

ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ КРІПЛЕННЯ НАФТОВИХ І ГАЗОВИХ СВЕРДЛОВИН

Я.С.Коцкулич, М.В.Сенюшкович, Б.А.Тершак

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 42153

e-mail: drill@nung.edu.ua

Долговечность крепления буровых скважин определяется продолжительностью безаварийной работы обсадных колонн, а также прочностью и герметичностью заколонного пространства, которое формируется тампонажным камнем. Для решения этих проблем необходимо уточнить величины нагрузок, действующих на обсадные колонны в разные периоды, и, как следствие, скорректировать методику их расчета. Кроме того, необходимо определить свойства тампонажного камня и их изменение в процессе продолжительной эксплуатации буровых скважин.

Тривалість безаварійної експлуатації нафтових і газових свердловин здебільшого залежить від довговічності їх кріплення. На сьогодні при виконанні розрахунків припускається, що механічні характеристики сталі обсадних труб, їх геометричні розміри, коефіцієнти запасу міцності, навантаження, що діють у свердловині, та властивості тампонажного каменя – сталі величини. Це призводить до того, що достовірність розрахунків знижується в міру збільшення терміну служби обсадних колон, внаслідок чого чинні методи їх розрахунку на міцність не забезпечують безаварійної роботи свердловин. Через певний час окремі обсадні колонни виходять з ладу, незважаючи на те, що всі розрахунки виконувались відповідно до вимог чинних нормативних документів. З промислової практики відомо багато випадків, коли обсадна колона, розрахована з достатнім запасом міцності, через певний період експлуатації виходить з ладу під дією різних видів навантажень. Одним з найчастіших видів пошкодження обсадних колон є їх деформування як рівномірним, так і нерівномірним зовнішнім тиском, який створює оточуюче середовище, через певний час після початку експлуатації. Значить, запропоновані методи розрахунку обсадних колон справедливі тільки для початкового періоду експлуатації свердловин. Так авторами [1] проаналізовано 83 випадки змінання обсадних колон в НГВУ “Карадагнафта” республіки Азербайджан. Змінання обсадних колон відбувалось як у зацементованих частинах свердловин, так і вище рівня тампонажного каменя після 10-20 років експлуатації свердловин. У 80-ти випадках змінання обсадних колон відбулось в інтервалах залягання глинистих порід і тільки у 3-х випадках – в інтервалах залягання піщаних відкладів. На думку авторів, головна причина змінання обсадних колон – зміна напруженого стану відкладів, схильних до пластичного переміщення, що призводить до збільшення гірського тиску на обсадні колонни.

Casing durability is determined by duration of trouble-free running of boring casing but also by strength and impermeability of casing string-borehole annuity, formed by the plugging material. For this problem solving there is a need to specify stress values on boring casing in different time-periods and therefore to correct calculation procedure. Furthermore, it is also necessary to specify plugging material qualities and their changes during long-term well operation.

Гоптарьова Н.В. [2] досліджувала змінання обсадних колон на Долинському родовищі (близько 40 випадків), де змінання обсадних колон відбулось у терміни від 2 до 25 років після початку їх експлуатації; на Північно-Долинському родовищі (12 випадків) – змінання від 2 до 15 років з початку експлуатації; на Орів-Уличнянському родовищі (11 випадків) – змінання від 10 до 15 років з початку експлуатації; на Битків-Бабчинському родовищі (14 випадків) – змінання від 5 до 20 років з початку експлуатації. За висновком автора пошкодження обсадних колон відбувалось як у зонах тектонічних порушень, так і у хомогенних відкладах, де вміст галіту складав від 65,3 до 98,8%, а глини – від 1,1% до 29,5%.

