** розглядається методичне, технічне і програмне забезпечення експериментальних досліджень вібростану ШГНУ в промислових умовах.

Методика проведення експериментальних досліджень забезпечила вивчення закономірностей розповсюдження коливань по ШК для різних періодів експлуатації ШГНУ і визначення коефіцієнтів її математичної моделі; вивчення впливу вібростану механізмів і вузлів ВК на вібростан ШК; встановлення взаємозв'язку характеристик КП в ШК з станом ШГНУ різних типорозмірів і ін.

Для забезпечення проведення експериментальних досліджень, згідно з поставленими задачами, була розроблена мікропроцесорна інформаційно-вимірювальна система (МІВС-01), яка складається з функціонально завершених блоків – вимірювального ВБ, мультиплексора МтП, АЦП та мікропроцесорного пристрою МП, в якості якого використано ПЕОМ класу АТ386. Враховуючи відсутність сьогодні технічних засобів для вимірювання вібрації об'єктів типу ШГНУ, були розроблені дві оригінальні конструкції ВБ. Перша складається з чутливого елемента у вигляді кільця з чотирма наклеєними тензодавачами типу 2ПКБ-20-200, під'єднаними за мостовою схемою, яке з'єднане з механізмом кріплення до полірованого штока. На останньому закріплені у взаємоперпендикулярних площинах два вібродавача типу АНС-114-03, а також металевий пиленологозахисний корпус, в якому розміщена електронна плата підсилювачів, та роз'єми для під'єднання підсилювачів, вимірювального кабелю та блоку живлення. ВБ дозволяє проводити вимірювання параметрів зусиль в ШК з похибкою 0,8% та віброприскорення з похибкою 10%, що обумовлено технічною характеристикою акселерометра АНС-114-03.

Друга конструкція ВБ з вмонтованою платою вібропідсилювачів забезпечує його кріплення на корпусах механізмів та вузлів ВК за допомогою постійних (ферито-барієвих) магнітів марки М22РА-220-1.

Процес аналого-цифрового перетворення та запису оцифрованих відліків у файл здійснюється під керуванням спеціально розробленої асемблер-програми. При цьому вибірка відліків з каналів вимірювання вібрації здійснюється з частотою 7900 Гц, а з каналу тензосигнала -

з частотою 60,3 Гц. Розроблено також допоміжне програмне забезпечення MIBC-01, що забезпечує оперативний перегляд файлу первинної вибірки з представленням даних у вигляді графіків вібрації та зусилля, а також перетворення файлу первинної вибірки до формату ASCII для подальшої обробки з використанням оболонки MathCad.

У **четвертому розділі** приводиться аналіз експериментальних даних, отриманих за допомогою MIBC, порівняння їх з результатами математичного моделювання ШГНУ та розробка методу вібраційного контролю. При дослідженні статистичних характеристик (закону розподілу, дисперсії Dx та математичного очікування Mx) КП було виявлено (рис.2), що процес відноситься до "періодично-нестационарних" випадкових процесів, оскільки його статистичні характеристики – Mx , Dx змінюються на протязі періоду качань, як і закон розподілу КП. Зокрема, при ході вверх (фаза 3) і вниз (фаза 6) закон розподілу близький до нормального, а у моменти сприйняття і зняття навантаження на ШК Dx КП зростає, а закон розподілу є композицією нормального та арксинусоїдального закону, згідно якого розподілені миттєві значення КП, що можна інтерпретувати як періодичне виникнення та загукання в системі синусоїдальних коливань. Причиною підвищення віброактивності в ці моменти часу можуть бути інерційні навантаження на ШК при різкій зміні напрямку її руху.

Проведений аналіз вібростану механізмів і вузлів ВК: привідного електродвигуна ПД – підшипники; редуктора Р – корпус; кривошипа КР – підшипника цапфи; шатуна Ш – підшипника шатуна; траверси ТР – підшипника хрестовини траверси; балансира Б – підшипника балансира, з метою оцінки впливу їх на вібростан ШК показав наявність між ними взаємозв'язку, що цілком природньо, оскільки всі вузли є частинами механічної системи. Однак розраховані для амплітудних спектрів значення коефіцієнта взаємкореляції, який змінюється в межах $r_{xy}=0,22$ для ПД; $r_{xy}=0,489$ для Р; $r_{xy}=0,518$ для КР; $r_{xy}=0,523$ для Ш; $r_{xy}=0,530$ для Б та $r_{xy}=0,534$ для ТР не дозволяють стверджувати про визначальний вплив жодного з них на вібростан верхньої частини ШК – полірованого штока.

