

022.291.24  
С 13

Івано-Франківський національний технічний  
університет нафти і газу

**Савула Степан Федорович**



УДК 622.691.2:622.279.5

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ  
ЛІФТОВИХ КОЛОН СВЕРДЛОВИН  
ПІДЗЕМНИХ СХОВИЩ ГАЗУ**

05.15.13 – нафтогазопроводи, бази та сховища

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

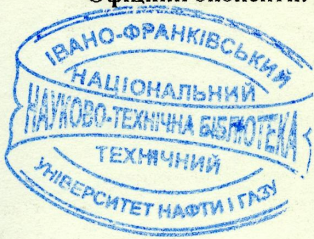
Івано-Франківськ – 2007

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Національному університеті “Львівська політехніка” Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор  
**Харченко Євген Валентинович,**  
Національний університет “Львівська політехніка”  
Міністерства освіти і науки України, м. Львів,  
завідувач кафедри “Опір матеріалів”.

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Тимків Дмитро Федорович,**  
Івано-Франківський національний технічний  
університет нафти і газу  
Міністерства освіти і науки України, м. Івано-Франківськ,  
завідувач кафедри “Інформатика”;



кандидат технічних наук  
**Говдяк Роман Михайлович,**  
Відкрите акціонерне товариство  
“Український інститут по проектуванню об’єктів газової  
промисловості” (Укргазпроект), м. Київ,  
голова правління.

**Провідна установа:** Відкрите акціонерне товариство “Інжинірингово-виробниче підприємство “Всеукраїнський науковий і проєктний інститут транспорту газу” (ВНІПТ

Захист в спеціалізованій технічній Франківськ

на засіданні національному айна, Івано-

З дисертації Франківськ 76019, Укр

отеці Івано- за адресою:

Автореферат

Вчений спеціалізований кандидат

нута О. В.

**ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ**

**Актуальність теми.** Для забезпечення ефективної роботи газотранспортної системи України необхідним є надійне функціонування усіх її складових, зокрема, магістральних газопроводів, підземних сховищ газу, газорозподільних станцій. Надійність обладнання свердловин підземних сховищ газу має особливе значення, оскільки ремонтно-профілактичні роботи, пов'язані з відмовами цього обладнання, потребують великих матеріальних затрат. У деяких випадках вихід з ладу обладнання свердловин може призводити до аварій з важкими наслідками.

Технологічні процеси нагнітання газу в підземне сховище та процеси відбору газу супроводжуються інтенсивними вібраціями ліфтових колон (колон насосно-компресорних труб). Збурення динамічних явищ виникає внаслідок дії на нижню частину колони струменів газу, який перебуває у турбулентному русі. Це нерідко призводить до самовільного відгвинчування нижніх насосно-компресорних труб, внаслідок чого погіршується захист обсадної колони від абразивного зношування, порушується режим роботи свердловини. Відгвинчені труби внаслідок падіння на дно свердловини виходять з ладу.

Надійна робота свердловин підземних сховищ газу є можливою лише за умови забезпечення працездатності ліфтових колон. Розв'язання цього важливого завдання потребує зниження рівнів вібрацій насосно-компресорних труб із застосуванням засобів віброізоляції та обґрунтованого добору моментів згинчування з'єднань на основі докладного аналізу напружено-деформівного стану труб і з'єднувальних муфт.

Отже, підвищення ефективності експлуатації ліфтових колон свердловин підземних сховищ газу становить важливу науково-практичну проблему. Теоретичні й експериментальні дослідження, направлені на розв'язання цієї проблеми, є актуальними і перспективними.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційні дослідження виконували в рамках програми "Нафта і газ України до 2010 року", регіональної програми "Визначення залишкового ресурсу конструкцій, споруд і машин тривалої експлуатації та розробка заходів щодо підвищення терміну їх безаварійної роботи" на 2001–2005 р.р. та Державної науково-технічної програми "Ресурс", затвердженої постановою Кабінету міністрів України від 8 жовтня 2004 р., № 1331.

**Мета і задачі дослідження.** У дисертаційній роботі ставиться за мету підвищення ефективності експлуатації ліфтових колон свердловин підземних сховищ газу за рахунок запобігання розгвинчуванню колон шляхом зниження амплітуд їхніх коливань і раціонального добору моментів згинчування.

Для досягнення сформульованої мети були поставлені і розв'язані такі основні завдання:

– побудувати математичні моделі і дослідити вільні та вимушені поздовжні, крутильні і поперечні коливання ліфтової колони і, на основі аналізу власних частот і форм, а також амплітуд вимушених коливань, обґрунтувати раціональні значення коефіцієнта жорсткості віброізолятора;

*МБА*

- розробити математичну модель і алгоритм розрахунку поперечно-крутильних коливань ліфтової колони з урахуванням її динамічної взаємодії зі стінкою свердловини і оцінити вплив віброізолятора на розподіл крутних моментів по довжині колони;

- розробити математичні моделі і алгоритми розрахунку напружень і деформацій елементів з'єднань ліфтової колони і, на основі аналізу напружено-деформівного стану основного матеріалу з'єднаних труб і муфти, визначити допустимий момент згинчування;

- опрацювати методику і провести експериментальні дослідження вібрацій ліфтових колон діючих свердловин підземного сховища газу під час відбору газу та під час його нагнітання та порівняти одержані результати з результатами математичного моделювання динамічних процесів;

- розробити технічні рішення і рекомендації, спрямовані на запобігання розгвинчуванню ліфтових колон під час експлуатації підземних сховищ газу; опрацювати методику розрахунку на міцність і жорсткість пружних елементів віброізоляторів та обґрунтувати метод діагностики щільності муфтових з'єднань.

*Об'єкт дослідження* – ліфтові колони свердловин підземних сховищ газу.

*Предмет дослідження* – коливання ліфтових колон та напружено-деформівний стан елементів муфтових з'єднань під час експлуатації свердловин підземних сховищ газу.

**Методи дослідження.** Дослідження динаміки ліфтової колони ґрунтуються на застосуванні методів теорії коливань механічних систем з розподіленими параметрами, зокрема, матричного методу початкових параметрів та методу скінчених елементів. Дослідження напружено-деформівного стану деталей муфтових з'єднань проводилися із застосуванням теорії товстостінних оболонок та варіаційно-аналітичного методу побудови рівнянь деформацій неоднорідної механічної системи. Експериментальні дослідження вібрацій ліфтових колон проводилися із застосуванням модернізованих сейсмодавачів, сучасних комп'ютерних засобів віброметрії та числових методів обробки результатів вимірювань.

**Наукова новизна одержаних результатів:**

- удосконалена методологія дослідження вільних і вимушених позовжніх, крутильних і поперечних коливань опущеної у свердловину колони труб за рахунок застосування матричного методу початкових параметрів, що сприяє спрощенню і систематизації розрахунку і дає можливість урахувати континуально-дискретну структуру колони, зокрема, її пружне опирання на довільне число опор, та обґрунтовувати раціональні коефіцієнти жорсткості віброізоляторів;

- вперше побудована скінченно-елементна математична модель поперечно-крутильних коливань ліфтової колони у вертикальній свердловині з урахуванням викривлення осі свердловини і динамічної взаємодії насосно-компресорних труб з трубами обсадної колони та проведена оцінка впливу параметрів віброізолятора на характер розподілу крутних моментів у ліфтовій колоні по довжині;

- розвинута теорія розрахунку муфтових різьбових з'єднань колони труб на основі побудови математичних моделей напружено-деформівного стану елементів

з'єднань із застосуванням теорії товстостінних оболонок і гіпотези про еквівалентну заміну витків різі пружними прошарками типу основи Вінклера, що дає можливість обґрунтувати допустимі моменти згинчування з'єднань;

– отримані уточнені розв'язки задач аналізу напружено-деформівного стану муфт і з'єднаних труб ліфтової колони як товстостінних оболонкових деталей з урахуванням зміни їх товщини в осьовому напрямі та одночасної дії крутних і розпірних навантажень.

