

ОГЛЯД ДИСЕРТАЦІЙ, ЗАХИЩЕНИХ СПІВРОБІТНИКАМИ НВФ “ЗОНД”

УДК 622.245+620.179

ПІДВИЩЕННЯ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ БУРИЛЬНИХ ТРУБ З КОНІЧНИМИ СТАБІЛІЗУЮЧИМИ ПОЯСКАМИ

© Карпаш О.М.

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,
проректор з наукової роботи*

(на час захисту – зав. відділом неруйнівного контролю СКТБ „Надра” ІФНТУНГ)

*Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.04.07 –
Машини і агрегати нафтової і газової промисловості*

Досліджено причини відмов бурильних труб з конічними стабілізуючими поясками, пов'язані з корозійно-втомним руйнуванням їх елементів, і на основі цього розроблені способи і технічні засоби, які підвищують працездатність таких труб шляхом скорочення кількості відмов. Запропонований і досліджений спосіб підвищення достовірності виявлення дефектів у бурильних трубах за допомогою ультразвуку. Розроблені способи ультразвукового контролю тіла бурильних труб, якості їх збирання з замками і методика раціонального застосування засобів неруйнівного контролю в процесі буріння глибоких нафтових і газових свердловин. Розроблені засоби ультразвукового контролю бурильних труб пройшли випробування і впроваджені в об'єднаннях „Ленанефтигазгеологія”, „Азнефть”, „Нижневожжскнефть”, „Укрнефть”, а також використовуються при проведенні підрядних бурових робіт в Лівії, Індії та Іраку.

Існують різні способи підвищення працездатності бурильних труб: конструктивне зміцнення різьбових з'єднань, їх захист від зношення і корозійно-ерозійної дії агресивного середовища, контроль неруйнівними методами тощо. Для зниження аварійності бурильних труб через втомне пошкодження різьбових ділянок були створені нові конструкції бурильних труб з високоміцними різьбовими з'єднаннями, зокрема, труби з конічними стабілізуючими поясками за ГОСТ 631-75, типи III і IV (труби ВК і НК). Однак, не зважаючи на відносно високі показники втомної довговічності різьбових з'єднань труб ВК і НК, отримані при їх стендових випробуваннях, у практиці буріння спостерігаються поломки труб ВК по різьбовому з'єднанню. Дослідженню міцності труб нафтового сортаменту присвячено багато робіт вітчизняних і зарубіжних авторів. У результаті опрацювання цих робіт розроблені такі основні способи підвищення працездатності бурильних труб:

- створення нових конструкцій бурильних труб з високоміцними і герметичними різьбовими з'єднаннями;
- удосконалення конструкцій різьбових з'єднань бурильних труб, які знаходяться в експлуатації;
- зміцнення і захист різьбових з'єднань бурильних труб від зносу і корозії;
- контроль стану різьбових з'єднань бурильних труб неруйнівними методами.

Їх впровадження призвело в цілому до стабілізації аварійності, однак аварійні руйнування різьбових з'єднань бурильних труб, у тому числі нових конструкцій, спостерігаються ще досить часто. Це пояснюється, по-перше, зростанням глибини свердловин, несприятливими геологічними і технологічними особливостями буріння, по-друге – недостатнім вивченням причин виникнення та закономірностей розвитку дефектів у бурильних трубах підвищеної міцності і, як наслідок, відсутністю засобів контролю для них.

Аналіз літературних даних показав необхідність пошуку способів підвищення працездатності бурильних труб нових конструкцій. З цією метою було проаналізовано параметри, які визначають несучу здатність (міцність) з'єднань з натягом, і показано, що для різьбових з'єднань „бурильна труба ВК – замок” таким параметром є діаметральний натяг по стабілізуючому пояску. З використанням залежностей Ляме були виконані інженерні розрахунки на міцність з'єднань бурильних труб ВК діаметром від 89 до 140 мм, визначені величини контактних тисків по стабілізуючому пояску і похибка, з якою необхідно їх вимірювати. Також були встановлені причини неякісної зборки труб ВК з замками і показано, що єдиним прийнятним з методів неруйнівного контролю для визначення величини діаметрального натягу зібраних з'єднань є ультразвуковий.

Використовуючи результати робіт А.Лубинського, В.Вітека, Ю.Васильєва та інших авторів, отримані при розрахунку міцності бурильної колони, працюючої в інтервалах перегину стовбура свердловини, та методи математичного аналізу, отримали вираз для визначення віддалі l від торця замка до перерізу, в якому додаткові згинаючі напруження в перерізах бурильної труби дорівнюють нулю:

$$l = L - \sqrt{2 \left(\frac{2\sigma_{\text{зг}} \cdot shL \cdot \sqrt{P/EI}}{E \cdot C \cdot D \cdot \sqrt{P/EI}} - 1 \right)}, \quad (1)$$

де L – половина довжини труби, мм; E – модуль Юнга, Па; I – момент інерції, мм⁴; P – розтягуюча сила, Н; $\sigma_{\text{зг}}$ – додаткові згинаючі напруження, МПа; D – зовнішній діаметр труби, мм; C – інтенсивність викривлення стовбура свердловини, мм⁻¹.

