

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ОЦІНКА ПАРАМЕТРІВ ІМОВІРНІСНОЇ КРИВОЇ МАЛОЦИКЛОВОЇ ВТОМИ ГЕОФІЗИЧНИХ КАБЕЛІВ

В.І.Артим¹, В.В.Гладун², Р.О.Дейнега¹, В.В.Грицив¹

¹ ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 40089, e-mail: viarty@rambler.ru

² Полтавське управління геофізичних робіт, 36007, Полтава, Заводська 16, тел. (0532) 567336, факс (0532) 568621

Роботу присвячено визначенню параметрів ймовірнісної кривої малоциклової втоми геофізичних кабелів. Проведено аналіз аварійності, розроблено методики і засоби дослідження малоциклової довговічності ГФК та аналізу експериментальних результатів, що дають можливість комплексної оцінки довговічності ГФК в малоцикловій області та міцності за однократного навантаження з визначеною ймовірністю неруйнування.

Работа посвящена определению параметров вероятностной кривой малоциклового усталости геофизических кабелей. Проведен анализ аварийности, разработаны методики и средства исследования малоциклового долговечности геофизических кабелей и анализу экспериментальных результатов, которые дают возможность комплексной оценки долговечности геофизических кабелей в малоциклового области и прочности при однократной нагрузке с определенной вероятностью неразрушения.

The work is devoted determination of probabilistic curve's parameters of low-cycle fatigue of geophysical cables. Methods and facilities of low-cycle longevity's research of geophysical cables and analysis of experimental results which enable complex estimation of longevity of geophysical cables in a low-cycle area and durability at the single loading with certain probability of undestruction are developed.

Практика проведення каротажних операцій в нафтових і газових свердловинах свідчить, що під час них відбувається велике число аварій геофізичних кабелів, що призводять іноді навіть до ліквідації свердловин.

Яскравим прикладом надзвичайної важкості аварій при проведенні геофізичних досліджень є ситуація, що склалася під час проведення каротажних робіт на свердловині № 34 Копилівського родовища за допомогою свердловинного приладу із плутоній-берилієвим ДІВ типу ІБН-4.

На свердловині № 34 Копилівського родовища 19 липня 2007 р. проводився комплекс геофізичних досліджень: акустичний каротаж, радіоактивний каротаж (ГК+НГК), радіоактивний каротаж (КНК) в інтервалі 4658-4470 м. Під час проведення цих робіт ускладнення не спостерігалися. Після останнього вимірювання КНК прилад було опущено до глибини 4615 м для виконання контрольного вимірювання. Спочатку спостерігалось затягування і зупинка свердловинного приладу. Сталось зарізання каротажного кабелю в необсадженої похилій частині стовбура свердловини. Необсаджена частина свердловини простягається із глибини 3120 м до 4658 м. Максимальний кут нахилу – 24,50.

Під час узгоджених із БУ „Укрбургаз” і ДП „Полтавське УГР” робіт з ліквідації ускладнення із свердловини було вилучено каротажний кабель і зловлено свердловинний прилад РК-4 із ДІВ. Але при підйомі бурового інструменту із зловленим приладом на глибині 3600 м сталося прихоплення інструменту і в процесі інтен-

сивного промивання свердловини для ліквідації прихоплення, свердловинний прилад було видавлено із ловильного інструменту. В результаті прикладених зусиль по збиттю приладу на вибій свердловини він опустився вниз на глибину 3700 м і знаходиться у великій каверні. У подальшому збити прилад на вибій не вдалося. Бурильний інструмент проходив поряд, не зачіпаючи прилад.

На даний час свердловинний прилад РК-4 із ДІВ знаходиться на глибині 3700 м. ДІВ знаходиться у герметичній сталій камері свердловинного приладу із товщиною стінки 32 мм.

Ловильні роботи тривали 2 місяці, але збити на вибій прилад із ДІВ і зловити його так і не вдалося. В процесі ловильних робіт мали місце прихоплення бурильного інструменту. В результаті опускання технічної колони вона не дійшла до вибою, а в подальшому у свердловині було прихоплено буровий інструмент і назавжди залишено у свердловині.