#### **Практичне значення одержаних результатів:**

– на основі запропонованих математичних моделей розроблені алгоритми і програми комп'ютерного розрахунку вільних і вимушених коливань ліфтових колон підземних сховищ газу, що дає можливість обґрунтувати значення коефіцієнтів жорсткості віброізоляторів;

– на основі побудованих математичних моделей напружено-деформівного стану елементів муфтових з'єднань розроблені алгоритми і комп'ютерні програми розрахунку напружень і деформацій труб і з'єднувальних муфт, які дають можливість проводити оцінку міцності цих деталей і обґрунтувати допустимі моменти згинчування;

– розроблені і захищені деклараційними патентами на винаходи технічні рішення віброізолятора і спеціального муфтового з'єднання ліфтової колони, спрямовані на запобігання розгвинчуванню колон під час експлуатації свердловин підземних сховищ газу. Запропоновані технічні рішення впроваджені у промисловість на свердловинах Богородчанського підземного сховища газу УМГ “Прикарпаттрансгаз” (очікуваний економічний ефект від впровадження становить 385,326 тис. грн.).

#### **Особистий внесок здобувача:**

– розроблено методику оцінки дебіту свердловини з урахуванням глибини спуску ліфтової колони та досліджено вплив розташування нижнього кінця колони на дебіт свердловини [1]. Запропоновано методику визначення об'ємів нагнітання або відбору газу в процесі експлуатації багатопластового підземного сховища, обладнаного спільним пунктом обліку газу [7];

– розроблено математичні моделі і алгоритми розрахунку поздовжних, крутильних і поперечних коливань ліфтової колони і визначено її власні частоти, власні форми та амплітуди вимушених гармонічних коливань [8, 11];

– побудовано скінченно-елементну математичну модель і алгоритм розрахунку поперечно-крутильних коливань ліфтової колони з урахуванням викривлення осі свердловини і взаємодії насосно-компресорних і обсадних труб [4, 13, 14];

– запропоновано математичні моделі і алгоритми розрахунків та проведені дослідження напружено-деформівного стану елементів муфтових з'єднань ліфтових колон з урахуванням дії крутних і розпірних навантажень [3, 5];

– розроблено методику проведення експериментальних досліджень вібрацій ліфтової колони в реальних умовах експлуатації свердловини підземного сховища газу та проаналізовано результати реєстрації віброприскорень колони [6];

– запропоновано конструктивну схему віброізолятора ліфтової колони [9] і розроблено методику розрахунку його аркових пружних елементів на міцність та на жорсткість [2];

– запропоновано конструктивну схему стопорного пристрою з'єднання насосно-компресорних труб [10], та обгрунтовано метод діагностики щільності муфтових різьбових з'єднань труб ліфтової колони [12].

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати дисертації доповідались і обговорювались на: II-му Науково-практичному семінарі “Energia w pause i technice” (Białystok-Suwałki, 2003 р.); XIV-ій Міжнародній діловій зустрічі «Діагностика-2004» (Єгипет, 2004 р.); Міжнародній науково-практичній конференції “40 років підземному зберіганню газу в Україні” (Яремче, 2004); VII-му Міжнародному симпозиумі українських інженерів-механіків у Львові (Львів, 2005 р.); 6-ій Міжнародній конференції “Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій” (Ужгород, 2005 р.); 4-ій Науково-технічній конференції і виставці “Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю та технічної діагностики промислового обладнання” (Івано-Франківськ, 2005 р.); Міжнародній науково-практичній конференції “Вібрації в техніці і технологіях” (Полтава, 2005 р.); 7-ій Міжнародній науково-практичній конференції “Вібрації в техніці і технологіях” (Львів, 2006 р.); XVII-ій Міжнародній науково-технічній і освітньо-навчальній конференції “Nowe Metody i Technologie w Geologii Naftowej, Wiertnictwie, Geoinżynierii, Inżynierii Złożowej i Gazownictwie” (Kraków, 2006).

У повному обсязі результати досліджень доповідалися на розширеному засіданні кафедри опору матеріалів Національного університету “Львівська політехніка” та на розширеному науковому семінарі факультету нафтогазопроводів Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу.

**Публікації.** За темою дисертації опубліковано 14 наукових праць, з них 6 – у фахових наукових виданнях; одержано 2 деклараційні патенти на винаходи.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертація складається із вступу, п'яти розділів, підсумкових висновків, списку використаних джерел, який налічує 184 найменування, і 2 додатків. Основний зміст роботи викладений на 195 сторінках і містить 90 рисунків та 20 таблиць.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

У вступі обгрунтовується актуальність теми дисертації, формулюються мета та задачі дослідження, подається загальна характеристика роботи.

У першому розділі проаналізовано причини виходу з ладу ліфтових колон свердловин підземних сховищ газу, розглянуто методи динамічного розрахунку колон труб та результати досліджень у галузі міцності і забезпечення працездатності різьбових з'єднань.

Дослідженням, динаміки, міцності і витривалості колон бурильних і насосно-компресорних труб присвячені роботи вчених М. М. Александрова, П. В. Баліцького, В. І. Векерика, В. І. Віноградова, В. М. Івасіва, С. Г. Калініна, О. М. Карпаша, З. Г. Керімова, Є. І. Крижанівського, В. М. Мойшишина, С. А. Раджабова, Г. М. Улітіна, Є. В. Харченка, Ф. Л. Шевченка, Г. Вісселя, І. Гормлі та ін.

Значний внесок у розробку теоретичних та експериментальних методів досліджень роботи різьбових з'єднань, зокрема, з'єднань обсадних, бурильних і

насосно-компресорних труб зробили В. Я. Анилович, І. А. Біргер, Ю. В. Дубленич, Г. Б. Іосилевич, Г. Н. Кашкарян, Б. В. Копей, І. В. Кудрявцев, Т. В. Кутепова, М. В. Лисканич, Д. Ю. Мочернюк, Г. М. Саркісов, А. К. Сароян, А. І. Якушев, А. Ямомота та інші вчені.

Підвищеною ефективності роботи систем транспортування і зберігання нафти і газу присвячені праці А. Б. Айбіндера, А. З. Александрова, Б. С. Білобрана, В. Я. Грудзя, І. І. Капцова, М. П. Ковалка, Й. В. Перуна, М. Д. Середюк, Д. Ф. Тимківа, А. М. Федутенка, Л. С. Шлапака та ін.

Однак, питання динаміки, міцності і ефективності експлуатації ліфтових колон підземних сховищ газу залишилися маловивченими, що й обумовило вибір теми дисертації, мету і задачі досліджень, а також структуру даної роботи.

Другий розділ присвячений дослідженню вільних і вимушених поздовжніх, крутильних і поперечних коливань ліфтової колони. Колона розглядається як заземлений на верхньому кінці прямий стержень кусково-сталого поперечного перерізу (рис. 1). Її ділянки мають довжини  $l_1, l_2, \dots, l_n$ , на межах ділянок встановлені муфти масами  $m_1, m_2, \dots, m_n$  і моментами інерції відносно поздовжньої осі  $J_1, J_2, \dots, J_n$ . Шляхом введення пружних опор жорсткостями  $c_1, c_2, \dots, c_n$  враховуємо пружне опирання колони об стінку свердловини. Для описання руху використовуємо координати  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , початки яких розташовані у верхніх крайніх перерізах відповідних ділянок. Поздовжні, кутові і поперечні переміщення поперечних перерізів позначаємо як  $u_i, \gamma_i, w_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) відповідно.