Аналіз спектрів КП для ШГНУ, які мали різний період напруцювання і відповідний стан та експлуатувалися в свердловинах, що відрізняються глибиною спуску СН, характеристиками нафтоносного пласту та режимами експлуатації показав, що із зміною стану (зносом елементів і вузлів СН) загальний рівень КП в середньому зростає на 47,3 – 59,4 %, хоча така тенденція по амплітудним складовим частотного спектру в діапазоні 0-600 Гц не спостерігається. Це не дозволяє виявити конкретні частотні смуги і амплітуди їх спектральних складових (ДО), та загальні закономірності їх зміни, обумовлені зміною стану, що вимагає вирішення задачі вибору інформативних ділянок періоду качань.

З метою перевірки відповідності розробленої математичної моделі експериментальним даним було проведено розрахунки в середовищі MathCad.

При розв'язку крайової задачі (1) початкові умови приймалися нульовими, а крайові умови визначалися виходячи з режиму роботи ШГНУ наступним чином:

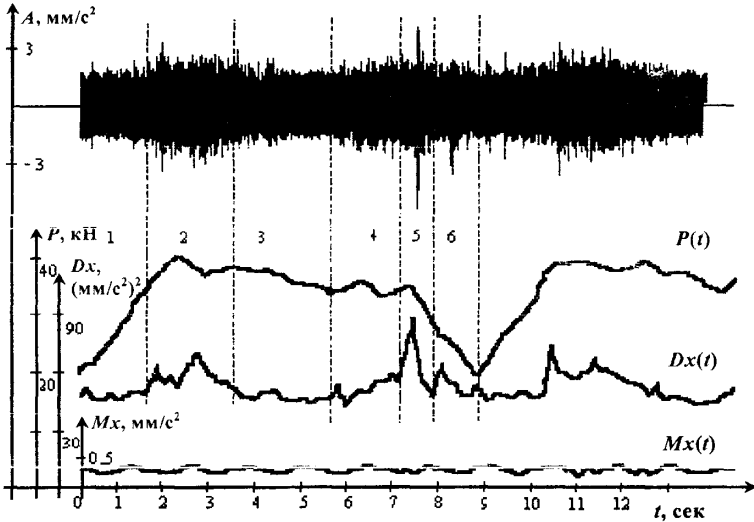


Рис.2. Графіки зміни вібросигналу $A(t)$, зусилля в ШК $P(t)$, математичного очікування $Mx(t)$ і дисперсії $Dx(t)$ коливного процесу в часі (Свердловина №463 – СН-32, число качань $n=6$, довжина ходу $S = 2.5$ м, глибина спуску $L=2046$ м)

1) закон переміщення верхньої точки ШК

$$\mu l(t) = A(\sin(\omega t)),$$

де A - амплітуда качань, що дорівнює половині довжини ходу точки підвісу штанг, ω - циклічна частота качань;

2) закон переміщення нижньої точки ШК

$$\mu 2(t) = \int_0^t x(t) dt,$$

де функція $x(t)$ є розв'язком рівняння Ван-Дер-Поля.

Оскільки експериментальні дані реєструвалися у верхній частині ШК (на відстані близько 2 м від її верхньої точки), то для порівняння цих даних з результатами моделювання визначалася функція

$$u_2(t) = u(x, t)|_{x=2}$$

На рис. 3 приведені спектри КП в ШК для свердловини № 463 (СН-32, число качань $n=6$, довжина ходу $S = 2.5$ м, глибина спуску $L=2046$ м), отримані розрахунковим шляхом та на основі обробки експериментальних даних, з яких видно, що явно виражений розрахунковий максимум КП в смузі частот 0-160 Гц, з певним ступенем точності співпадає з експериментальними. Аналогічні розрахунки були отримані при різних режимах експлуатації ШГНУ.