Нами проаналізовано ускладнення та аварійні ситуації у свердловинах, які сталися у Полтавському управлінні геофізичних робіт за 2003-2008 рр., пов'язані із проходженням геофізичного кабелю або свердловинного приладу. Дані ускладнення було успішно ліквідовано шляхом розходжування і збільшення навантаження на кабель, або пропуску кабелю через інструмент у відкритому стовбурі свердловини, та шляхом розходжування кабелю із збільшенням навантаження і одночасним інтенсивним промиванням свердловини під час прихоплення в НКТ. Всього відбулося 43 аварійних ситуацій, які пов'язані з прихопленням кабелю чи при-



Рисунок 1 – Приклади дефектів кабеля

строю у свердловині. Слід звернути увагу на велику вартість робіт з ліквідації таких ускладнень та тривалі простой в експлуатації свердловин.

Спостереження за експлуатацією кабелів у свердловинах дало змогу виявити дефекти, що скорочують термін служби кабелів. Ці дефекти з'являються як внаслідок порушення технології виготовлення, так і аварійних ситуацій.

До першої групи дефектів відноситься неправильне спаювання ниток жили, що полягає в тому, що замість розосередженого спаювання всі нитки жили спаюються в одному перетині, що, звичайно, у процесі експлуатації призводить до обриву жили в місці спаювання. В інших випадках обрив жил відбувається з причини передавлювання їх недоброякісною пряжею (з вузлами), що прокладається між ізольованими жилами.

До дефектів, що виявляються у процесі експлуатації, можна віднести:

а) утворення «петлі» центральним дротом струмопровідної жили після прихоплення апарату в свердловині; під час ліквідації його довелось давати на кабель розтягуюче зусилля, близьке до розривного. При цьому центральна жила, що має більше залишкове видовження, при різкому зниженні навантаження утворила «петлю»;

б) утворення «петлі» на кабелі у вигляді подовженої спіралі. Петлеутворення відбулося внаслідок неповного зняття залишкового напруження в броні у процесі попередньої деформації, а також внаслідок ослаблення натягу кабелю при його зупинці під час перепускання в свердловину;

в) утворення «скрутин» в процесі переміщення кабелю або при спуску його в свердловину. Це явище можна пояснити тим, що в нитках броні є залишкові напруження і тому кабель має тенденцію до утворення «петлі» (скрутини);

г) знос окремих ниток, які вийшли з верхнього завивання кабелів. Ці нитки стираються об стінки свердловини повністю до обриву раніше інших.

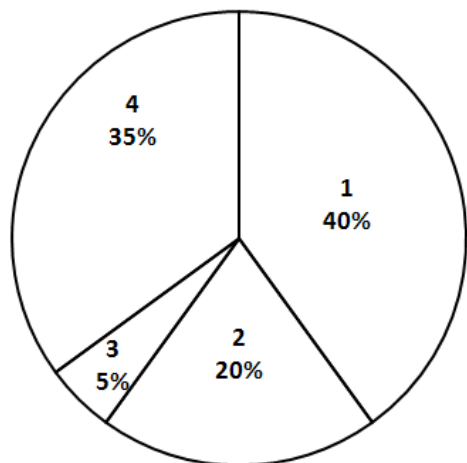
Приклади експлуатаційних дефектів, які появились після аварійних ситуацій, наведено на рис. 1.

Нами також зібрано інформацію про аварії, пов'язані з обривом геофізичного кабелю при проведенні каротажних операцій Полтавським управлінням геофізичних робіт за 2000...2008 роки.

Їх аналіз свідчить, що існуючі методики щодо визначення ресурсу кабелю не дають змоги оцінювати зниження його розривного зусилля при експлуатації. Так, незважаючи на перед-

бачене ослаблення кабелю на наконечнику, 23,9% обривів сталося по живому перерізу при зусиллях, які значно нижчі за нормативні. Це свідчить про необхідність більш ґрунтовного дослідження навантаженості кабелю для визначення закономірностей зниження його міцності в залежності від умов експлуатації.

Процентне співвідношення прихоплень геофізичного кабелю та свердловинних приладів залежно від свердловинних умов проілюстровано на рис. 2.