Розрахунки зони дії додаткових згинаючих напружень для труб ВК найбільш застосовуваних типорозмірів (від 114 до 140 мм), працюючих у різних інтервалах глибин і перегинів стовбура свердловини, показали, що додаткові згинаючі напруження можуть виникати на віддалі не більше 2000 мм від торця замка. Ці результати добре узгоджуються з промисловими (на віддалі до 1500 мм від торця труби) даними про місця пошкодження бурильних труб вздовж тіла. Тому рекомендовано в умовах бурової проводити дефектоскопію тіла не всієї бурильної колони, а тільки призамкової зони (до 2 м від замка).

У результаті проведених теоретичних та експериментальних досліджень були розроблені способи визначення діаметрального натягу по стабілізуючому пояску за допомогою ультразвуку – за одно- і багатократного відбиття ультразвукових коливань від спряженої поверхні (а.с. № 905778). Аналітично визначено основний параметр контролю – кут падіння ультразвукових коливань на поверхню спряження.

$$\alpha = \arctg \frac{D \sin \frac{\pi}{6n}}{D - 2 - D \sqrt{4 \sin^2 \frac{\pi}{12n} \sin^2 \frac{\pi}{6n}}}, \quad (2)$$

де D, d – відповідно діаметри охоплюючої (замка) і охоплюваної (труби) деталей, мм; n – кількість відбиттів від внутрішньої поверхні охоплюючої деталі в секторі, довжина хорди якого дорівнює $D/2$.

Дослідження способів ультразвукового контролю тіла бурильних труб дозволило визначити основні параметри (кут призми перетворювача β і віддаль M між п'єзоперетворювачем і дефектом) для ряду випадків:

а) площина дефекту орієнтована під кутом θ до осі труби:

$$\beta = \arcsin \left(\frac{C_{l_1}}{C_{l_2}} \cos \theta \right), \quad M = \frac{2q \cdot \cos \theta - h}{\sin \theta}, \quad (3)$$

де q – товщина виробу, мм; h – глибина дефекту, мм; C_{l_1}, C_{l_2} – відповідно швидкості поширення поздовжніх ультразвукових коливань в призмі і поперечних в контрольованому виробі, мм/с.

б) площина дефекту орієнтована перпендикулярно до осі труби:

$$\beta = \arccos \psi, \quad (4)$$

де ψ – кут падіння УЗК на площину дефекту, град;

$$M = \frac{2q - h}{\text{ctg} \alpha}. \quad (5)$$

Обмеженням для застосування ультразвукового контролю може бути стан контрольованої поверхні, температура навколишнього середовища, властивості акустичної рідини, недостатня чутливість тощо. Для усунення цих обмежень було запропоновано використовувати опорний сигнал (а.с. № 575564) та фокусуючі п'єзоперетворювачі, випромінююча поверхня яких виконується з урахуванням співвідношення:

$$R_n = \frac{R_{\text{sup}}}{\sqrt{1 + \frac{1}{n^2} - \frac{2}{n} \cos \gamma}}, \quad (6)$$

де R_n – віддаль, яка описує кривизну випромінюючої поверхні призми, мм; R_{sup} – радіус контрольованого виробу, мм; n – коефіцієнт заломлення на границі розділу „матеріал призми – контактна рідина”; γ – кут падіння ультразвукових коливань на границі розділу „матеріал призми – контактна рідина”, град.

Щоб підтвердити висновок, що бурильні труби ВК руйнуються в процесі експлуатації по різьбі через невідповідність діаметрального натягу по стабілізуючому пояску його нормованому значенню, провели промислові і стендові випробування.

Під час промислових випробувань порівнювалось стан поверхонь стабілізуючого пояса труби і замка контрольного комплексу труб, зібраних з нормованим діаметральним натягом (від 0,3 до 0,54 мм) по різьбі і стабілізуючому пояску, та труб, зламаних по різьбі в процесі експлуатації. Контрольний комплект, що складався з 25 труб, відпрацьовувався в необсадженої свердловині до зношення зовнішньої поверхні замків нижче допустимого значення. Потім замкові деталі знімали з труб (сточуванням на токарному станку) і проводили зовнішній огляд вільних поверхонь стабілізуючого пояса труби і замка та вимірювали зони поширення фреттинг-корозії по його поверхні. Було встановлено, що на поверхнях стабілізуючого пояса замка і труби її сліди виявлено тільки в п'яти з'єднаннях на довжині до 5 мм від торця замкової деталі, а в зруйнованих з'єднаннях – у декількох місцях вздовж твірної і по колу спряжених поверхонь. Це свідчить про недотримання необхідного натягу при зборці.