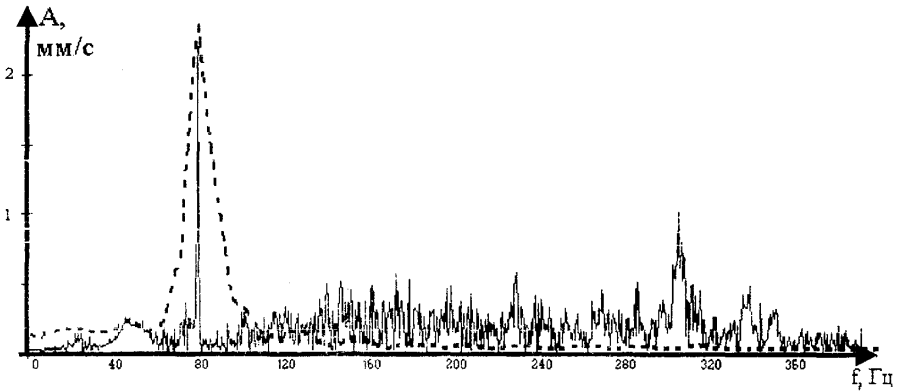


Рис.3. Спектр КП експериментального (—) та змодельованого (---)
(Свердловина №463)

Таким чином, створена математична модель в певній мірі адекватно відображає реальні процеси у ШК. Але порівняння спектрів на рис. 3 говорить про те, що реальні вібраційні процеси є значно складнішими і не можуть бути зведені до суми невеликої кількості гармонічних складових. Як було відзначено, спектр КП має складну структуру, причому вплив стану установки на спектр не можна однозначно оцінити зміною амплітуд дискретних складових на визначених частотах та вибраних ділянках спектру, оскільки наявність дефектів впливає на форму сигналу в цілому, тому інформативними ознаками є не амплітуди основних частот збудження, а ряд параметрів, слабо пов'язаних з енергетичним балансом сигналу.

З метою вибору інформативних ділянок були проаналізовані інтервали, які відповідають окремим фазам періоду качань (рис.2). При аналізі важливе значення має точне визначення моменту часу сприйняття навантаження. Для його визначення було запропоновано використати ВКФ між тензосигналом P , отриманим експериментальним шляхом, та еталонним E , отриманим шляхом перетворення теоретичної паралелограмної динамограми на підставі рівняння руху точки підвісу штанг. Метод ґрунтується на тому, що положенню $Rx_{max}(\tau)$ відповідає зсув τ між двома сигналами, між якими існує лінійна залежність. Метод дозволяє не лише відмовитися від давача переміщень ШК, призначеного для фіксації моментів її ходу вгору і вниз, але і діагностувати дефекти ШГНУ при наявності достатньо великої кількості їх еталонів.

Попередньо проведений аналіз ДО показав, що для даного об'єкту – ШГНУ найбільш доцільним є використання за ДО логарифмічного декременту затухання АКФ, так як при явищах зносу, пов'язаних зі зміною геометрії контактуючих поверхонь, що є причиною найбільш поширених дефектів СН, зростає роль шумової компоненти. Це відображається на вигляді АКФ, зменшуючи відношення сигнал-шум і збільшуючи коефіцієнт затухання. Використання АКФ для формування ДО дозволяє адекватно оцінити стан ШГНУ.

Для обчислення ДО з використанням вищеописаного методу визначення моменту початку сприйняття навантаження була розроблена програма Dia. Вихідними даними для програми є інформація про технічні параметри свердловин, яка зберігається у базі даних та файли даних, що містять оцифровані відліки тензOMETричних та вібраційних сигналів, отримані за допомогою розробленої МІВС.

У зв'язку з нестационарністю КП як значення, так і ступінь інформативності вибраної ДО також змінюються на протязі періоду качання. Тому ЛДЗ обчислювали не для всієї реалізації, а для окремих фаз періоду качань. На рис. 2 виділено інтервали, що відповідають наступним фазам періоду качання: 1 - сприйняття навантаження; 2 - початок ходу вверх; 3 - хід вверх; 4 - зняття навантаження; 5 - початок ходу вниз; 6 - хід вниз.

Проведений аналіз результатів обробки експериментальних даних по 26 свердловинах показав, що у всіх випадках значення ЛДЗ зростає з напрацюванням, причому найбільш вираженою є зміна ЛДЗ на ділянках сприйняття та зняття навантаження. При ході вверх і ході вниз ЛДЗ в окремих випадках також зменшується з напрацюванням, але не більше ніж на 10-12%, що пояснюється незначною залежністю ДО на цих інтервалах від стану ШГНУ, тобто фази 3 і 6 є найменш інформативними з точки зору вибору ДО.