- 1 – прихоплення кабелю в породі;
- 2 – прихоплення пристрою в породі;
- 3 – прихоплення кабелю в НКТ чи обсадній колоні;
- 4 – прихоплення пристрою в НКТ чи обсадній колоні

Рисунок 2 – Вплив свердловинних умов на прихоплення геофізичного кабелю і пристрою

Залежність кількості прихоплень геофізичного кабелю та свердловинних приладів від глибини свердловин, які знаходяться в бурінні, наведено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Прихоплення геофізичного кабелю та свердловинних приладів відносно глибини свердловин

Інтервал досліджень, м	Кількість досліджень, шт.	Кількість прихоплень, шт.	Імовірність прихоплення
0-1000	81	-	-
1000-2000	90	3	0,03
2000-3000	125	5	0,04
3000-4000	185	10	0,05
4000-5000	202	15	0,07
5000-6000	102	10	0,10

Із збільшенням глибини свердловини різко збільшується імовірність прихоплення кабелю або свердловинного приладу у відкритому стовбурі свердловини.

Така закономірність зберігається і для НКТ.

Причинами прихоплення може бути наявність каверн, жолобів у відкритому стовбурі свердловини, а також похило-спрямованість свердловин. В основному це результат недодержання технології буріння свердловин, неякісних бурових розчинів. В НКТ причинами прихоплення є наявність корозії на внутрішніх стінках НКТ та залишків цементу при установці цементних мостів, а також звужень в місцях скручування НКТ (в муфтах) деформації НКТ, наявність парафінових та смолистих відкладень на стінках НКТ.

Таким чином, аналіз аварійності геофізичних кабелів (ГФК) свідчить про те, що основною причиною руйнування кабелю є прихоплення пристрою під час піднімання його з свердловини. При цьому руйнівне зусилля у більшості випадків є значно меншим за допустиме для кабелю. Цей факт, а також аналіз навантаженості ГФК у процесі спуско-підіймальних операцій (СПО) [1-3], вказує на те, що у ході експлуатації ГФК відбувається накопичення корозійно-втомних пошкоджень обмотки кабелю. У такому випадку прогнозування довговічності ГФК необхідно проводити з урахуванням експлуатаційної навантаженості за методом, який би дав можливість розраховувати накопичене корозійно-втомне пошкодження в умовах комплексної дії циклічних навантажень від низькоамплітудних високочастотних коливань та невеликих зтяжок [1], від циклічних напружень, які виникають у процесі намотування-змотування ГФК на барабан лебідки, а також від значних зтяжок у разі прихоплення пристрою в свердловині.

Особливо аварійно небезпечними є випадки заклинювання пристроїв у свердловині на великій глибині. Під час ліквідації таких ситуацій внаслідок прикладання зусиль, в матеріалі ГФК виникає малоциклова втома. Тому для підвищення надійності проведення СПО під час геофізичних досліджень у свердловинах необхідно враховувати ризики, пов'язані з можливістю обриву кабелю в зоні як однократного, так і малоциклового руйнування. У літературі відсутні дані про параметри опору малоциклової втоми ГФК у найбільш важливій у даному випадку зоні повторно статичного навантажування. Тому завданням наших досліджень є оцінка параметрів опору малоциклової втоми ГФК у випадках повторного статичного навантажування.

Особливу увагу слід звернути на те, що довговічність ГФК, як і інших деталей в умовах втоми, можна оцінювати тільки в імовірнісному трактуванні. Неминуче розсіяння довговічності кабелю пояснюється величезним комплексом як зовнішніх (навантажування, середовище, температура тощо), так і внутрішніх (металургійні, технологічні, конструктивні) випадкових чинників, ще й ускладненим невизначеністю по довжині цього довгомірного об'єкта.