Аналіз зібраних промислових даних (тільки на трубних базах об'єднання „Укрнафта” було прокалібровано понад 1700 нових і тих, що були в експлуатації, труб і замків різних діаметрів) показав, що значну кількість (до 16 %) труб і замків виготовлено з відхиленнями від вимог нормативної документації, а в трубах, що були в експлуатації, спостерігається в основному (22 %) зменшення діаметру по стабілізуючому пояску, що можна пояснити зношенням зовнішніх поверхонь стабілізуючого пояса труби і замка в процесі експлуатації, особливо за роботи в екстремальних умовах (перегин стовбура свердловини, прихват бурильного інструменту тощо).

Стендові випробування проводились з метою визначення опору втомі труб ВК, зібраних з натягом по стабілізуючому пояску, близьким до нуля (0,01 до 0,17 мм). У результаті випробувань встановлено вплив величини діаметрального натягу по кінцічному стабілізуючому пояску на міцність різьбового з'єднання труб ВК і визначені вимоги до засобів контролю якості їх зборки.

Стендові і лабораторні експерименти по вивченню закономірності зародження і розвитку корозійно-втомних тріщин у тілі труб ВК, зібраних з замками з нормальним значенням діаметрального натягу по різьбі і стабілізуючому пояску, показали, що:

- час зародження корозійно-втомних тріщин складає менше 40-50% тривалості роботи бурильних труб до поломки;

- швидкість поширення тріщини від моменту її зародження до поломки зразка становить від 10^6 до 10^{12} мм/цикл.;

- числове значення кута нахилу тріщини до осі труби, визначене з довірчою ймовірністю $P=0,95$, знаходиться в інтервалі $(22\pm 5)^\circ$.

Щоб встановити залежність між амплітудою УЗК і діаметральним натягом, провели перш за все експерименти на зразках, виготовлених із замків для труб ВК. Навантаження зразків відбувалось на гідравлічному пресі 2ПГ-10. Розміри зразків обирали такими, щоб забезпечити можливість створення контактного тиску в діапазоні від 0 МПа до 240 МПа, оскільки він перебиває діапазон контактних тисків по стабілізуючому пояску (до 150 МПа), які виникають при зборці труб ВК із замками. Спершу експерименти проводились на частотах 0,6, 1,25, 2,5 і 5,0 МГц, щоб визначити ту частоту ультразвукових коливань, для якої існує найбільш тісний кореляційний зв'язок і крутизна характеристики між амплітудою УЗК і величиною контактного тиску. Подальші дослідження проводились на частоті 5,0 МГц. Досліджувався вплив шорсткості контактуючих поверхонь та типу мастила на результати контролю.

Аналогічні експерименти були проведені на натурних зразках труб ВК діаметром 140 мм, зібраних із замками шляхом селективного підбору по калібрам з використанням спеціально розробленої номограми. При цьому забезпечувався діаметральний натяг по стабілізуючому пояску в діапазоні від 0,00 до 0,80 мм. Для з'ясування характеру розподілу контактного тиску по поверхні спряження амплітуда УЗК вимірювалась на кожному з'єднанні у 18 точках: по шести твірним при трьох положеннях п'єзоперетворювача. Дослідження показали, що:

- між амплітудою УЗК і діаметральним натягом існує лінійний кореляційний зв'язок, який описується рівнянням регресії виду:

$$A = 5,13 - 7,98 \cdot N, \quad (7)$$

- і найбільш тісним він є на частотах 2,5 і 5,0 МГц;

- шорсткість контактуючих поверхонь майже не впливає на характер залежності;

- відсутність мастила між контактуючими поверхнями приводить до значного (в середньому 12 дБ) зменшення амплітуди УЗК.

Суть порівняльних випробувань полягала у вимірюванні інтенсивності розподілу УЗК та у виявленні дефектів малих розмірів в реальних зразках при використанні плоских і фокусуєчих п'єзоперетворювачів. Отримані результати були оброблені методом інтерполяції і показали, що застосування фокусуєчих п'єзоперетворювачів дозволяє підвищити чутливість контролю на 8-12 дБ.

Експериментальне дослідження впливу кута нахилу площини дефекту на амплітуду УЗК показало, що амплітуда луна-імпульсу від дефекту, розташованого під кутом 22° , у середньому на 3 дБ менша за амплітуду сигналу від дефекту, перпендикулярного до осі труби. На цій підставі рекомендовано використовувати для настроювання зразки із штучними дефектами, перпендикулярними до осі труби.