Враховуючи значну нестационарність КП в фазах 2 та 5, найбільш доцільно за ДО вибрати значення ЛДЗ під час сприйняття або зняття навантаження, однак з метою отримання єдиної ДО, яка враховує ці обидва показники, було прийняте відношення:

$$\Theta = \frac{\alpha_{zn}}{\alpha_{спр}}$$

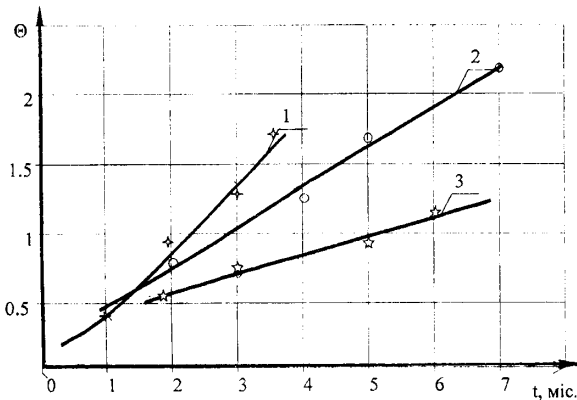


Рис. 4. Графік зміни ДО стану ШГНУ з часом напрацювання
 1 – св.№463 (насос НС-38, L=2046м, S=2м, n=7), знос 58,4%;
 2 – св.№588 (насос НС-32, L=2070м, S=2,5м, n=4), знос 69,8%;
 3 – св.№260 (насос НС-32, L=1884м, S=3м, n=5), знос 34,3 %.

яке було покладено в основу методу вібраційного контролю стану ШГНУ, де α_{zn} - значення ЛДЗ при знятті навантаження, $\alpha_{спр}$ - значення ЛДЗ при сприйнятті навантаження.

Результати оцінки стану ШГНУ з використанням розробленого методу приведені на рис.4, з якого видно, що в усіх випадках спостерігається зростання значення вибраної ДО з часом напрацювання і, відповідно, з величиною

зносу елементів СН. Це свідчить про її адекватне відображення стану ШГНУ.

З метою промислового впровадження розробленого методу визначені умови роботоздатності ШГНУ з використанням вибраної ДО, проведене оцінювання її ступеня роботоздатності з врахуванням похибки вимірювання та розрахована вірогідність контролю стану ШГНУ вказаним методом, що складає $P_{в,к}=0,993$. Це підтверджує економічну доцільність його застосування в нафтовидобувних підприємствах ВАТ “Укрнафта”.

Розроблений метод вібраційного контролю ШГНУ, разом з технічними засобами для його реалізації, прийняті до впровадження в НГВУ “Надвірнянафтогаз”. “Долининафтогаз”. “Бориславнафтогаз” та “Чернігівнафтогаз”.

ОСНОВНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

1. У дисертації наведене теоретичне узагальнення і нове вирішення наукової задачі контролю стану ШГНУ, що базується на дослідженнях характеристик коливних процесів в ШК і вибору на їх основі ефективної ДО, покладеної в основу розробленого вібраційного методу контролю стану ШГНУ, використання якого дозволяє підвищити їх надійність і попередити виникнення аварійних ситуацій.

На підставі узагальнення статистичних даних по аварійності ШГНУ на нафтопромислах Західної України визначені найбільш типові відмови та причини їх виникнення, обумовлені, в основному, так званим "динамічним режимом" свердловин, для яких загальноприйнятій динамометричний метод діагностування стану ШГНУ через значну похибку є непридатним, та обґрунтована необхідність розробки вібраційного методу контролю.

2. На основі аналізу ШГНУ з точки зору об'єкту контролю, встановлено, що вона є неконтролепридатною, складною динамічною протязливою системою з розподіленими параметрами і запропоновано при її дослідженні використовувати основні положення віброакустичної діагностики.

3. Вперше розроблено логічну і математичну діагностичні моделі ШГНУ, які дозволяють:

- встановити і класифікувати дефекти та визначити напрямок їх розвитку і взаємозв'язок з іншими елементами насосної установки;
- описати формування та розвиток коливних процесів в ШК при різних типах тертя, що супроводжує роботу ШГНУ;
- провести дослідження передрезонансних явищ, що обумовлюють можливість виникнення аварійних ситуацій ШГНУ.