Найчастіше оцінку довговічності деталей в умовах малоциклової і багатоциклової втоми в імовірнісному трактуванні проводять за кривою

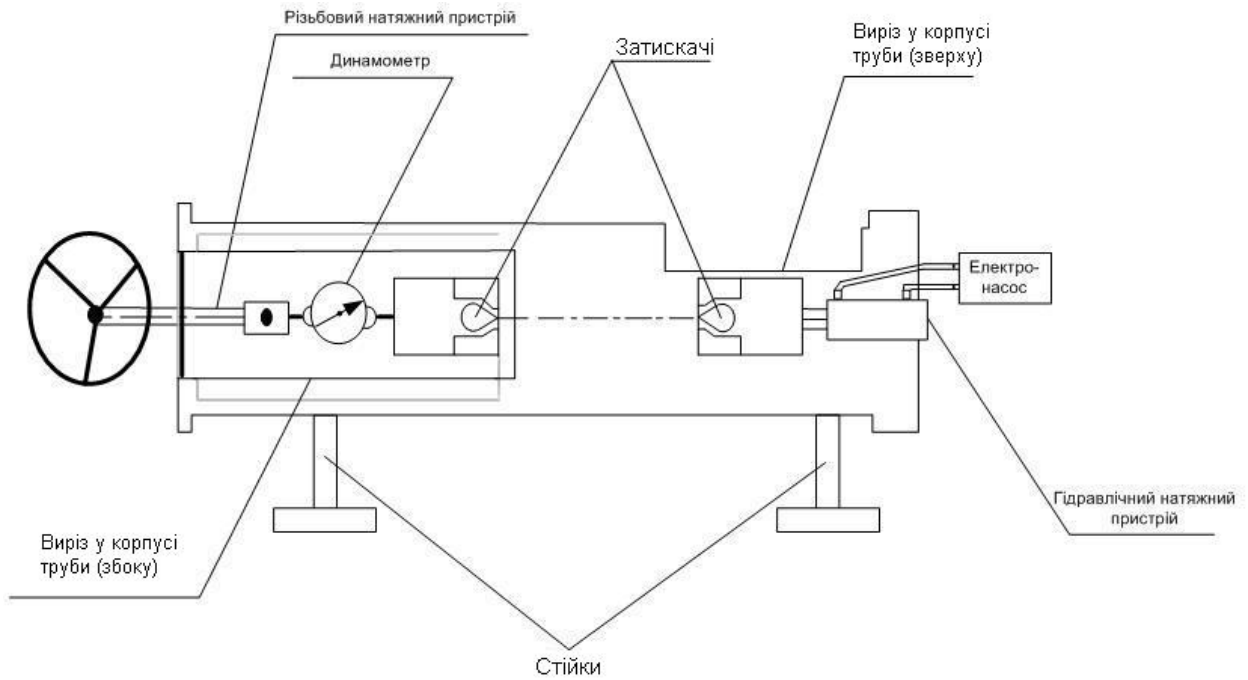


Рисунок 3 – Принципова схема випробної машини для досліджень міцності кабеля

втоми Пальмгрена-Вейбулла [4]. Для цього використовують систему рівнянь

$$\sigma = \sigma_r + b(N + B)^{-a}, \quad (1)$$

де: B, b, a – параметри кривої втоми;

σ_r – границя витривалості.

Проведений аналіз можливості використання рівняння (1) для оцінки довговічності ГФК свідчить, що дані рівняння не дають змоги однозначно трактувати параметри малоциклової кривої втоми в області руйнівних напружень, близьких до границі міцності матеріалу деталі. Тому для оцінки довговічності ГФК, для якого міцність під час затягування має вирішальне значення, необхідно використовувати рівняння кривої малоциклової втоми, в якому було б узгодження з імовірнісними характеристиками статичної міцності матеріалу, в нашому випадку – з розкидом значень розривного зусилля ГФК.

Такий умові задовольняє рівняння малоциклової кривої втоми, розроблене Є.К.Почтенним [5]. Рівняння має вигляд:

$$\sigma = \sigma_e - V \log\left(\frac{N}{H} + 1\right), \quad (2)$$

де: σ_e – границя міцності з імовірністю неруйнування R ;

V – параметр, який характеризує кут нахилу нижньої гілки кривої малоциклової втоми;

H – параметр, який визначає кількість циклів навантаження до точки верхнього перегину кривої малоциклової втоми.

Методику визначення імовірнісних параметрів кривої втоми у вигляді (2) за експериментальними результатами наведено в праці [6]. Особливістю методики [6] є використання гіпо-

тези про паралельність імовірнісних кривих малоциклової втоми, тобто про постійність параметра V .