Наукова новизна

1. Встановлено вплив величини діаметрального натягу по кінчному стабілізуючому пояску на міцність різьбового з'єднання бурильних труб ВК.

2. Досліджено процес розвитку корозійно-втомних тріщин у тілі бурильних труб, у результаті чого встановлені час розвитку тріщин від моменту виявлення до поломки труби, швидкість і спрямованість фронту їх поширення.

3. Теоретично обґрунтовано застосування ультразвукового методу для контролю якості зборки (діаметрального натягу) різьбових з'єднань бурильних труб та експериментально встановлена залежність між амплітудою УЗК і діаметральним натягом.

4. Запропонований і досліджений спосіб підвищення достовірності виявлення дефектів в бурильних трубах за допомогою ультразвуку, розроблені способи ультразвукового контролю тіла бурильних труб, якості їх зборки з замками і методика раціонального застосування засобів неруйнівного контролю в процесі буріння глибоких свердловин.

Практичне значення

1. Розроблені методика і засоби виявлення дефектів в тілі бурильних труб підвищеної міцності безпосередньо на буровій в процесі спуско-підіймальних операцій призвели до зменшення кількості аварій з бурильними трубами.

2. Рекомендації щодо дефектоскопії тільки кінцевих ділянок бурильних труб (на віддалі до 2000 мм від замка) та її періодичності зменшили непродуктивний час роботи бурової.

3. Дані рекомендації по використанню бурильних труб ВК і замків до них, виготовлених з відхиленням від вимог стандарту.

4. Результати досліджень можуть бути використані при розробці технічних засобів неруйнівного контролю інших типів труб нафтового сортаменту з високоміцними різьбовими з'єднаннями.

Основні результати і висновки

1. На основі теоретичних і експериментальних досліджень розроблені способи і технічні засоби, які підвищують працездатність бурильних труб з кінчними стабілізуючими поясками шляхом зменшення кількості відмов, пов'язаних з корозійно-втомним руйнуванням їх елементів.

2. Дослідження причин відмов бурильних труб з кінчними стабілізуючими поясками і закономірностей розвитку корозійно-втомних тріщин в них показали, що:

- причиною руйнування труб ВК по різьбовій частині є невідповідність діаметрального натягу по стабілізуючому пояску його нормованому значенню (від 0,3 до 0,54 мм);

- час зародження корозійно-втомних тріщин в тілі бурильних труб складає менше 50 % тривалості

роботи труби до поломки, а кут нахилу тріщини до осі труби на ранній стадії розвитку (глибина 1,5 мм) знаходиться в інтервалі від 17 до 27 градусів;

- похибка виготовлення стабілізуючих поясків труб ВК і замків до них перевищує 15 %.

3. У результаті виконаних досліджень:

- рекомендовано обмежити проведення дефектоскопії бурильної колони тільки в призмковій зоні (на віддалі до 2000 мм від замка);

- визначена періодичність проведення дефектоскопії тіла бурильних труб, яку можна прийняти оптимальною;

- запропонована методика, що забезпечує зборку труб ВК з замками, виготовленими з відхиленнями від вимог стандарту, з нормальним натягом по стабілізуючому пояску.

4. Встановлено наявність залежності між амплітудою ультразвукових коливань і величиною діаметрального натягу, що характеризується рівнянням регресії виду $A = 5,13 - 7,98 \cdot N$.

5. На основі вказаної залежності розроблені способи ультразвукового контролю якості зборки різьбових з'єднань бурильних труб. Також розроблені і досліджені способи ультразвукового контролю тіла бурильних труб, що дозволяють підвищити чутливість контролю на 8-12 дБ.

6. Створена і рекомендована до серійного виробництва переносна дефектоскопічна установка „Зонд-4”, яка дозволяє проводити контроль якості зборки (діаметрального натягу бурильних труб з кінчними стабілізуючими поясками) і дефектоскопію тіла бурильних труб безпосередньо на буровій.

7. Запропоновані методи і отримані результати можуть бути використані при розробці засобів неруйнівного контролю інших типів труб нафтового сортаменту.

8. Впровадження розроблених засобів забезпечило зменшення аварійності з бурильними трубами і непродуктивного часу роботи бурової, пов'язаного з проведенням дефектоскопії.

Робота виконана в Івано-Франківському інституті нафти і газу.

Захист відбувся 1983 р. на засіданні спеціалізованої вченої ради К 053.27.02 в Московському інституті нафтохімічної і газової промисловості ім.І.М. Губкіна

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент Семенов Георгій Никифорович

Офіційні опоненти: докт. техн. наук, проф. Щербюк М.Д.; канд. техн. наук, доц. Баграмов Р.А.

Провідна установа: Всесоюзний науково-дослідний інститут розробки і експлуатації нафто-промислових труб (ВНИИТнефть).