4. З урахуванням особливостей ШГНУ розроблено:

- методичне забезпечення, яке дозволяє здійснити весь комплекс експериментальних досліджень вібростану ШГНУ;

- технічне забезпечення – мікропроцесорну інформаційно-вимірювальну систему, яка дозволяє проводити збір і обробку результатів експериментів в реальному масштабі часу і забезпечує їх вірогідність, та вимірювальні блоки, конструкція одного з них дозволяє оперативно встановлювати його на полірованому штоці, а оригінальна конструкція другого з магнітною

системою – в будь-якому місці на корпусах механізмів та вузлів ВК і проводити вимірювання параметрів вібрацій з заданою похибкою 10% та пружних деформацій – 0,8%;

– програмне забезпечення – з використанням пакетів прикладних програм, які забезпечують роботу системи, оперативну обробку, перегляд і представлення даних експериментів у вигляді графіків.

5. За результатами експериментальних досліджень вперше встановлено:

– коливний процес в ШК відноситься до “періодично-нестационарних” випадкових процесів (математичне очікування і дисперсія змінюються на протязі періоду качання);

– спектр віброшвидкості поздовжніх коливань ШК за період качання хоча в загальному і відображає зміну стану, однак не дозволяє виявити конкретні частотні смуги і амплітуди їх спектральних складових (ДО), за допомогою яких можна контролювати стан ШГНУ;

– вібраційний стан механізмів та вузлів ВК не впливає на загальний вібростан ШК, що дозволяє не враховувати його при визначенні ДО.

6. За результатами моделювання КП в ШК встановлені основні закономірності їх зміни, обумовлені параметрами і режимом роботи ШГНУ, а проведене порівняння спектрограм КП, отриманих експериментальним шляхом, з розрахунковими, показало адекватність створеної математичної моделі ШГНУ.

7. Розроблена методика визначення моменту часу сприйняття навантаження за максимальним значенням взаємкореляційної функції між реальним і еталонними тензосигналами, яка дозволяє відмовитися від додаткового давача переміщень ШК.

8. Експериментально обґрунтовано вибір ДО – відношення логарифмічного декременту затухання АКФ на інтервалах зняття і сприйняття навантаження ШК, на основі якої запропоновано метод вібраційного контролю стану ШГНУ, визначені умови її роботоздатності та проведено оцінювання степені роботоздатності з врахуванням похибки вимірювання ДО.

9. Проведена промислова апробація розробленого методу вібраційного контролю стану ШГНУ на нафтопромислах НГВУ "Надвірнанафтогаз", який підтвердив свою ефективність.

ПУБЛІКАЦІ ПО ТЕМІ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

1. Бандура В.В., Євчук О.В., Заміховський Л.М., Шумада В.М. Використання математичного апарату кореляційних функцій для оцінки технічного стану ГНШУ // Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. Серія: Технічна кібернетика та електриф. паливно-енерг. компл.- Івано-Франк., 1999. - вип.36 (т.6). - С.184-194.

2. Бандура В.В. Дослідження вібростану глибинно-насосних штангових установок // Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. Серія: Методи і засоби технічної діагностики. - Івано-Франківськ, 1999. - Вип.36 (т8).- С.301-310.

3. Бандура В.В. Дослідження впливу дефектів ШГНУ на її експлуатаційну надійність // Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. Серія: Нафтове обладнання - м.Івано-Франк., 1999. - Вип.36 (т.4).- С.198-209.

4. Бандура В.В., Замиховский Л.М., Олейник А.П. Математическое моделирование процесса колебаний ШГНУ // Методы и средства технической диагностики. – Йошкар-Ола: Мар.гос.ун-т. - 2000. - Вып.ХVII. - С.62-65.

5. Бандура В.В., Замиховський Л.М., Шумада В.М. Підвищення ефективності експлуатації ШГНУ для видобутку нафти шляхом їх діагностування // Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. Серія: Розробка та експлуатація нафтових і газових родовищ - Івано-Франківськ, 1999. - Вип.36 (т3) - С.241-244.

6. Бандура В.В., Замиховський Л.М. Аналіз причин, що обумовлюють надійність глибинно-насосної штангової установки // Методи і засоби технічної діагностики. – Івано-Франківськ: ІФДТУНГ. - 1995.- С.204-209.

* 7. Бандура В.В., Замиховський Л.М. Система контролю технічного стану глибинно-насосних штангових установок // Методи і засоби технічної діагностики.– Івано-Франківськ. - Вип.ІV: "Прут-Прінт". - 1999.-С.115-119.

