

УДК 622.24.053

# ІНДИКАТОРИ КОНТРОЛЮ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ЕЛЕМЕНТІВ БУРИЛЬНОЇ КОЛОНИ

**А. П. Джус**

Кандидат технічних наук, доцент  
Кафедра нафтогазового обладнання  
Національний технічний університет нафти і газу  
вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Україна,  
76019

Контактний тел.: 098-959-45-05

E-mail: andriy\_dzhus@i.ua

**О. М. Лисканич**

Провідний інженер  
Науково-виробнича фірма «Еквідко»  
вул. Шашкевича, 4, офіс 5, м. Івано-Франківськ,  
Україна, 76000

Контактний тел.: 095-319-25-59

E-mail: olyskeynych@rambler.ru

*У статті запропоновано оптимальну конструкцію індикаторів контролю замкових різьбових з'єднань, для яких встановлено характеристики опору втомі та залежності напружень в небезпечному перерізі індикатора від згинальних навантажень на різьбові з'єднання бурильної колони*

**Ключові слова:** індикатор контролю, замкове різьбове з'єднання

*В статті предложена оптимальная конструкция индикаторов контроля замковых резьбовых соединений, для которых установлены характеристики сопротивления усталости и зависимости напряжений в опасном сечении индикатора от изгибающих нагрузок на резьбовые соединения буровой колонны*

**Ключевые слова:** индикатор контроля, замковое резьбовое соединение

*The paper proposes an optimal design of indicators for monitoring locking threaded connections, which established the characteristics of fatigue resistance, and voltage dependence in a dangerous section of the display of the bending loads on the drill string threaded connections*

**Keywords:** control indicator, castle screw connections

## 1. Вступ

Ефективним резервом зменшення матеріальних витрат у процесі буріння свердловин є раціональна експлуатація бурильної колони, що забезпечує, з одного боку, безаварійну її роботу, а, з іншого, – найповніше використання закладеного в її конструкцію ресурсу.

Здійснення прогностичної оцінки довговічності бурильної колони безпосередньо пов'язане з визначенням кількісних характеристик експлуатаційного навантаження на різьбові з'єднання при бурінні свердловини.

## 2. Аналіз літературних даних та постановка задачі

Питанням вивчення умов роботи нарізних труб нафтового сортаменту, характеру і причин відмов елементів трубних колон, розробки їх нових конструкцій присвячено багато праць вітчизняних та зарубіжних вчених [1, 2, 3]. В результаті їх аналізу встановлено, що визначальним для забезпечення надійності бурильної колони є визначення величини і характеру розподілу навантажень, що діють на елементи бурильної колони у процесі спорудження свердловин і залежать від стану стовбура свердловини, інтенсивності його викривлення, властивостей пробурюваних порід, режиму буріння тощо.

У зв'язку із дією на бурильну колону широкого спектру циклічних навантажень, визначені розрахунковим методом показники довговічності її елементів є недостатньо точними. Одними з перспективних і

прийнятних у цьому випадку методів прогнозування довговічності є методи, які базуються на використанні таких засобів оцінки рівня навантажень, як індикатори [4, 5].

Використання індикаторів можливе у двох режимах. Першим варіантом є постійне супроводження і контроль за станом індикатора довговічності контрольованого об'єкта. Другим варіантом є зняття за допомогою індикатора даних про рівень навантаженості супроводжуваного елемента, за яким відтак розраховується залишковий ресурс останнього. Саме цей варіант є більш доцільним при контролі прогнозованої довговічності елементів бурильної колони.

Для отримання з допомогою індикаторів достовірної інформації про рівень навантаженості супроводжуваних ними елементів, потрібно провести дослідження, спрямовані на вивчення напруженого стану індикаторів за умов дії ряду експлуатаційних чинників. Також здійснити на достатньому теоретичному та експериментальному рівні обґрунтування удосконалених методів визначення втомних характеристик індикаторів і застосування їх у промислових умовах.

## 3. Опис вирішення задачі

В ході теоретичних досліджень проведено обґрунтування моделі напружено-деформованого стану індикаторів шляхом аналізу впливу конструктивних особливостей на їх напружений стан в згинчену замковому різьбовому з'єднанні та оцінки закономір-

ностей контактної взаємодії пари індикатор – ніпель різьбового з'єднання.