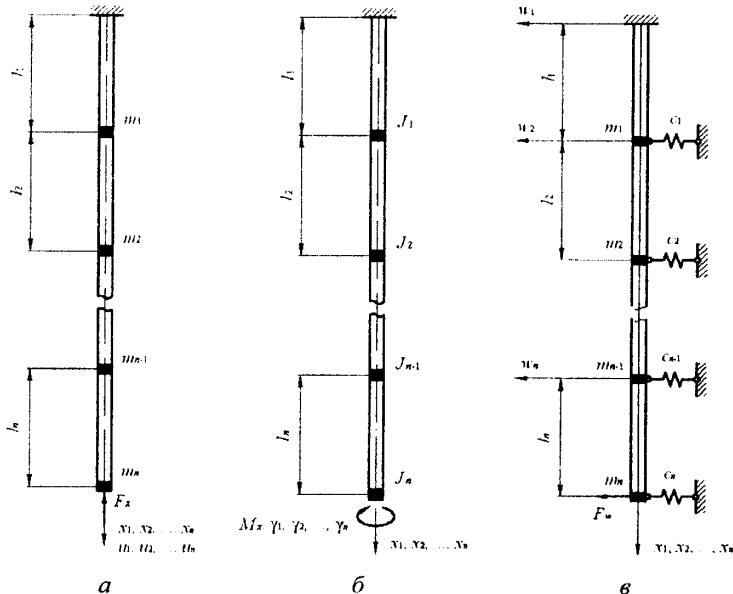


Рис. 1. Розрахункові схеми для дослідження вільних і вимушених поздовжніх (а), крутильних (б) і поперечних (в) коливань ліфтової колони

У випадку вільних коливань навантаження на систему відсутні; вимушені коливання досліджуємо з урахуванням дії на нижній кінець колони динамічного навантаження, вертикальна, обертальна і горизонтальна складові якого становлять  $F_x, M_x, F_w$ .

Розрахунок вільних і гармонічних вимушених коливань колони виконуємо на основі алгоритмів, розроблених із застосуванням матричного методу початкових параметрів. Це дає можливість спростити і систематизувати обчислювальні процеси з урахуванням довільного числа ділянок складеного стержня.

Досліджені частотні спектри вільних коливань та проаналізована небезпека виникнення резонансних явищ у механічній системі. На основі аналізу власних форм і амплітудно-частотних характеристик вимушених коливань (рис. 2) обгрунтована доцільність встановлення віброізолятора на нижньому кінці ліфтової колони та визначені раціональні значення його коефіцієнта жорсткості.

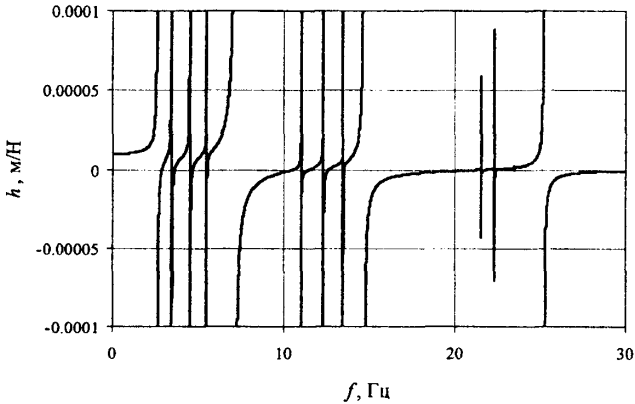


Рис. 2. Залежність коефіцієнта динамічної податливості нижнього кінця колони, опертого на опору жорсткістю  $1 \cdot 10^5$  Н/м, у поперечному напрямі від частоти коливань

Для визначення крутних моментів, що виникають у ліфтовій колоні під час експлуатації, проведені дослідження її вимушених коливань з урахуванням динамічної взаємодії насосно-компресорних труб з трубами обсадної колони, вісь якої має відхилення від прямолінійності. Математичну модель коливальних явищ будуємо на основі застосування методу скінченних елементів. Колону насосно-компресорних труб розглядаємо як стержень, що має в недеформівному стані прямолінійну вісь, а в робочому стані – вісь, викривлену у просторі у зв'язку з криволінійністю осі свердловини (рис 3). Елементарні ділянки ліфтової колони під дією внутрішніх сил можуть вільно переміщуватися у поперечних напрямках лише на величину зазору між насосно-компресорними і обсадними трубами (рис. 4).

Для побудови скінченно-елементної моделі ліфтової колони розбиваємо її на  $n$  ділянок, розподілені параметри імітуємо дискретними пружно-інерційними характеристиками.



Диференціальні рівняння поперечно-крутильних коливань ліфтової колони одержані у вигляді

$$\begin{aligned} \frac{dY}{dt} &= V; & \frac{dV}{dt} &= M^{-1} \left[ (C_{\varphi} D_{\varphi}^{-1} D_y - C_y) \left( Y + \frac{V_0}{E} V \right) - R_y + P_y \right]; \\ \frac{dZ}{dt} &= W; & \frac{dW}{dt} &= M^{-1} \left[ (C_{\psi} D_{\psi}^{-1} D_z - C_z) \left( Z + \frac{V_0}{E} W \right) - R_z + P_z \right]; \\ \frac{d\Gamma}{dt} &= \Omega; & \frac{d\Omega}{dt} &= J^{-1} (-C_y \Gamma - N_y \Omega - R_y + M_y), \end{aligned} \quad (1)$$

де  $Y, V, Z, W$  – матриці-колонки невідомих перемішень і швидкостей руху вузлів в напрямках осей  $y$  та  $z$  відповідно;  $\Gamma$  і  $\Omega$  – матриці колонки кутових перемішень і кутових швидкостей вузлів;  $M, J$  – діагональні матриці мас і моментів інерції вузлів;  $C_y, C_{\varphi}, D_y, D_{\varphi}, C_z, C_{\psi}, D_z, D_{\psi}$  – квадратні матриці коефіцієнтів жорсткості;  $v_0$  – модуль дисипації згідно з гіпотезою Фойгта;  $R_y, P_y, R_z, P_z$  – матриці-колонки проєкцій реакцій стінки свердловини на осі  $y, z$  і проєкцій навантажень.

Шляхом числового інтегрування системи диференціальних рівнянь (1) досліджено характер розподілу максимальних крутних моментів по довжині ліфтової колони в процесі її просторових вібрацій, а також вплив віброізолятора на розподіл крутних моментів.