Автори [3] досліджували близько 40 випадків порушень обсадних колон в інтервалах залягання соляних відкладів на родовищах України, Росії і Узбекистану. На думку авторів близько 90% усіх відомих пошкоджень могли бути наслідком прояву гірського тиску і реологічних властивостей соляних порід. Інтервал часу, що минув після тампонування колон до їх змінання, знаходиться в межах від декількох діб до декількох місяців. Біля 10% порушень колон відбулось у випадках, коли гірський тиск мав менше значення, ніж сума критичного тиску труб і внутрішнього гідростатичного тиску. Це може бути наслідком нерівномірного навантаження обсадних труб зовнішнім тиском оточуючого середовища.

Мамедовим І.Х. [4] проаналізовані випадки (більше 10) змінання обсадних колон на площах Прип'ятського прогину (Малодушинська, Березівська, Східно-Первомайська, Надвинська, Північно-Надвинська, Осташковичська). Час від закінчення тампонування обсадних колон до початку їх змінання знаходиться в межах від 10 днів до 10 місяців. За висновком автора змінання колон відбувалось в інтервалах залягання соляних відкладів, за рахунок

нерівномірного контакту порід з трубами, що призвело до їх локального навантаження.

Гребенников М.П. [5] досліджував змінання обсадних колон в інтервалах залягання бішофітів на площах “Полтаванафтогазрозвідка”. Змінання обсадних колон відбувалось через 4-5 діб після тампонування. Встановлено, що в інтервалах залягання бішофітового пласта зовнішній тиск може перевищувати геостатичний. Це може бути наслідком збільшення об’єму суміші в гідравлічно замкнутій системі при фазових переходах солі з твердого в рідкий стан. Такі фазові переходи можливі при контакті тампонажного розчину з кристалогідратами бішофіту, внаслідок чого останні розчиняються, збільшуючись в об’ємі.

Відомі також випадки змінання обсадних колон на площах Полтавського ВБР, Хрещищенського ВБР (ДК “Укргазвидобування”), Прилуцького УБР (ВАТ “Укрнафта”) та інших родовищах України.

Із зазначеного вище можна зробити висновок, що за різних умов пошкодження обсадних колон може відбуватись за неоднакової тривалості навантаження (від декількох діб після тампонування колони до декількох десятків років після початку експлуатації свердловини); зовнішній тиск за обсадною колоною може бути як менший, так і більший за величину гірського тиску; навантаження обсадних труб може мати рівномірний і нерівномірний характер. Перелічені чинники, а також зміна властивостей металу обсадних труб і тампонажного каменя визначають довговічність кріплення нафтових і газових свердловин.

Тривала дія на кріплення свердловин в процесі їх експлуатації навантажень, навіть невеликих за абсолютним значенням, може призвести до накопичення пошкоджень, розвитку закладених дефектів та інших небажаних ефектів. Питання деградації матеріалу і, як наслідок, зміни якості кріплення свердловин під дією експлуатаційних навантажень безпосередньо пов’язані з питаннями довговічності елементів конструкції кріплення, під яким розуміють час від моменту прикладання навантаження до моменту втрати основних робочих показників. Для кріплення свердловин – це: втрата герметичності кріплення; втрата початкових геометричних розмірів поперечного січення кріплення; втрата поздовжньої стійкості кріплення; руйнування тампонажного каменя; руйнування з’єднань обсадних труб чи тіла труби; розрив або змінання обсадних труб; негерметичність контактів обсадної колони і тампонажного каменя, тампонажного каменя і гірської породи. Задача ускладнюється тим, що кріплення свердловини часто контактує з агресивним середовищем. Найкращий спосіб оцінки довговічності – це використання експериментальних даних з визначення часу, протягом якого відбувається втрата основних робочих показників при тривалому навантаженні елементів конструкції.