Для ГФК, як навантажувальний чинник замість, напружень доцільно використовувати зусилля розтягу P . Тоді рівняння кривої малоциклової втоми (2) в імовірнісному трактуванні [5] матиме вигляд:

$$P = P_{pR} - V_R \log\left(\frac{N}{H_R} + 1\right), \quad (3)$$

де: P_{pR} – руйнівне зусилля розтягу за однократного навантаження з імовірністю неруйнування R ;

H_R, V_R – значення параметрів H і V з імовірністю неруйнування R .

Нами проведено експериментальні дослідження статичної і малоциклової міцності при розтягу кабеля КГ-1-27-150. Для випробувань було удосконалено випробну машину для досліджень міцності кабеля [7]. Схему удосконаленої випробної машини для досліджень кабеля на міцність та малоциклову довговічність наведено на рис. 3.

Загальний вигляд випробної машини зображено на рис. 4, її основних вузлів – на рис. 5.

Методика досліджень полягала у наступному. Дослідний зразок кабеля визначеної довжини (2...3 м) закріплюють в затискачах. Необхідною умовою отримання адекватних результатів у ході випробувань на розтяг є попередження руйнування в місцях кріплення зразка. Для чого розроблено спеціальну конструкцію затискачів, яка запобігає концентрації напружень в місцях кріплення кабеля (див. рис. 5, а).



Рисунок 4 – Загальний вигляд випробної машини для дослідження міцності кабеля



а



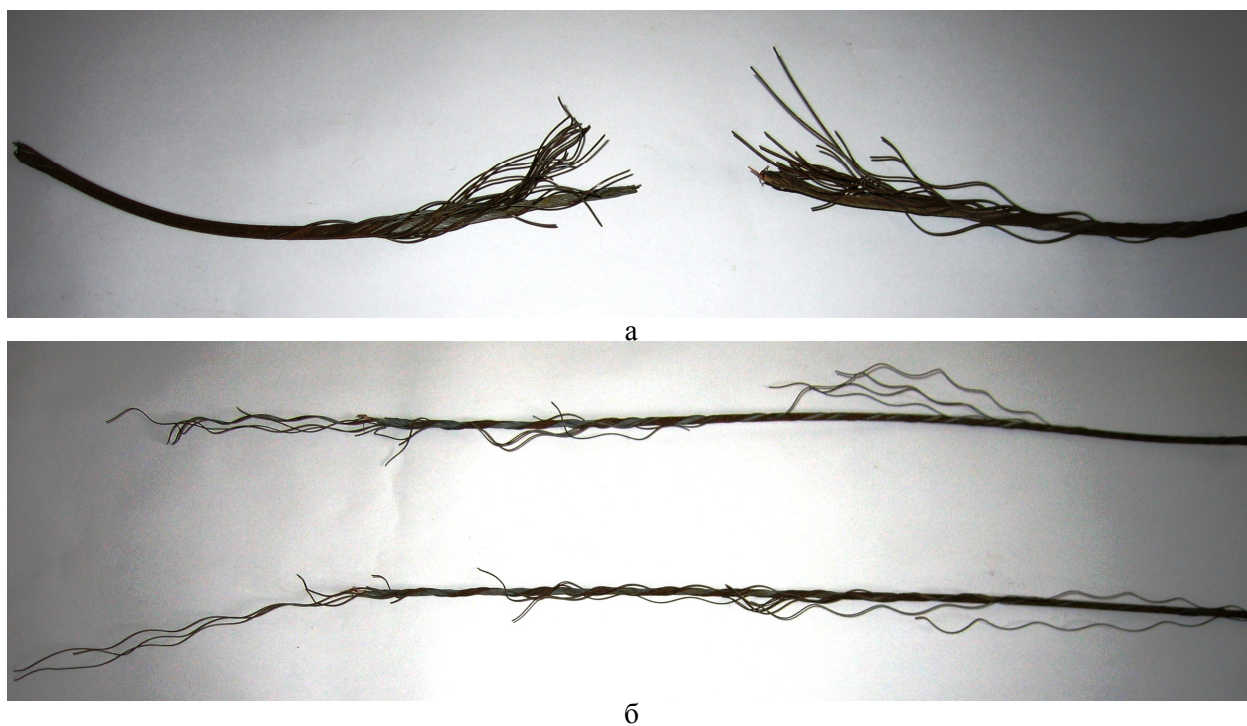
б



в

а) затискач; б) навантажувальний вузол (гідроциліндр); в) електронасос НЕЕ-0,8 I 10 Ф1