Дослідження напруженого стану об'єктів із декількох елементів, що утворюють цілісну конструкцію після взаємної деформації деяких із них, є дуже складним завданням. Його розв'язання шляхом моделювання вимагає наявності значних потужностей використаної техніки та подальшої експериментальної перевірки отриманих результатів. Саме такою є конструкція різьбового з'єднання, що містить індикатор.

З метою спрощення цієї проблеми та забезпечення вірності результатів розв'язку попередньо проведено теоретичні дослідження існуючого аналога індикатора [4]. Для нього взаємодію із елементами різьбового з'єднання замінено сукупністю діючих навантажень та обмежень переміщень. Беручи до уваги конструкцію індикатора, попередньо здійснено дослідження впливу його конструктивних особливостей на напружений стан в перерізах концентратора напружень.

Результати досліджень засвідчили, що при проектуванні оптимальної конструкції індикатора необхідно врахувати, як вплив умов його контакту з внутрішньою поверхнею ніпеля різьбового з'єднання, так і особливості формування його напружено-деформованого стану під дією зовнішніх навантажень.

Таким чином, за результатами теоретичних досліджень розроблена комп'ютерна модель індикатора, яка завдяки співвідношенню конструктивних розмірів забезпечуватиме напруження в безпечному перерізі індикатора на рівні напружень небезпечного перерізу самого різьбового з'єднання.

З використанням програмного продукту ANSYS отримана картина розподілу еквівалентних та осьових напружень для існуючих конструкцій індикаторів. Враховуючи результати теоретичних досліджень та комп'ютерного моделювання розроблена оптимальна конструкція індикатора.

Під час перевірки поставлених до конструкції індикатора вимог, особливо увагу приділено визначенню оптимального розташування ділянки контакту індикатор – ніпель з метою досягнення в безпечному перерізі індикатора напружень того ж рівня, що і в безпечному перерізі різьбового з'єднання. Визначаль-

ним при формуванні напруженого стану індикатора, вмонтованого в замковому різьбовому з'єднанні, є навантаження, з яким різьбове з'єднання діє на нього внаслідок радіальної деформації внутрішньої поверхні ніпеля. Величина діючого навантаження залежить як від конструктивних, так і експлуатаційних чинників. Що стосується конструктивного чинника, то він визначається параметрами індикатора. Експлуатаційним чинником, що визначає рівень зовнішнього навантаження на індикатор, є момент згвинчування замкового з'єднання. Зважаючи на те, що діапазон оптимальних моментів згвинчування визначається з умов міцності замкових різьбових з'єднань, вплив зазору в парі індикатор – ніпель на напружений стан в перерізах, близьких до концентратора напружень, досліджено за оптимальних моментів згвинчування.

За результатами досліджень моделі запропонованої конструкції індикатора для випадків виконання його з різними за величиною зовнішніми діаметрами контактуючої поверхні встановлено залежності напружень в околі концентратора від величини зазору для замкових різьбових з'єднань різних типорозмірів. Приклад такої залежності наведений для замкового різьбового з'єднання 3-121 при згвинчуванні його з моментом  $M_{згв}=18 \text{ кН}\cdot\text{м}$  (рис. 1).

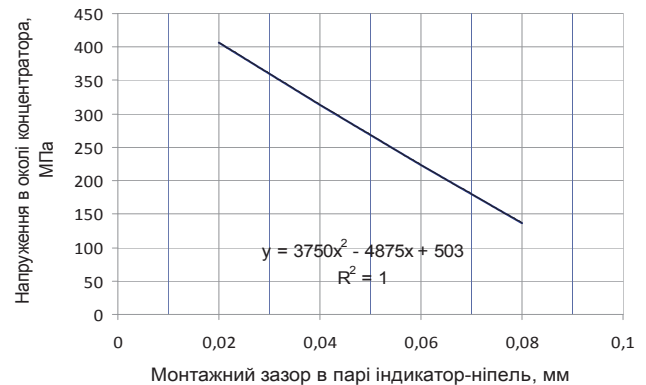


Рис. 1. Залежність напружень в околі концентратора індикатора від зазору в парі індикатор – ніпель до згвинчування з'єднання