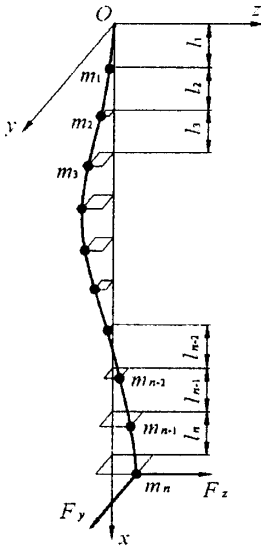


Рис. 3. Дискретна модель ліфтової колони

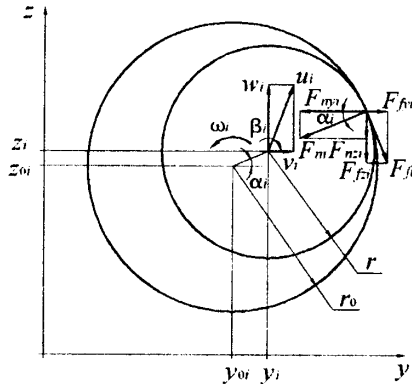


Рис. 4. Швидкості руху поперечного перерізу ліфтової колони і сили її взаємодії з обсадною колоною

У третьому розділі розробляються математичні моделі і алгоритми розрахунку напружень і деформацій елементів з'єднань ліфтової колони на основі застосування уточненої теорії оболонок і гіпотези про еквівалентну заміну витків різі пружними прошарками типу основи Вінклера. Рівняння напружено-

деформівного стану отримуються на основі варіаційно-аналітичного методу з підвищеною точністю визначення розподілу переміщень і напружень муфти і з'єднувальних труб в радіальному напрямі. Доцільність моделювання різі пружним прошарком пояснюється, по-перше, відомою з теорії пружності сингулярністю розв'язків у кутових точках скінченних елементів. Крім цього, у випадку детального моделювання різі постає гостра проблема забезпечення достатньої для практики точності визначення напружень і деформацій. На відміну від класичної теорії оболонки, обраний підхід дає можливість адекватно відображати не лише напружено-деформівний стан в елементах з'єднання, але й контактні напруження в зоні різьбового прошарку та визначати пов'язані з цими напруженнями допустимі моменти згвичування. За рахунок раціонального добору базисних функцій забезпечується достатня точність розрахунку напружень і деформацій та забезпечується можливість дослідження крайових ефектів у зоні контакту труби і муфти. Для визначення параметрів пружного прошарку застосовуємо метод скінченних елементів.

На рис. 5 а, подана в аксонометрії схема з'єднання, яке складається з двох насосно-компресорних труб 1 і 2 та з'єднувальної муфти 3. На розрахунковій моделі (рис. 5, б) взаємодія елементів 1–3 здійснюється через пружні прошарки 4, 5, що моделюють зону різі. Припускаємо, що трубчасті елементи виготовлені з ізотропних матеріалів, а пружні властивості прошарків з достатньою точністю відображаються моделлю Вінклера. Напруження в прошарку, згідно з прийнятим припущенням, є пропорційними до різниці зміщень протилежних поверхонь.

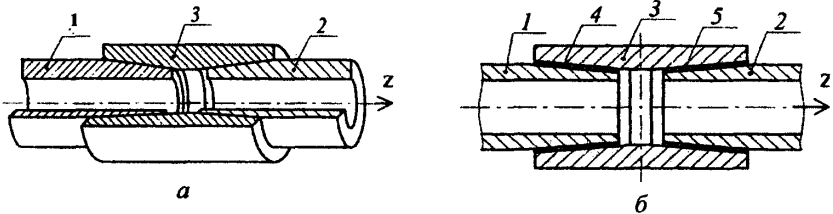


Рис. 5. Схема загального виду (а) і розрахункова модель (б) з'єднання

Послідовність досліджень міцності і щільності муфтових з'єднань складається з таких етапів:

- 1) визначення жорсткісних характеристик пружного прошарку між муфтою і трубою, яким моделюється різі;
- 2) аналіз напружено-деформівного стану елементів з'єднання, викликаного натягом;
- 3) аналіз напружено-деформівного стану елементів з'єднання, обумовленого крутним навантаженням;
- 4) аналіз напружено-деформівного стану і монолітності з'єднання з урахуванням реальних умов експлуатації та геометричних похибок поверхонь різі.

Між задачами 1, 2 і 3 існує тісний зв'язок: отримані на першому етапі методом скінченних елементів значення жорсткості різьбового прошарку використовуються для визначення напружень і деформацій, зумовлених натягом,

а ці, в свою чергу, враховуються під час розв'язування задачі про кручення з'єднання. Знаходження локальних значень напружень у витках різі вимагає сумісного використання як глобальних розрахункових так і локальних (скінченно-елементних) моделей.

Використовуємо варіаційне рівняння динамічної рівноваги оболонкового елемента змінної товщини, яке у загальному випадку має вигляд:

$$\begin{aligned} \delta I_k = & \int_0^t \int_0^{2\pi R^+} \int_{R^-}^L \left[ -\sigma_\varphi + \frac{\partial \tau_{r\varphi}}{\partial \varphi} + R \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} - r\rho \frac{\partial^2 u_r}{\partial t^2} \right] \delta u_r - r\sigma_r \frac{\partial \delta u_r}{\partial r} + \\ & + \left[ \frac{\partial \sigma_\varphi}{\partial \varphi} + \tau_{r\varphi} + r \frac{\partial \tau_{\varphi z}}{\partial z} - r\rho \frac{\partial^2 u_\varphi}{\partial t^2} \right] \delta u_\varphi - r\tau_{r\varphi} \frac{\partial \delta u_\varphi}{\partial r} + \\ & + \left[ r \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{\varphi z}}{\partial \varphi} - r\rho \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2} \right] \delta u_z - r\tau_{rz} \frac{\partial \delta u_z}{\partial r} \Big] dz dr d\varphi - \int_S (\vec{\sigma}_n - \vec{P}) \delta \vec{U} dS \Big] dt = 0. \quad (2) \end{aligned}$$

Тут  $\delta I_k$  – варіація енергії елемента конструкції (повна енергія є сумою енергії деформації та кінетичної енергії);  $R^-$ ,  $R^+$  – поточні значення внутрішнього та зовнішнього радіусів елемента;  $L$  – довжина елемента;  $u_z$ ,  $u_r$ ,  $u_\varphi$  – переміщення в осьовому, радіальному і коловому напрямках;  $\sigma_z$ ,  $\sigma_r$ ,  $\sigma_\varphi$  – нормальні напруження на площинах, ортогональних щодо відповідних осей;  $\tau_{rz}$ ,  $\tau_{z\varphi}$ ,  $\tau_{r\varphi}$  – дотичні напруження на цих площинах;  $S$  – поверхня тіла, на яку діє навантаження;  $\vec{\sigma}_n$  – вектор напружень на поверхні тіла;  $\vec{P}$  – вектор зовнішнього поверхневого навантаження;  $\vec{U}$  – вектор переміщень.

Переміщення  $u_z$ ,  $u_r$  задаємо у вигляді поліномів, що залежать від координат  $r$  та  $z$ . Оскільки процес деформування з'єднання вважаємо квазістаціонарним та у зв'язку з осьовою симетрією напружено-деформівного стану, необхідність інтегрування у варіаційному рівнянні (2) за часом та за кутовою координатою відпадає. Використовуючи симетрію задачі, розглядаємо половину з'єднання, що складається з півмуфти і ділянки труби, які взаємодіють через пружний прошарок типу основи Вінклера.

Коефіцієнт постелі визначали на спеціально побудованій розрахунковій моделі фрагмента різьбового з'єднання. Аналіз плоского напружено-деформівного стану деталей у осьовій площині виконували шляхом імітації притискання одного елемента з'єднання до іншого. Внутрішню поверхню труби вважали нерухомою, а повне переміщення зовнішньої поверхні муфти приймали рівним 0,0076 мм, виходячи з того, щоб напруження у матеріалі не перевищували границі текучості. Це переміщення розбивали на 20 однакових кроків. З використанням програмного забезпечення, що ґрунтується на числовій реалізації методу скінченних елементів, обчислювали коефіцієнт постелі з урахуванням умов контакту деталей (рис. 6). У випадку суцільної області цей коефіцієнт становить 25200 МПа/мм, у випадку

контакту, в якому відсутнє проковзування, – приблизно 21800 МПа/мм, у випадку контакту з проковзуванням – приблизно 19600 МПа/мм. Отже, наявність різі зменшує жорсткість зони контакту на 13,5– 22,5 %. Як видно з одержаних графіків (рис. 7), значення коефіцієнта постелі для різних кроків навантаження є дещо різними, однак їх відхилення від середнього значення не перевищує 5%.