Рисунок 5 – Загальний вигляд основних вузлів випробної машини для дослідження міцності кабеля



а – однократне навантаження; б – малоциклове навантаження

Рисунок 6 – Характер зламу ГФК

Навантажувальним вузлом випробної машини є гідроциліндр двосторонньої дії (рис. 5, б) з максимальним зусиллям натягу 100 кН. Таке зусилля дає змогу проводити дослідження геофізичних кабелів усіх типорозмірів. Тиск на гідроциліндр подається за допомогою електронасоса НЕЕ-0,8 І 10 Ф1 (рис. 5, в). Система “насос-гідроциліндр” оснащена регульованими перепускними клапанами і лічильником їх спрацювань, які дають можливість в автоматичному режимі проводити випробування під дією пульсуючого навантаження, а за необхідності – і при циклічному розтягу з визначеним коефіцієнтом асиметрії.

За результатами експерименту визначено необхідні для побудови імовірнісних кривих малоциклової втоми параметри.

По-перше, для оцінки середнього значення \overline{P}_p та середньоквадратичного відхилення (СКВ) руйнівного зусилля за однократного навантаження S_p було розірвано 50 зразків кабеля.

Отримано значення $\overline{P}_p = 27,32$ кН, $S_p = 1,2$ кН. Результати експерименту було проаналізовано за критеріями Пірсона і Романовського. Результати аналізу свідчать на користь гіпотези про нормальний розподіл руйнівного зусилля при однократному навантаженні кабеля.

За відомими значеннями за рівнянням (3) \overline{P}_p і S_p , визначаємо руйнівне зусилля розтягу за однократного навантаження з імовірністю неруйнування R

$$P_{pR} = \overline{P}_p - K_1 S_p, \quad (4)$$

де K_1 – множник для визначення толерантних границь, який залежить від кількості експериментів, імовірності неруйнування і довірчої імовірності.

По-друге, циклічним пульсуючим навантаженням на чотирьох рівнях (20, 22,5, 25 і 26 кН) було зруйновано 60 зразків кабеля (по 15 на кожному рівні).

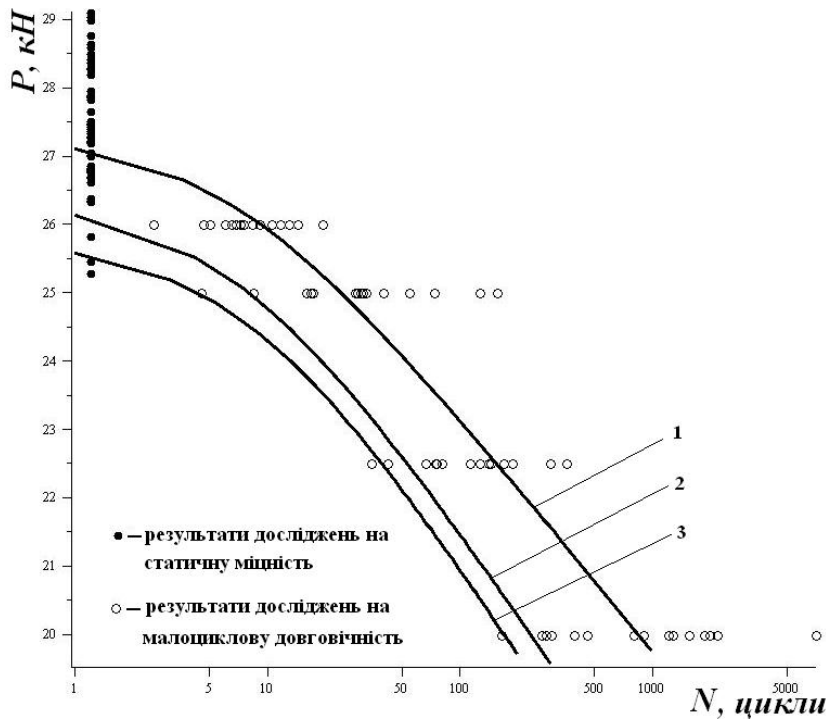
Зазначено різний характер руйнування кабеля за однократного і малоциклового навантажень (див. рис. 6). Так, якщо за однократного навантаження обрив усіх дротин кабеля відбувався щоразу в одному перерізі (рис. 6, а), то при малоцикловому навантаженні зона руйнування сягала кількох десятків сантиметрів (рис. 6, б).