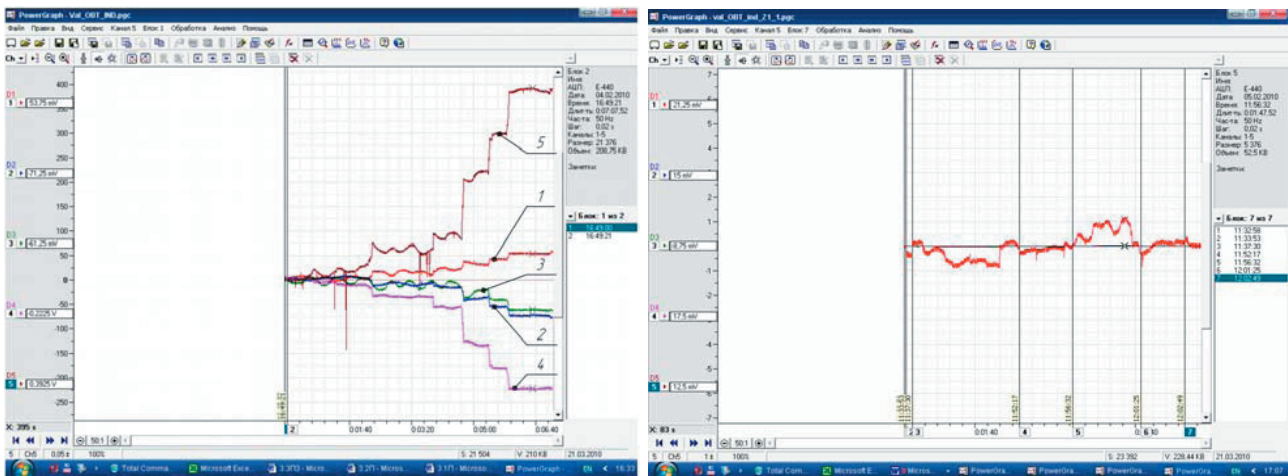


Рис. 2. Дослідження залежності напруженого стану індикатора в замковому різьбовому з'єднанні 3-121 від моменту згвинчування (а) та моменту згину (б): 1, 2, 3 – давачі осьових деформацій; 4, 5 – давачі колових деформацій

Результати експериментальних досліджень замкових різбових з'єднань 3-121 зафіксували сприйняття індикатором навантажень зумовлених як згинчуванням (рис. 2а), так і наступним згинанням (рис. 2б) різбового з'єднання. Цим самим підтвердили з точністю до 10% результати теоретичних досліджень та достовірність оцінки напружено-деформованого стану індикаторів замкових різбових з'єднань на основі їх тривимірної моделі [6].

Таким чином на основі проведених досліджень розроблено індикатор, конструкція якого з достатньою точністю відтворює картину напруженого стану небезпечного перерізу замкового різбового з'єднання за умов дії зовнішніх силових чинників.

З метою визначення параметрів опору втомному руйнуванню індикаторів при їх випробуванні в режимі напружень, що виникають під час експлуатації в свердловинах, розроблено конструкцію пристрою та підтверджена його працездатність.

Для дослідження втомних характеристик індикаторів розроблена спеціальна їх конструкція, проілюстрована прикладом індикатора для різбового з'єднання 3-121 обважнених бурових труб діаметром 146 мм (рис. 3).

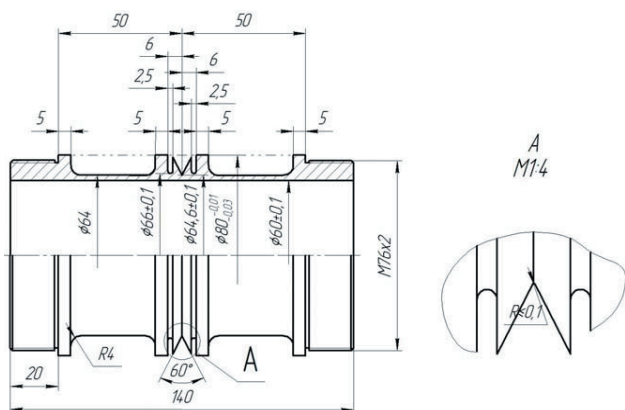


Рис. 3. Конструкція зразка індикатора різбового з'єднання 3-121 для випробування на опір втомі



Рис. 4. Загальний вигляд вузла навантажування

Випробування на опір втомі проводилися на верстаті 1К62 з допомогою розробленого вузла навантажування (рис. 4) при використанні спеціального пристрою цангового типу. Завдяки цьому випробування здійснювались за умови асиметричного на-

вантажування знакозмінним моментом згину на достатній в статистичному аспекті кількості зразків індикаторів.