Аналіз напружено-деформівного стану елементів з'єднання, проведений з урахуванням дії взаємозв'язаних розпірних сил і крутних моментів, показує, що найбільші значення мають колові напруження як в трубах, так і в муфті. Отже, міцність основного матеріалу елементів конструкції визначається розпірними навантаженнями. Збільшення моменту згинчування, а також збільшення жорсткості проміжного різьового прошарку приводить до локалізації напружень на межах різьових ділянок та до зростання максимальних напружень. Розроблена методика аналізу напружено-деформівного стану використана для визначення еквівалентних напружень і оцінки міцності елементів конструкції.

Знайшовши контактні напруження в зоні взаємодії труби з муфтою (рис. 7), обчислюємо відношення моменту згинчування до коефіцієнта тертя:

$$\frac{M}{f} = \iint_S \sigma_r(z)r(z)dS = 2\pi \int_0^{L_z} \sigma_r(z)r(z)dz. \quad (3)$$

За залежністю (3) визначені раціональні значення моментів згинчування з'єднань для різних умов експлуатації ліфтових колон. Показано, що момент згинчування насосно-компресорних труб можна значно підвищити у порівнянні з традиційним.

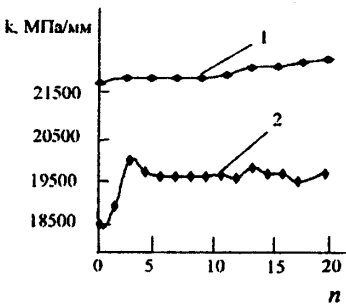


Рис. 6. Залежність коефіцієнта постелі від порядкового номера кроку навантаження без урахування (1) та з урахуванням (2) проковзування у зонах контакту витків

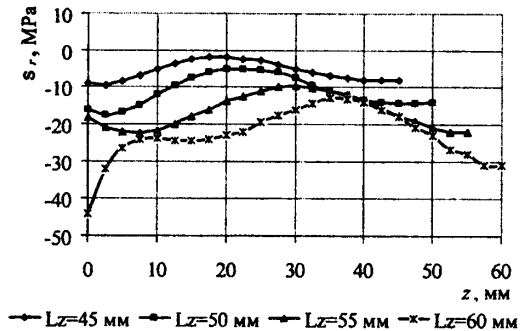


Рис. 7. Розподіл нормальних напружень в зоні контакту конічної різі для різних значень натягу ( $L_z$  – довжина робочої ділянки різі)

З урахуванням одержаного розподілу контактних напружень в зоні різьового прошарку проаналізована локальна міцність різі. Для цього методом скінченних елементів проведено розрахунки напружено-деформівного стану витків різі як у пружній, так і в пружно-пластичній постановці. Досліджено вплив геометричних похибок профілів витків на напруження в матеріалі.

У четвертому розділі розглядаються результати експериментальних досліджень динаміки ліфтових колон, які проводилися в реальних умовах експлуатації газових свердловин Більче-Волицько-Угерського підземного сховища газу. Під час досліджень використовували модернізовану сейсмостанцію „Прогрес” та спеціальний зонд, в якому встановлені давачі для реєстрації віброприскорень у трьох взаємно перпендикулярних напрямках: вісь одного з них розміщена паралельно до осі зонда (давач реєструє вертикальні коливання), а осі двох інших давачів розміщені перпендикулярно до осі зонда (давачі реєструють горизонтальні коливання). В корпусі зонда встановлено рухомий важіль з електромеханічним приводом, що забезпечує його надійне притискання до внутрішньої поверхні ліфтової колони і фіксацію в робочому положенні. Оскільки газ у свердловині перебуває під значним тиском, для забезпечення можливості опускання приладу за допомогою тросового кабеля було виготовлено спеціальний лубрикатор з регульованим гумовим ущільнювачем. Віброприскорення насосно-компресорних труб вимірювали на свердловині № 241 під час відбору та під час нагнітання газу, а також на свердловині № 34 під час нагнітання газу. Реєстрацію часових залежностей віброприскорень виконували протягом часових інтервалів 15 с, починаючи від нижнього кінця колони, з кроком 100 м по висоті. Часові залежності віброшвидкостей одержували шляхом числового інтегрування функцій віброприскорень, а часові залежності вібропереміщень, відповідно, шляхом числового інтегрування функцій віброшвидкостей.

Як видно з осцилограми вібропереміщень нижнього кінця ліфтової колони в напрямі горизонтальної осі  $y$  (рис. 8), цей кінець здійснює поперечні коливання зі значними амплітудами, що сягають величини проміжку між ліфтовою і обсадною колонами. Експериментально підтверджується, що ліфтова колона в процесі руху газу як у сховище, так і в зворотному напрямі, здійснює просторові коливання. Більші рівні вібрацій колони притаманні процесам відбору газу, дещо менші – процесам нагнітання. Амплітуди поперечних коливань колони значно перевищують амплітуди вертикальних коливань.

Залежності максимальних вібропереміщень поперечного перерізу ліфтової колони у  $y$  і  $z$  в напрямках відповідних горизонтальних осей та повного горизонтального вібропереміщення центра поперечного перерізу колони  $s$  від поздовжньої координати перерізу під час відбору газу на свердловині № 241 ілюструють графіки, подані на рис. 9. Наведені криві показують, що існує загальна тенденція до збільшення амплітуд вібрацій при переході від верхніх перерізів колони до нижніх. Однак, зазначені залежності не є монотонними. У деяких випадках спостерігається почергове зростання та спадання амплітуд. Це свідчить про те, що на амплітуди вібрацій суттєво впливає взаємодія ліфтової колони з обсадною колоною, обумовлена криволінійністю осі свердловини та її відхиленням від вертикалі. Якщо під час відбору чи нагнітання газу виникають інтенсивні вібрації ліфтової колони, то основну участь у динамічному процесі бере її нижня частина. Експериментальні залежності амплітуд коливань ліфтової колони від поздовжньої координати відтворюють характер аналогічних кривих, одержаних теоретичним шляхом.