Однак на сьогодні відсутні статистичні показники не тільки для оцінки однієї з найоб’єктивніших характеристик довговічності –

функції розподілу, але й для більшості матеріалів, що використовуються для створення кріплення свердловин, практично відсутні експериментальні матеріали з їх довговічності. Отримання таких даних ускладнюється з тієї причини, що для формування тампонажного каменя використовується велика кількість різних тампонажних матеріалів. Необхідно зауважити, що навіть за наявності експериментальних даних з довговічності виникає необхідність їх апроксимації аналітичними залежностями. Такі залежності необхідні для задач прогнозування довговічності; для виконання різного роду аналітичних досліджень, зокрема, для вирішення оптимізаційних задач. Крім того, без аналітичних залежностей для оцінки довговічності дуже важко вибрати режими прискорених та еквівалентних випробувань тампонажних матеріалів, камені з яких повинні виконувати задані функції протягом десятків років.

Зазначене підкреслює, наскільки важлива потреба в аналітичних залежностях для оцінки довговічності кріплення свердловин, тому що у багатьох випадках знання лише поведінки кривих довговічності значно спрощує розв’язок перелічених вище задач. За відсутності експериментальних даних з довговічності особливого значення набувають аналітичні залежності, параметри яких мають чіткий фізичний зміст і можуть бути оцінені без застосування тривалих випробувань на довговічність. За таких умов важливе значення мають навіть наближені залежності, якщо вони дозволяють хоча б орієнтовно розрахунковим шляхом оцінити довговічність елементів конструкції. Особливо важливо мати такі залежності на етапі проектування, коли може бути проведений порівняльний аналіз довговічностей елементів конструкцій з різних матеріалів. Оскільки похибки формул приблизно однакові для всіх матеріалів, то завжди можна вибрати матеріал з відносно високою довговічністю. В кінцевому варіанті задачі може бути зведена до того, щоб на стадії проектування оцінити довговічність елементів кріплення свердловин, або вибрати такі допустимі значення навантажень, які забезпечать найтривалішу довговічність конструкції. Для обґрунтування таких залежностей доцільно використовувати окремі фізичні тлумачення процесів накопичення пошкоджень. Можна використати кінетичне рівняння руйнування на основі теоретичних уявлень фізики твердого тіла про елементарні акти руйнування. Однак різноманітність можливих мікромеханізмів руйнування, а також їх недостатня вивченість на сьогодні перешкоджають ефективному вирішенню таких задач. Та все ж, виділяючи загальні закономірності, притаманні конкретним мікромеханізмам руйнування, можна отримати для окремих режимів навантаження кінетичні рівняння процесу руйнування. Зокрема, для описання таких закономірностей можна скористатися термофлуктуаційною теорією, яка успішно застосовується для обґрунтування кінетичної теорії міцності [6].

Суть зазначеної теорії ґрунтується на допущенні того, що руйнування відбувається шляхом послідовного розриву міжатомних зв'язків. Відповідно до цієї теорії визначальну роль в процесі руйнування відіграють теплові флуктації, зумовлені коливним рухом атомів. Швидкість протікання багатьох термофлуктаційних процесів може бути виражена формулою, отриманою С.А.Арреніусом у 1889 р.:

$$v = A \exp\left(-\frac{E}{kT}\right), \quad (1)$$

де: A – постійна, яка характеризує частотний фактор;

E – енергія активації процесу;

k – постійна Л.Больцмана;

T – абсолютна температура.

Наведена формула може бути використана і для визначення часу до руйнування будь-якого матеріалу, якщо відповідним чином виразити енергію активації через прикладне навантаження. Фундаментальні дослідження з обґрунтування термофлуктаційної природи міцності виконані науковцями під керівництвом С.М.Журкова [7]. Запропонована ними залежність часу руйнування зразків, які знаходяться в напруженому стані, від осьового навантаження має такий вигляд:

$$t = \eta_0 \exp\left(\frac{u - \gamma\sigma}{kT}\right), \quad (2)$$

де: η_0 – період теплових коливань атомів;

u – енергія активації руйнування (початковий потенційний бар'єр, який необхідно подолати атомам за відсутності навантаження);

γ – структурно-чуттєвий коефіцієнт, який характеризує ступінь зниження початкового потенційного бар'єру прикладеним навантаженням;

σ – напруження, викликані прикладеним навантаженням.