За результатами випробування індикаторів, розроблених для різбових з'єднань обважнених бурових труб, виготовлених у відповідності до ГОСТ 5286-85, визначені їх характеристики опору втомі (табл. 1).

Таблиця 1

Характеристики опору втомі індикаторів

Типорозмір індикатора	Замкова різьба	Границя витривалості $\sigma_{-1}$ , МПа	$N_0$ , млн. цикл	K	m	A	Кількість зразків
ІК-146	3-121	20,2	2,9	11,976	4,9313	97,596	9
ІК-178	3-147	18,6	4,0	10,434	5,1197	87,484	7
ІК-203	3-171	17,8	5,0	9,7	5,2935	82,78	7

На основі отриманих характеристик опору втомі індикаторів та залежностей напружень в небезпечному перерізі індикатора від згинальних навантажень на різбові з'єднання, є можливим визначення еквівалентної навантаженості елементів низу бурової колони в експлуатаційних умовах.

На основі методу „доламування” [7] запропоновано методику оцінки навантаженості різбових з'єднань обважнених бурових труб, що підвищує вірогідність визначення за допомогою індикаторів їх залишкової довговічності в конкретних умовах проводки свердловин.

Для включення індикатора до складу низу бурової колони використовується перехідник з різбовими частинами, що відповідають типорозміру відповідних обважнених бурових труб (рис. 5).

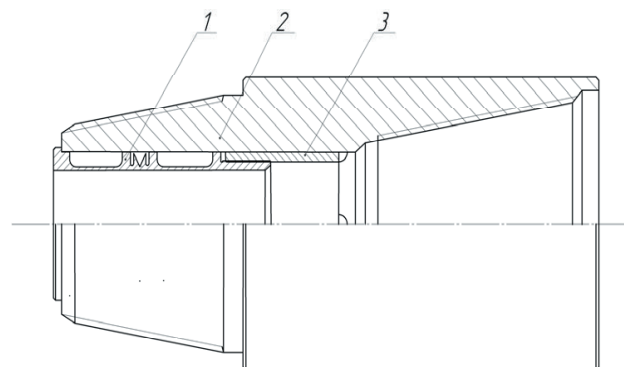


Рис. 5. Перехідник з індикатором: 1 – індикатор; 2 – перехідник; 3 – монтажна втулка

Індикатор встановлюється в перехіднику до контакту виступа в торець ніпеля, і різбове з'єднання згинчується з оптимальним моментом. При цьому відбувається радіальна деформація ніпеля різбової ділянки з'єднання, і при заданих зазорах забезпечується деформація ніпелем зовнішньої поверхні товстостінних елементів індикатора. Завдяки цьому кільцева виточка сприймає зовнішні навантаження, що діють на різбове з'єднання.

Після встановлення індикатора в різьбове з'єднання обважнених бурових труб забезпечується його відпрацювання в експлуатаційних умовах до необхідного числа циклів навантажування  $n_n$ . Довговічність, розрахована методом „доламування” є достатньо точною у випадку попереднього напрацювання до 30% загальної довговічності. Оскільки нас цікавлять навантаження, які зумовлюють в індикаторі напруження, більші за його границю витривалості, то максимальне необхідне число циклів навантажування  $n_n$  в експлуатаційних умовах становить для ІК-146 0,87 млн. циклів, ІК-178 – 1,2 млн. циклів, ІК-203 – 1,5 млн. циклів.

За наявності необхідної інформації оптимальні значення числа циклів напрацювання в експлуатаційних умовах визначаються за методикою визначення навантажень, які діють на елементи низу бурової колони внаслідок її просторової деформації в пробуреному стовбурі і різноманітних коливань. Рівень визначених аналітичним шляхом навантажень може бути заниженим, тому встановлення періоду попереднього напрацювання індикатора на основі аналітично визначених навантажень призведе до збільшення  $n_n$ , що є позитивним в даному випадку.