8. Бандура В.В. Логическая модель вставного насоса ГНШУ // Методы и средства технической диагностики. – Йошкар-Ола: МарГУ. - 1998.-С.127-131.

† 9. Бандура В.В. Сучасний стан методів діагностування ГНШУ/ ІФДТУНГ. - Івано-Франківськ, 1997. - 18с. - Укр. - Деп. в УкрІНТЕІ 06.05.97, №358- Ук 97.

* 10. Бандура В.В., Замиховський Л.М. Умови виникнення і розвитку дефектів глибинно-насосної штангової установки (ГНШУ) / ІФДТУНГ - Івано-Франківськ, 1996. - 14с. - Укр. - Деп в УкрІНТЕІ 04.10.96 р. №10 Ук96.

11. Бандура В.В., Замиховський Л.М. Діагностична модель штангової установки // Тез.Наук. техн. конф.проф.- викл. складу ун-ту.– Івано-Франківськ. - 1996 р.- С.109.

12. Бандура В.В., Замиховський Л.М. До питання про вібродіагностування глибинно-насосної штангової установки // Тез.наук.-техн. конф.проф. викл.складу ун-ту – Івано-Франківськ. - 1997.- С.139.

13. Бандура В.В., Гірняк О.Р., Васьків О.В., Шумада В.М., Використання даних безперервної динамометрії ГШУ для свердловин з періодичним режимом роботи // Тез.наук.-практ.конф."Стан проблеми і перспективи розвитку нафто-газового комплексу Західного регіону України".- Львів: УНГА.-1995.-с.164-165.

АНОТАЦІЯ

Бандура В.В. Розробка методу вібраційного контролю технічного стану штангових глибинно-насосних установок для видобутку нафти. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.13 – прилади і методи контролю та визначення складу речовин. – Івано-Франківський державний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ, 2000.

Дисертація присвячена питанню контролю стану ШГНУ. В дисертації розвинуто новий напрям – методи вібраційного контролю стану ШГНУ. Створена логічна і математична

діагностичні моделі ШГНУ; розроблено метод вібраційного контролю стану ШГНУ, технічні засоби та програмне забезпечення для його реалізації; методика визначення моменту часу сприйняття навантаження; визначена і досліджена діагностична ознака стану ШГНУ; визначені умови і проведена оцінка степені її роботоздатності.

Розроблений метод і технічні засоби пройшли промислово апробацію в НГВУ “Надвірнанафтогаз” і прийняті до впровадження.

Ключові слова. вібрація, дефекти, технічна діагностика, діагностична ознака, ШГНУ, метод, штангова колона.

АННОТАЦИЯ

Бандура В.В. Разработка метода вибрационного контроля технического состояния штанговых глубинно-насосных установок для добычи нефти. - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.13 - приборы и методы контроля и определения состава веществ. - Ивано-Франковский государственный технический университет нефти и газа, г.Ивано-Франковск, 2000.

Диссертация посвящена вопросу контроля состояния ШГНУ. В диссертации развито новое направление - методы вибрационного контроля состояния ШГНУ. Создана логическая и математическая диагностические модели ШГНУ, которые позволяют проследить направления развития дефектов скважинного насоса и описать колебания ШГНУ с учетом реальных условий эксплуатации; разработан метод вибрационного контроля состояния ШГНУ, технические средства и программное обеспечение для его реализации; методика определения момента времени восприятия нагрузки; определен и исследован диагностический признак состояния ШГНУ; определены условия и проведена оценка степени его работоспособности.

Разработанный метод и технические средства прошли промышленную апробацию в НГДУ “Надворнанафтогаз” и приняты к внедрению рядом нефтедобывающих предприятий ОАО “Укрнефть”.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели, задачи исследований, научная новизна и практическая ценность работы; представлены сведения об апробации, публикациях и реализации работы.

В первом разделе на основе проведенного анализа результатов исследований состояний ШГНУ в процессе эксплуатации определены условия возникновения и развития дефектов, дан анализ отказов, которые обуславливают надежность ШГНУ, и их классификация за характером и видами отказов.

Проведен критический анализ современного состояния методов и средств диагностирования состояния ШГНУ в процессе эксплуатации. Показано, что наиболее перспективными являются методы вибродиагностики, которые до настоящего времени не использовались при диагностировании ШГНУ, в связи с чем отсутствуют исследования природы возникновения и распространения колебательного процесса КП в штанговой колонне ШК,

исследования их статистических характеристик и диагностических признаков ДП – характеристик КП, изменение которых характеризует изменение состояния ШГНУ.