Залежність (2) в координатах $\ln t < -\sigma$ має прямолінійну залежність, і її часто записують у такому вигляді:

$$t = A \exp(-\alpha\sigma), \quad (3)$$

де: $A = \eta_0 \exp\left(\frac{u}{kT}\right)$; $\alpha = \frac{\gamma}{kT}$.

Залежності, аналогічні (2), були отримані Г.М.Бартенєвим, Б.Я.Пінесом, І.В.Владіміровим, Т.Скоборі та іншими.

Формула (2), названа формулою Журкова, перевірялась для різних матеріалів (металевих і неметалевих) в широкому діапазоні температур ($-196 \div +1200^\circ\text{C}$) і напружень ($2 \div 4000$ МПа) з варіацією часу до руйнування від 10^{-3} до 10^7 с [8]. Однак, як зазначено авторами, формула Журкова за результатами дослідів дає відхилення при оцінці часу до руйнування. Внаслідок цього виникає питання щодо можливості використання цієї теорії для отримання інших аналітичних залежностей, параметри яких мали б такий же чіткий фізичний зміст, як і у виразі (2).

Отримані залежності дали б змогу оцінити потенційну довговічність як окремих елементів кріплення, так і його довговічність в цілому, сформулювати умови, за яких ці залежності можуть бути використані, та встановити випадки, в яких оцінювана довговічність може мати нижню або верхню межу.

Оскільки кріплення свердловин складається з однієї чи декількох обсадних колон і тампонажного каменя, то для точності розв'язку сформульованих вище задач вирішальне значення має оцінка величини критичного тиску обсадних труб, а також ролі та міцнісних показників каменя.

Аналізуючи відомі на сьогодні формули з визначення критичного тиску обсадних труб, можна зробити висновок, що існує два підходи до методики розрахунку. Розрахунки виконують за двома формулами, кожна з яких справедлива в певних межах зміни коефіцієнта стінності (відношення товщини стінки до зовнішнього діаметра труби). Відповідно до величини цього коефіцієнта труби поділяються на тонкостінні, які розраховують на стійкість форми, і на товстостінні, які розраховують на міцність. Такий підхід використано Ф.І.Яковлевим, Д.Ю.Мочернюком та Американським нафтовим інститутом (АНИ). Але, на наш погляд, вадю такого підходу є різкий стрибок від однієї форми опору конструкції до іншої. Кожному переходу відповідає свій коефіцієнт стінності, який називають граничним (k_{gp}). Природно припустити, що поблизу граничної точки і на деякій відстані від неї обидві формули не будуть давати вірогідного результату.

В методиці АНИ використано чотири емпіричні формули замість двох – тобто виникають не одна, а три перехідні точки. Відповідно до цього зменшується помилка в граничних точках, а загальна крива розрахунку більше відповідає результатам випробувань. Однак, як відомо, емпіричні залежності можуть давати надійні результати лише в тих межах, для яких вони вивчені. Цієї вади не повинні мати формули, отримані теоретично. До них належать формули Б.В.Булгакова, Г.М.Саркісова і Т.Ю.Єрьоменка. Отримані рівняння ґрунтуються на принципі незалежності дії сил і поєднують розрахунок труб з відносно великою овальністю на міцність і стійкість форми. Проте, отримати універсальну формулу, яка б описувала два суттєво відмінних процеси – втрату несучої здатності і втрату межі пружної стійкості – практично неможливо. Закон незалежної дії сил, покладений в основу теоретичних формул, не дозволяє отримувати універсальне рішення, яке б точно описувало процес змінання труб від зовнішнього тиску при будь-яких коефіцієнтах стінності.