Результати експериментів зображено на рис. 7.

Імовірнісні параметри кривої малоциклової втоми визначали за такою методикою.

Проведено статистичний аналіз експериментальних даних розкиду довговічності на кожному рівні навантаження, який засвідчив можливість використання логнормального закону розподілу довговічності. На всіх рівнях визначено параметри логнормального розподілу: медіанну довговічність та СКВ. Аналогічно (4), визначено довговічності з різною імовірністю неруйнування.

За методом найменших квадратів з допомогою комп'ютерного моделювання в середовищі *Maple* визначено параметри рівняння (3) з різною імовірністю неруйнування (табл. 2) та побудовано відповідні імовірнісні криві малоциклової втоми (див. рис. 7).



1 – медіанна крива малоциклової втоми; 2 – крива за імовірності неруйнування 0,9;
3 – крива за імовірності неруйнування 0,95

Рисунок 7 – Залежності малоциклової довговічності від циклічного пульсуючого зусилля розтягу для кабеля КГ-1-27-150 за різної імовірності неруйнування

Таблиця 2 – Параметри рівняння кривої малоциклової втоми (3)

Імовірність неруйнування R	P_p , кН	V , кН	H
0,5	27,32	1,5	6,5
0,9	26,74	1,8	7,1
0,95	25,78	1,9	8,5

Результати свідчать про чутливість параметра V від імовірності неруйнування. Це означає, що гіпотеза про паралельність імовірнісних кривих малоциклової втоми в даному випадку не справджується.

Таким чином, розроблено методики і засоби дослідження малоциклової довговічності ГФК та аналізу експериментальних результатів, які дають можливість комплексної оцінки довговічності ГФК в малоцикловій області та міцності за однократного навантаження з визначеною імовірністю неруйнування.

Розраховані параметри можуть слугувати базою для оцінки та зменшення ризику обриву кабеля у ході ліквідації прихоплень приладів у свердловинах.

Література

1 Каротажна тензометрична реєструюча система КТРС-10М / Артим В.І., Гладун В.В., Нейдлін Г.С., та ін. // Нафта і газ України. Матеріали 8-ї Міжнародної науково-практичної конференції „Нафта і газ України – 2004” у 2-х т. – Л.: „Центр Європи”, 2004. – Т. 1. – С. 304.

2 Особливості навантажування каротажних кабель-канатів в необсаджених свердловинах / В.В. Гладун, В.І. Артим, С.М. Януш // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2005. – № 3. – С. 59-63.

3 Малько Б.Д. Динамічні процеси в геофізичному кабелі при підйманні контейнера з апаратурою із свердловини / Богдан Малько, Володимир Гладун // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2007. – № 3 (24). – С. 97-101.

4 Когаев В.П. Прочность и износостойкость деталей машин / В.П. Когаев, Ю.И. Дроздов – М.: Высшая школа, 1991. – 318 с.

5 Почтенный Е.К. Прогнозирование долговечности и динамика усталости деталей машин / Е.Почтенный – Мн.: Наука и техника. – 1983. – 245 с.

6 Бабицкий М.С. Экспериментальная оценка малоциклової прочності деталей типа закрытых по концам труб: автореф. дисс. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук.: спец. 161 "машиноведение и детали машин" / Бабицкий Марат Станиславович; академия наук БССР, отделение физико-технических наук. – Минск, 1970. – 21 с.

7 Гладун В.В. Спосіб зрощування частин геофізичних кабелів для подовження їх ресурсу / Володимир Гладун // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2007. – № 1. – С. 136-140.

Стаття поступила в редакційну колегію
6.05.09

Рекомендована до друку професором
Івасівим В.М.