Просторовий характер вібрацій насосно-компресорних труб підтверджують

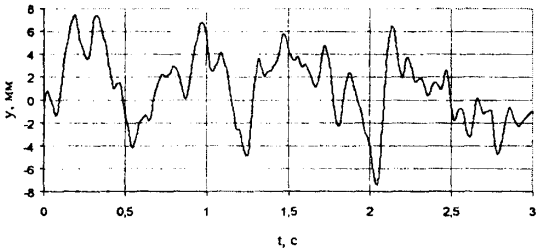


Рис. 8. Вібропереміщення нижнього кінця ліфтової колони (глибина 1035 м) під час відбору газу

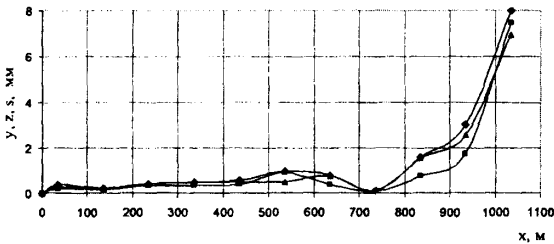


Рис. 9. Залежність вібропереміщень ліфтової колони від поздовжньої координати під час відбору газу

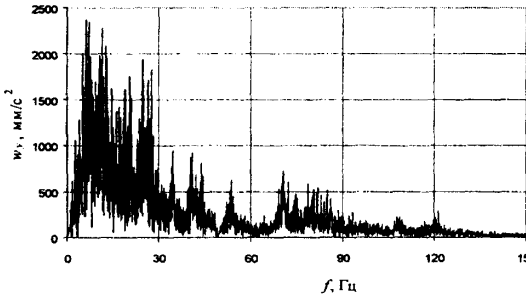


Рис. 10. Амплітудно-частотна характеристика поперечних коливань ліфтової колони на глибині 1035 м під час відбору газу

траєкторії руху, а також годографи швидкостей і прискорень поперечних перерізів ліфтової колони, одержані на основі експериментальних результатів. Вигляд траєкторії руху нижнього кінця колони свідчить про те, що в процесі відбору чи нагнітання газу мають місце ударні явища, викликані взаємодією ліфтової колони з обсадною колоною. Піки максимальних відхилень насосно-компресорної труби від осі свердловини приблизно розміщені по колу. Достовірність одержання траєкторії підтверджується тим, що нею відображається важлива закономірність фізичного процесу: під час ударної взаємодії насосно-компресорних і обсадних труб кут падіння приблизно дорівнює куту відбивання.

Високочастотні коливання віброприскорень відбуваються з набагато меншими амплітудами, ніж низькочастотні, тому вони мало впливають на віброшвидкості та на траєкторії руху центрів поперечних перерізів насосно-компресорних труб.

Амплітудно-частотні залежності, одержані на основі спектрального аналізу віброприскорень (рис. 10) показують, що найбільші амплітуди вібрацій спостерігаються на частотах 5–30 Гц. Коливання з дещо меншими амплітудами відбуваються на частотах 30–100 Гц. Отже, під час проектування віброізоляторів ліфтових колон необхідно брати до уваги частотний діапазон від 5 до 100 Гц.

У п'ятому розділі розглядаються технічні рішення та практичні рекомендації, спрямовані на підвищення ефективності роботи ліфтових колон. Розроблена і захищена деклараційним патентом на винахід конструкція спеціального з'єднання насосно-компресорних труб, в якому передбачається взаємне стопоріння деталей колони. Запропонована і запатентована конструкція віброізолятора для зниження рівнів вібрацій насосно-компресорних труб.

Опрацьована методика розрахунку аркових пружних елементів віброізолятора на міцність та на жорсткість, сформульовані рекомендації щодо раціонального проектування пружин. Показано, що жорсткість пружини з защемленими на опорних кільцях кінцями приблизно в 4 рази перевищує жорсткість пружини таких самих розмірів, кінці якої шарнірно закріплені на кільцях. Це вказує на доцільність застосування віброізоляторів з пружинами, кінці яких защемлені, а також на необхідність строгого врахування умов закріплення кінців пружини під час визначення жорсткості віброізолятора. Довжину пружини слід добирати за умовою, щоб її допустимий прогин був не меншим від максимального зазору між обсадними і насосно-компресорними трубами. Із збільшенням товщини пружини значно зростає її жорсткість і допустиме навантаження, однак допустимий прогин суттєво зменшується. Одержана загальна залежність для визначення жорсткості віброізолятора, в якому використовується група пружин.

Запропонована методика діагностики технічного стану муфтових з'єднань, яка полягає у тому, що до верхнього кінця колони прикладається імпульсне навантаження і на цьому ж

кінці реєструються внутрішні зусилля в трубі. Якщо внаслідок ослаблення з'єднання поблизу нижнього кінця колони утворюється зазор, то ударні явища, які виникають в місці зазороутворення, проявляються на формі зворотної хвилі деформацій та на часовій залежності внутрішньої сили (рис. 11). Побудовані математична модель і алгоритм розрахунку динамічних процесів, збурених імпульсно-хвильовим пристроєм. Розглянуто вплив характеристик системи і навантажень на можливість проведення діагностики.

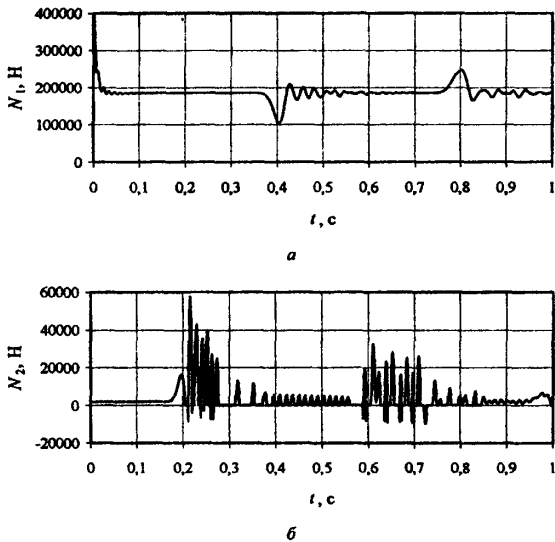


Рис. 11. Поздовжні зусилля у крайньому верхньому перерізі ліфтові колони (а) і в місці розслабленого муфтового з'єднання (б)

## ВИСНОВКИ

Як показує аналіз особливостей експлуатації свердловин підземних сховищ газу, а також огляд численних джерел інформації з динаміки нафтогазопромислового обладнання, методів розрахунку різьових з'єднань, теорії механічних коливань і теорії товстостінних оболонок, проблема забезпечення міцності і надійності муфтових з'єднань ліфтових колон становить не лише актуальну, а й достатньо складну наукову задачу. У дисертації проведено комплекс теоретичних і експериментальних досліджень, спрямованих на вивчення умов роботи ліфтових колон, а також на підвищення ефективності їхньої експлуатації за рахунок запобігання розгвинчуванню шляхом зниження амплітуд коливань і раціонального добору моментів згвинчування.

1. Із застосуванням континуально-дискретних розрахункових моделей досліджені вільні і вимушені поздовжні, крутильні і поперечні коливання ліфтової колони. З'ясовано, що власні частоти ліфтової колони утворюють густий частотний спектр, внаслідок чого існує висока ймовірність виникнення резонансних коливальних явищ. В реальному діапазоні частот вимушених коливань (від 5 до 100 Гц) основну участь у вібраційному процесі бере нижня частина колони довжиною близько 100 м. Це свідчить про те, що в області її нижньої частини доцільно встановлювати віброзахисний пристрій.

Основною причиною погіршення умов роботи муфтових з'єднань можна вважати згинні коливання ліфтової колони, оскільки в реальних умовах динамічних навантажень амплітуди поперечних переміщень нижнього кінця колони значно перевищують амплітуди поздовжніх переміщень. Закріплення нижньої частини ліфтової колони за допомогою віброізоляційного пристрою дає можливість суттєво зменшити амплітуди коливань нижнього кінця колони. Із збільшенням жорсткості пристрою амплітуда вимушених коливань зменшується. Вібрації колони відбуваються в зарезонансній зоні механічної системи, суттєвого зниження амплітуд поперечних коливань можна досягти, коли жорсткість віброізолятора становить  $10^5$ – $10^6$  Н/м.