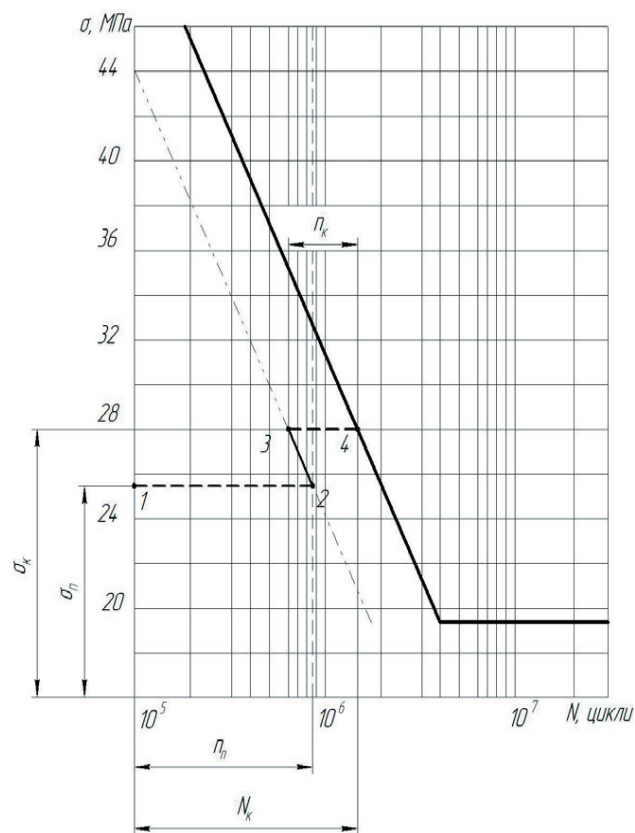


Рис. 6. Схема методу оцінки навантаженості індикаторів

Вийнявши індикатор із різьбового з'єднання при черговому підйманні бурового інструменту, його піддають випробуванню до зруйнування в стендових умовах за навантаження, що забезпечує виникнення в безпечному перерізі напружень згину  $\sigma_k$ . Індикатор доводять до втомного руйнування із фіксацією числа циклів навантажування  $n_k$ . За наявності

величин параметрів  $n_n$ ,  $n_k$ ,  $\sigma_k$  та кривої втомі індикатора, можливим стає визначення еквівалентного експлуатаційного навантаження, що діє на індикатор в умовах свердловини за схемою поданою на рис. 6. Відклавши число циклів  $n_k$  напрацьованих індикатором при навантаженні, що відповідає напруженню  $\sigma_k$  від лівої частини кривої втомі і провівши через цю точку пряму, паралельну даній частині кривої, отримаємо (при фіксуванні на ній числа циклів  $n_n$  навантажування в експлуатаційних умовах) точку, яка визначає рівень еквівалентних напружень, що виникають в індикаторі в умовах свердловини.

Для аналітичного опису використано рівняння лівої частини кривої втомі, яка в напівлогарифмічній системі координат зображена прямою лінією. Згідно зі схемою, наведеною на рис. 6, для ділянки 2 - 3, яка є паралельною лівій частині кривої втомі, справедлива рівність:

$$\sigma_n + K \cdot \lg n_n = \sigma_k + K \cdot \lg(N_k - n_k), \quad (1)$$

де  $\sigma_n$  – еквівалентна амплітуда напружень в експлуатаційних умовах, МПа;  $n_n$  – еквівалентне число циклів навантажування в експлуатаційних умовах, млн. цикл;  $\sigma_k$  – амплітуда напружень при доламуванні в стендових умовах, МПа;  $N_k$  – число циклів до руйнування при амплітуді напружень  $\sigma_k$ , млн. цикл;  $n_k$  – число циклів навантажування в стендових умовах до руйнування зразка за амплітуди напружень  $\sigma_k$  в процесі доламування, млн. цикл.

Еквівалентні напруження, що виникають в індикаторі в умовах свердловини, визначатимуться за формулою:

$$\sigma_{\text{екв}}^{\text{зг}} = \sigma_k + K \cdot \lg \frac{(N_k - n_k)}{n_n}, \text{ МПа.} \quad (2)$$

Для спрощення системи користування розробленою методикою вираз (2) записано з використанням характеристик опору втомі індикаторів

$$\sigma_{\text{екв}}^{\text{зг}} = \sigma_k + K \cdot \lg \left( 10^{\frac{\Lambda - \sigma_k}{K}} - n_k \right) / n_n, \text{ при } n_k < N_k,$$

$$\sigma_{\text{екв}}^{\text{зг}} < \sigma_{-1} \text{ при } n_k \geq N_k. \quad (3)$$