При використанні двох окремих формул закон незалежної дії сил спрацьовує в чистому вигляді там, де формули дають однакові значення (при коефіцієнті стінності k_{gp}) та виникає різкий перегин, що дає завищені результати в зоні переходу. Виходячи із зазначеного вище і

враховуючи думку Мочернюка Д.Ю. [9], можна зробити висновок, що для розрахунку товстостінних овальних труб доцільно використовувати формулу Г.М.Саркісова, а для товстостінних труб з малою овальністю – класичну формулу Ляме, оскільки вони працюють на несучу здатність. З тієї причини вплив овальності незначний порівняно з іншими недосконаlostями, такими як: різностінність, термічні напруги, неоднорідність структури металу тощо. Для тонкостінних труб, які працюють на стійкість форми, доцільно використовувати формулу С.П.Тимошенка. Однак результати розрахунків за цією формулою дають розбіжність з результатами випробувань в середньому на 10-15%, що може мати згубні наслідки для кріплення свердловин. Тому оцінка критичного тиску тонкостінних обсадних труб та їх поведінки в докритичному стані залишається актуальною задачею.

Одним з найхарактерніших станів навантаженої тонкостінної оболонки є стан переважajúчого стиснення, коли зони стискуючих мембранних напружень займають значну область конструкції. Наявність зон стиснення, особливо в умовах значної неоднорідності напружено-деформованого стану, призводить до розвитку великих прогинів, порушення плавності характеру деформування при збільшенні навантаження, та викликає перехід оболонки до нових, відмінних від початкового, зрівноважених станів. Вивчення подібної поведінки конструкції, оцінка рівнів навантаження, які відповідають за трансформацію картини деформування, формують задачу щодо стійкості оболонки. В загальному випадку зазначена задача має нелінійний характер, розв'язок якої залежить від значення параметра навантаження λ . При значеннях λ , які проходять через критичне значення $\bar{\lambda}$, яке називають точкою розгалуження, розв'язок нелінійної задачі розщеплюється на два або більше розв'язків [10].

При цьому розрізняють точку біфуркації, яка є точкою перетину розв'язків і граничною точкою. Так, наприклад, при $\lambda > \bar{\lambda}$ в околі λ розв'язок відсутній, а при $\lambda < \bar{\lambda}$ існує два розв'язки.

Параметр критичного навантаження можна визначити за формулою П.Ф.Папковича (дія зовнішнього рівномірного тиску)

$$\bar{\lambda} = 0,92E \left(\frac{h}{R} \right)^2 \cdot \frac{R}{L}, \quad (4)$$

де: E – модуль Юнга;
 h – товщина оболонки;
 R – радіус серединної поверхні оболонки;
 L – довжина оболонки.

При дії осьової сили (стиск, розтяг) критичне значення $\bar{\lambda}$ визначають так:

$$\bar{\lambda} = \frac{N}{0,6E \frac{h}{R} \cdot 2\pi Rh}, \quad (5)$$

де N – осьова сила.

Якщо оболонка має еліптичну форму, то замість R підставляють R_0 (R_0 – радіус еквіпериметричного кола).

Залежно від технічних вимог до конструкції, від мети розрахунку і типу деформації предметом розгляду може бути:

- визначення рівня навантажень, які відповідають зміні форм рівноваги – критичних навантажень;

- встановлення нової зрівноваженої форми конструкції – форми випучування;

- визначення границь існування тої чи іншої форми;

- оцінка чутливості конструкції до заданого типу збурення і розрахунок поведінки конструкції при кінцевих збуреннях;

- виявлення всіх можливих рівноважних станів в робочому діапазоні навантажень, оцінка стійкості окремих розгалужень і умов взаємного переходу від одного напружено-деформованого стану до іншого.

Вичерпні відповіді на окреслені проблеми можна отримати, виходячи з аналізу розв'язків повних нелінійних рівнянь. Однак у більшості важливих практичних випадках відпадає потреба у виконанні аналізу розгалужень в повному обсязі, тому у загальному випадку такі задачі поділяють на дві групи:

- особливості докритичного стану;

- характер розгалужуваних розв'язків.