2. На основі методу скінченних елементів побудовані математична модель і алгоритм розрахунку поперечно-крутильних коливань ліфтової колони з урахуванням взаємодії насосно-компресорних труб з обсадними трубами. Показано, що у ліфтовій колоні, внаслідок її взаємодії з обсадною колоною, виникають періодично змінні крутні моменти, що сприяють ослабленню муфтових з'єднань в умовах вібрацій. Віброізоляція нижнього кінця колони дає можливість не лише зменшити амплітуди коливань насосно-компресорних труб, а й у 2–3 рази знизити крутні моменти в колоні, практично усуваючи їхній вплив на умови роботи муфтових з'єднань. Оскільки амплітуда динамічного навантаження залежить від довжини ділянки ліфтової колони, що перебуває в зоні перфорації обсадної колони, для зменшення шкідливого впливу вібрацій доцільно рекомендувати встановлення ліфтової колони таким чином, щоб її нижній кінець знаходився поблизу верхньої межі перфорації.

3. Розроблені математичні моделі і алгоритми розрахунку напружень і деформацій елементів муфтових з'єднань ліфтової колони на основі застосування



уточненої теорії оболонки і гіпотези про еквівалентну заміну витків різі пружними прошарками типу основи Вінклера. Рівняння напружено-деформівного стану одержано на основі варіаційно-аналітичного методу з підвищеною точністю визначення розподілу переміщень по товщині муфти і з'єднаних труб. Опрацьована скінченно-елементна методика визначення коефіцієнта жорсткості пружного прошарку. Досліджено напружено-деформівний стан з'єднання, обумовлений розпірними і крутними навантаженнями. На основі одержаних результатів обґрунтовані раціональні моменти загвинчування різьбових з'єднань ліфтової колони. Показано, що цей момент може бути збільшений на 20–30% у порівнянні з традиційним, що сприятиме забезпеченню працездатності ліфтової колони.

4. Опрацьована методика і проведені експериментальні дослідження вібрацій ліфтових колон на реальних свердловинах підземних сховищ газу під час відбору газу та під час його нагнітання. Підтверджено, що ліфтова колона в процесі руху газу як у сховище, так і в зворотному напрямі, здійснює просторові коливання. Більші рівні вібрацій колони притаманні процесам відбору газу, дещо менші – процесам нагнітання. Амплітуди поперечних коливань нижньої частини колони значно перевищують амплітуди вертикальних коливань. Експериментальні залежності амплітуд коливань ліфтової колони від поздовжньої координати з достатньою точністю відповідають аналогічним залежностям, одержаним теоретичним шляхом. В процесі проведення експериментальних досліджень виявлено, що найбільші рівні вібрацій спостерігаються у частотному діапазоні 5–30 Гц. Коливання з дещо меншими амплітудами проявляються на частотах 30–100 Гц. Підтверджено припущення про те, що із збільшенням довжини ділянки ліфтової труби, яка знаходиться в області перфорації обсадної колони, інтенсивність коливань насосно-компресорних труб зростає.

5. З метою забезпечення працездатності ліфтових колон підземних сховищ газу розроблені і захищені патентами конструкція стопорного пристрою для запобігання розгвинчуванню муфтового з'єднання, а також конструкція віброізолятора ліфтової колони. Розроблена методика розрахунку плоских пружин віброізолятора як криволінійних стрижнів з одночасним урахуванням умов міцності і жорсткості та обґрунтована доцільність жорсткого закріплення пружин на опорних кільцях. Запропонована методика діагностики щільності муфтових з'єднань ліфтових колон, яка ґрунтується на використанні властивостей імпульсно-хвильових явищ і може застосовуватися під час проведення профілактично-ремонтних робіт на свердловині.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. *Савула С. Ф., П'янило Я. Д., Прутула М. Г.* Розрахунок дебіту свердловини з урахуванням глибини спуску ліфтової труби // *Нафтова і газова промисловість.* – 2002. – № 3. – С. 20–21.
2. *Савула С. Ф., Харченко С. В.* Дослідження жорсткості та міцності аркових пружних елементів // *Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій: Зб. наук. пр. Випуск 6.* – Львів: Каменяр, 2005. – С. 545–551.

3. *Савула С. Ф.* Розрахунок напружено-деформівного стану муфтових з'єднань насосно-компресорних труб // *Методи та прилади контролю якості.* – 2005. – №15. – С. 69–74.
4. *Харченко С. В., Савула С. Ф.* Математична модель поперечно-крутильних коливань експлуатаційної колони підземного сховища газу // *Вібрації в техніці та технологіях.* – 2006. – № 1(43). – С. 139–141.
5. *Савула С. Ф., Харченко С. В.* Напружено-деформівний стан муфтових трубних з'єднань, що працюють в умовах вібрацій, зумовлений розпірними навантаженнями // *Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні / Український міжвідомчий науково-технічний збірник.* Вип. 40. – Львів: Вид-во Національного університету «Львівська політехніка», 2006. – С. 200–210.
6. *Савула С. Ф., Харченко С. В., Кичма А. О.* Експериментальні дослідження динаміки ліфтових колон підземного сховища газу // *Машинознавство.* – 2006. – №6. – С. 30–34.
7. *Савула С. Ф.* Методика визначення об'ємів експлуатації об'єктів підземного зберігання газу, створених у покладах багато пластового газового родовища // *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу.* Вип. 2 (8). – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2004. – С. 61–73.
8. *Савула С. Ф., Колодій В. Т., Харченко С. В., Кичма А. О.* Оцінка впливу коливань колони насосно-компресорних труб на умови роботи різьбових з'єднань // *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу.* Вип. 2 (8). – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2004. – С. 116–125.
9. *Савула С. Ф., Колодій В. Т., Гурняк Л. І., Кичма А. О., Харченко С. В.* Віброізолятор колони насосно-компресорних труб. Деклараційний патент на винахід №67304А. – Бюл. № 6 від 15.06.2004.
10. *Савула С. Ф., Колодій В. Т., Гурняк Л. І., Кичма А. О., Харченко С. В.* З'єднання насосно-компресорних труб. Деклараційний патент на винахід №67305А. – Бюл. № 6 від 15.06.2004.
11. *Savula S., Kharchenko Y., Kychma A.* Modelowanie matematyczne drgań swobodnych i wymuszonych kolumny rur eksploatacyjnych podziemnego zbiornika gazu // *Energia w nauce i technice. Materiały seminaryjne.* – Białystok-Suwałki: Wydawnictwo Politechniki Białostockiej, 2003. – S. 67–74.
12. *Савула С. Ф., Харченко С. В., Кичма А. А.* Импульсно-волновой метод диагностики резьбовых соединений колонны насосно-компресорных труб // *Материалы XIV Международной деловой встречи “Диагностика-2004”.* Арабская республика Египет. Том 2. Часть 1. – М.: Газпром, 2004. – С. 171–177.
13. *Савула С. Ф.* Розрахунок поперечно-крутильних коливань колони насосно-компресорних труб підземного сховища газу // *7-й Міжнародний симпозіум українських інженерів-механіків у Львові.* – Львів: КІНПАТPI, 2005. – С. 29.
14. *Savula S., Kharchenko Y.* Tlumienie drgan kolumny rur pompowo-sprezarkowych w odwiercie podziemnego zbiornika gazu // *Wiertnictwo Nafta Gaz: Rocznik,* 2006. Tom 23/1. – Krakow: AGH. Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne, 2006. – S. 377–384.

## АНОТАЦІЯ

**Савула С. Ф. Підвищення ефективності експлуатації ліфтових колон свердловин підземних сховищ газу. – Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.15.13 – нафтогазопроводи, бази та сховища. – Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. – Івано-Франківськ, 2007.