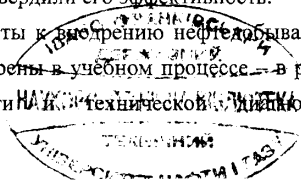
Во втором разделе рассматриваются теоретические положения метода вибрационного контроля состояния ШГНУ. Проанализированы особенности ШГНУ с точки зрения объекта диагностирования. Построены диагностические модели ШГНУ – логическая, которая позволила установить и классифицировать дефекты и обозначить направления их развития и взаимосвязь с другими элементами, а также математическая модель, позволяющая получить качественные характеристики КП при наличии разного рода помех, выделить топологически разные эталонные классы состояния ШГНУ. Проведено исследование предрезонансных явлений, обуславливающих возможность возникновения аварийных ситуаций.

В третьем разделе рассматривается методическое, техническое и программное обеспечение экспериментальных исследований вибросостояния ШГНУ в промышленных условиях.

Разработана информационно-измерительная система МИИС-01, состоящая из измерительных блоков ИБ, мультиплексора МтП, АЦП и микропроцессорного устройства, в качестве которого использовалась ПЭВМ класса АТ-386. Разработаны оригинальные конструкции ИБ, позволяющие проводить измерение нагрузки на полированный шток и параметров вибрации ШК, а также параметров вибрации механизмов и узлов станка-качалки СК. Разработано программное обеспечение МИИС.

В четвертом разделе проводится анализ экспериментальных данных, полученных с использованием МИИС-01, сравнение их с результатами математического моделирования ШГНУ и разработка метода ее вибрационного контроля. Установлено, что КП в ШК относится к «периодически-нестационарным», случайным и выбраны методы его обработки. Исследование доказало, что вибросостояние механизмов и узлов СК не влияет на характеристики КП в ШК, а в спектре КП невозможно выделить частотные диапазоны и их спектральные составляющие, т.е. ДП, изменение которых характеризует изменение состояния ШГНУ. Последнее вызывает необходимость выбора информативных участков периода качаний. Апробация разработанной математической модели с использованием оболочки MathCad подтвердила адекватность полученных результатов реальным КП в ШК. Разработана методика определения момента восприятия нагрузки на ШК по максимальному значению взаимокорреляционной функции между реальным и эталонным тензосигналами, которая позволяет отказаться от дополнительного датчика перемещений ШК. Проведено экспериментальное обоснование выбора ДП – отношения логарифмического декремента затухания автокорреляционной функции на интервалах снятия и восприятия нагрузки ШК, на основании которого предложен метод вибрационного контроля состояния ШГНУ, определены условия его работоспособности и проведено оценивание степени работоспособности с учетом погрешности измерения ДП. Результаты промышленной апробации метода на нефтепромыслах НГДУ «Надворнанефтегаз» подтвердили его эффективность.

Разработанные метод и технические средства приняты к внедрению нефтедобывающими предприятиями ОАО «Укрнефть». Результаты работы внедрены в учебном процессе в рабочих программах дисциплин «Основы теории надежности НАИ» и «Технической диагностики»,



“Проектирование систем диагностирования” для специальности «Системы управления и автоматика».

Ключевые слова: вибрация, дефекты, техническая диагностика, диагностический признак, ШГНУ, метод, штанговая колонна.

ANNOTATION

Bandura V.V. “Working out of the methods of vibration control of technical state of depth-pump bar plant”. - Manuscript.

Thesis submitted for obtaining of the scientific degree of Candidate of Technical Sciences by specialty 03.11.15 – “Methods and Devices of Control and Definition of Contents of Matter”. – Ivano-Frankivsk State Technical University of Oil And Gas; Ivano-Frankivsk; 2000.

Dissertation is devoted to questions of control of technical state of depth-pump bar plant. The new methods of vibration control of technical state of depth-pump bar plant were developed in the dissertation. The logical and mathematical diagnostics models of depth-pump bar plant were created. The methods of vibration control of technical state of depth-pump bar plant, the technical means and software of their realization, the methodology of time point definition of load receiving were worked out. The diagnostics index of technical state of depth-pump bar plant was defined.

The created methods and technical means were tested and implemented in industry "Nadvirnaftogas".

Key-words: vibration, technical diagnostics, defects, diagnostics index, depth-pump bar plant, method, bar column.