За залежністю напружень згину від згинального навантаження, отриманою на основі досліджень моделей індикаторів, визначається рівень еквівалентних згинальних навантажень, що діють на контрольовані замкові різьбові з'єднання обважнених бурових труб в експлуатаційних умовах. Залежність має такий вигляд:

$$M_{\text{екв}}^{\text{зг}} = a \sigma_{\text{екв}}^{\text{зг}}, \text{ кН·м,} \quad (4)$$

де  $a$  – експериментально визначений коефіцієнт, який для замкового різьбового з'єднання 3-121 становить  $a=0,514$ , для 3-147  $a=0,929$ , для 3-171  $a=1,395$ ,  $\sigma_{\text{екв}}^{\text{зг}}$  – еквівалентні напруження,

що виникають в індикаторі в умовах свердловини, МПа.

Використовуючи отримані значення згинального навантаження  $M_{\text{екв}}^{\text{зг}}$ , середній ресурс  $T$  роботи замкових різьбових з'єднань обважнених бурильних труб в конкретних умовах буріння свердловин визначається за формулою:

$$T = \frac{M_{-1}^m \cdot N_0}{(M_{\text{екв}}^{\text{зг}})^m \cdot n \cdot 60}, \text{ год}, \quad (5)$$

де  $M_{-1}^m$  – значення границі витривалості різьбового з'єднання, що визначається амплітудою циклічного згинального моменту, кН·м;

$N_0$  – абсциса точки перегину на кривій втоми замкових різьбових з'єднань обважнених бурильних труб, цикл.;  $n$  – середня частота обертання стола ротора, об/хв.;

$m$  – показник нахилу кривої втоми замкових різьбових з'єднань обважнених бурильних труб.

У випадку експлуатації обважнених бурильних труб за умов дії навантажень менших їх границі витривалості ресурс роботи визначається за критерієм зношування.

#### 4. Висновки

На основі комп'ютерної тривимірної моделі індикаторів та аналітичного дослідження впливу на напруження в небезпечному перерізі індикатора його конструктивних параметрів та особливостей контакту пари індикатор – ніпель, розроблено оптимальну конструкцію індикаторів та встановлені співвідношення між напруженим станом в перерізах індикаторів і зовнішнім навантаженням, що діє на замкові різьбові з'єднання бурильної колони.

Обґрунтовано методику визначення параметрів втомного руйнування індикаторів під час їх випробування на втому без закріплення у відповідних замкових різьбових з'єднаннях при напруженнях, що виникають в експлуатаційних умовах, та отримати криві втоми індикаторів для обважнених бурильних труб діаметрами 146, 178, 203 мм.

Запропоновано методику експериментальної оцінки за допомогою індикатора навантаженості різьбових з'єднань обважнених бурильних труб, що зазнають дії статичних та динамічних навантажень, рівень та характер яких по довжині колони змінюється і залежить від багатьох чинників, яка підвищує оперативність контролю їх залишкової довговічності в конкретних умовах проводки свердловин.

#### Література

1. Мочернюк, Д.Ю. Исследование и расчет резьбовых соединений труб, применяемых в нефтедобывающей промышленности / Д.Ю. Мочернюк. – М. : Недра, 1970. – 126 с.
2. Саркисов, Г.М. Расчеты бурильных и обсадных колонн / Г.М. Саркисов. – М. : Недра, 1971. – 208 с.
3. Сароян, А.Е. Бурильные колонны в глубоком бурении / А.Е. Сароян. – М. : Недра, 1979. – 231 с.
4. Школьник, Л.М. Методика усталостных испытаний / Л.М. Школьник. – М. : Металлургия, 1978. – 302 с.
5. Пат. 62007 Україна, МПК Е 21 В 17/042. Різьбові з'єднання бурильних труб / Лисканич М.В. та ін. ; патентовласник ВАТ «Укрнафта» – № 200605396; заявл. 17.05.2001; опуб. 15.12.2003, Бюл. № 12. – 4с : ил.
6. Пат. 79493 Україна, МПК Е 21 В 17/042. Різьбове з'єднання бурильних труб / Джус А.П. ; патентовласник ІФНТУНГ – № 200605396 ; заявл. 24.03.2005; опуб. 25.06.2007, Бюл. №9. – 4с : ил.
7. Лисканич, М. Експериментальне обґрунтування достовірності результатів теоретичних досліджень напруженого стану індикаторів втоми / Михайло Лисканич, Андрій Джус // Науковий вісник ІФНТУНГ. – 2010. – №2(24). – С. 101-106.