Дисертація присвячена підвищенню ефективності експлуатації ліфтових колон свердловин підземних сховищ газу за рахунок запобігання розгвинчуванню колон шляхом зниження амплітуд їхніх коливань і раціонального добору моментів згвинчування. Розроблені математичні моделі вільних і вимушених коливань ліфтової колони, що виникають під час експлуатації свердловин, обґрунтовані раціональні значення коефіцієнта жорсткості віброізолятора, з'ясований вплив параметрів віброізолятора на розподіл крутних моментів по довжині колони. Із застосуванням теорії товстостінних оболонок і гіпотези про еквівалентну заміну витків різі пружними прошарками типу основи Вінклера побудовані математичні моделі напружено-деформівного стану елементів муфтового з'єднання, що дає можливість обґрунтовувати допустимі моменти згвинчування. Експериментально визначені амплітудно-частотні характеристики вібрацій ліфтових колон. Запропоновані технічні рішення і практичні рекомендації, спрямовані на запобігання розгвинчуванню ліфтових колон.

**Ключові слова:** підземне сховище газу, свердловина, ліфтова колона, віброізоляція, напружено-деформівний стан, запобігання розгвинчуванню.

## SUMMARY

**Savula S. F. Increasing Effectiveness in Operation of Lift Column of Wells of Underground Gas Storage. – Manuscript.**

This is to gain the scientific degree of the Candidate of technical Sciences according to the speciality 05.15.13 – Oil and Gas Pipelines, Reservoirs and Storages – Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, 2007.

The dissertation is devoted to the increase in effectiveness of operation of lift columns of wells used in Underground gas storages at the expense of preventing unscrewing of the columns by means of decreasing amplitudes of their oscillation and rational choice of screwing moments. Mathematical models of natural and forced vibration of the lift column emerging during operation of wells are developed; optimal values of stiffness coefficient of the vibration isolator are substantiated, the influence of vibroisolator parameters on the distributin of tokgue moments along the column. Applying thick shells theory and hypothesis on equivalent substitution tuns of theading by elastic layers of Vinklrs base type, mathematical models of the stress-strain state for the elements of threading couplng are elaborated, this enables us to substantiate the optimal screwing ifroments. Amplitude-frequency characteristics of lift columns vibrations are experimentally obtained. Technical decisions and practical recommendations aimed at preventing unscrewing of lift columns are suggested.

**Key words:** underground gas storage, well, lift column, vibrations isolation, stressed-strain state, preventing unscrewing.

## АННОТАЦИЯ

**Савула С. Ф. Повышение эффективности эксплуатации лифтовых колонн скважин подземных хранилищ газа. – Рукопись.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.15.13 – нефтегазопроводы, базы и хранилища. – Иванов-Франковский национальный технический университет нефти и газа. – Иванов-Франковск, 2007.

Диссертация посвящена повышению эффективности эксплуатации лифтовых колонн, установленных на скважинах подземных хранилищ газа, за счёт предупреждения разгвинчивания колонн путем снижения амплитуд их колебаний и рационального выбора моментов свинчивания.

Разработаны математические модели и алгоритмы расчета свободных и вынужденных продольных, крутильных и поперечных колебаний лифтовой колонны. Проанализированы собственные частотные спектры, собственные формы колебаний, а также амплитудно-частотные характеристики гармонических вынужденных колебаний. Выявлена высокая вероятность возникновения резонансных явлений. Показана целесообразность виброизоляции нижнего конца колонны, определены рациональные значения коэффициента жёсткости виброизолятора.

Предложена математическая модель вынужденных поперечно-крутильных колебаний лифтовой колонны с учетом её динамического взаимодействия с колонной обсадных труб, ось которой имеет отклонения от прямой линии. Расчет колебательных процессов выполняется методом конечных элементов. Показано, что работа лифтовой колонны сопровождается её ударами об стенку скважины, вызывающими появление крутящих моментов, способствующих разгвинчиванию колонны. Виброизоляция нижнего конца колонны даёт возможность существенно уменьшить амплитуды колебаний и практически устранить влияние крутящих моментов на условия работы муфтовых соединений.

С использованием уточненной теории оболочек вращения и гипотезы о эквивалентной замене витков резьбы упругим слоем типа основания Винклера построены математические модели напряжённо-деформированного состояния элементов муфтовых соединений насосно-компрессорных труб. Разрешающие уравнения получены с использованием вариационно-аналитического метода теории упругости с повышенной точностью определения распределения перемещений и напряжений в муфте и соединяемых трубах в радиальном направлении. В отличие от классической теории оболочек, данный подход дает возможность адекватно отображать не только напряжённо-деформированное состояние, но и контактные напряжения в зоне резьбового слоя и определять связанные с этими напряжениями допустимые моменты свинчивания. Достаточную точность расчёта напряжённо-деформированного состояния, а также возможность исследования краевых эффектов в зоне контакта трубы и муфты обеспечиваем за счет рационального выбора базисных функций. Для определения параметров упругого слоя используется метод конечных элементов.

Показано, что для обеспечения достаточной точности определения коэффициента постели необходимо учитывать взаимное проскальзывание витков резьбы.

Анализ напряжённо-деформированного состояния элементов соединения, проведенный с учётом действия взаимосвязанных распорных сил и крутящих моментов, показывает, что наибольшие значения имеют окружные напряжения как в трубах, так и в муфте. Следовательно, прочность основного материала элементов конструкции определяется распорными нагрузками. Увеличение момента свинчивания, а также увеличение жёсткости промежуточного слоя приводит к локализации напряжений на границах резьбовых участков и к возрастанию максимальных напряжений. Разработанная методика анализа напряжённо-деформированного состояния использована для определения эквивалентных напряжений и оценки прочности элементов конструкции. На основании расчета контактных напряжений в зоне взаимодействия трубы с муфтой найдены рациональные значения моментов свинчивания соединений при различных эксплуатационных условиях. Показано, что этот момент можно существенно увеличить по сравнению с традиционным.

Разработана методика и проведены экспериментальные исследования вибраций лифтовых колонн на скважинах подземных хранилищ газа во время отбора газа и во время его закачивания. Экспериментально подтверждено, что лифтовая колонна в процессе работы осуществляет пространственные колебания. Большие уровни вибраций свойственны процессам отбора газа, меньшие – процессам закачивания. Амплитуды поперечных колебаний нижней части колонны значительно превышают амплитуды продольных и крутильных колебаний. В процессе экспериментальных исследований установлено, что наибольшие уровни вибраций наблюдаются в диапазоне частот 5–30 Гц. Колебания с меньшими амплитудами проявляются на частотах 30–100 Гц. Экспериментальные зависимости амплитуд колебаний лифтовой колонны от продольной координаты с достаточной точностью соответствуют аналогичным зависимостям, полученным теоретическим путём.

С целью обеспечения работоспособности лифтовых колонн подземных газохранилищ разработаны и защищены патентами конструкция стопорного устройства для предупреждения развинчивания муфтового соединения, а также конструкция виброизолятора лифтовой колонны. Разработана методика расчета плоских пружин виброизолятора как криволинейных стержней с одновременным учётом условий прочности и условий жёсткости. Показана целесообразность жесткого крепления пружин на опорных кольцах виброизолятора.

Разработана методика импульсно-волновой диагностики плотности муфтовых соединений лифтовых колонн, которая может использоваться во время проведения профилактически-ремонтных работ на скважине.

**Ключевые слова:** подземное хранилище газа, скважина, лифтовая колонна, эффективность работы, виброизоляция, напряжённо-деформированное состояние, предупреждение развинчивания.