Комбінацією спрощуючих припущень, які відповідають особливостям конструкції, та умовами до розрахунку створюють основу розрахункової схеми задачі стійкості оболонки. Так, при виборі нелінійної моделі вихідного стану особливі точки розв'язків можна визначати безпосередньо з розв'язку задачі про напружено-деформований стан оболонки.

Поведінка оболонки ускладнюється, якщо на неї одночасно діє декілька видів навантажень. Один з найнебезпечніших видів навантажень виникає у випадку, коли на обсадні колоди у свердловинах одночасно діє осьова розтягуюча сила та зовнішній тиск і особливо тоді, коли обсадна труба тонкостінна.

На сьогодні відомо декілька рішень такої задачі, але найпоширенішого використання набуло рішення, що ґрунтується на енергетичній теорії. Справедливо зазначити, що використання цього рішення має певні обмеження.

По-перше, це можливо за умови, що обсадні труби виготовляються з ідеально пластичного матеріалу, у якого яскраво виділяється площада текучості.

По-друге, залежно від величини коефіцієнта стінності суттєво змінюється характер деформування труб при навантаженні. Відносно товстостінні труби працюють в умовах рівномірного розподілу деформацій, тому що після досягнення межі текучості в найслабшому місці поперечного перерізу труби утворюється шарнір пластичності. Тонкостінні труби переважно працюють в області втрати стійкості, а їх матеріал – в зоні пружних деформацій. В усіх випадках деформується конструкція (циліндр), на яку впливають не тільки розміри, але й форма

(початкова овальність, різностінність), неоднорідність механічних властивостей матеріалу та самі властивості.

По-третє, існує обмеження, згідно з яким допускається використання еліпса пластичності побудованого на розв'язку задачі, яке встановлено Губером. Тобто, при розрахунку обсадних труб на двовісне навантаження може бути використана лише та частина кривої, де тангенціальні напруження від зовнішнього тиску залишаються більшими за абсолютною величиною, ніж розтягуючі напруження від осьової сили. Щодо зазначеної проблеми відомі також роботи Вислобіцького П.А., Єрьоменка Т.Ю. та інших науковців, але чинною на сьогодні є методика розрахунку, розроблена НДІ "ВНИИТнефть". Однак, як зазначено в [11], розбіжність між теоретичними розрахунками та експериментальними дослідженнями коливається в межах від +40% до -59,3%, внаслідок чого розрахунки треба визнати дуже наближеними, а проблему — актуальною і надалі.

Іншим важливим чинником, від якого залежить довговічність кріплення свердловин, вважають тампонажний камінь, який заповнює міжколонний та заколонний простори. В роботі [12] подано результати досліджень підкріплюючої дії цементного кільця на опір обсадних труб зовнішньому тискові. Було встановлено, що величина тиску зминання системи "труба-труба" залежить здебільшого від стану цементного кільця у міжтрубному просторі. У випадку, коли цементне кільце має пластичні властивості, воно деформується від деформації зовнішньої обсадної труби, укріплююча дія цементної оболонки порушується і комбінація "труба в трубі" стає нестійкою. І навпаки, якщо цемент не деформується, незважаючи на значну деформацію зовнішньої обсадної труби, комбінація, зазначена вище, буде стійкою. Таким чином, якщо цементний камінь має достатню міцність, то міжтрубний простір залишається без змін і загальна межа міцності системи при цьому збільшується за рахунок високої міцності каменя.

При недостатній міцності цементного каменя початкове зминання зовнішньої обсадної труби призводить до деформації каменя у міжтрубному просторі, а потім – коли досягається величина опору зминання внутрішньої труби – межа міцності на зминання комбінації "труба в трубі" залежить від залишкової міцності зовнішньої труби і міцності внутрішньої труби.

Л.Б.Ізмайловим під час стендових випробувань встановлено, що при дії рівномірного зовнішнього тиску зминаючий тиск для труб з цементною оболонкою набагато більший ніж для таких самих труб без оболонки. Подібні висновки, зроблені А.А.Гайворонським і Г.С.Юзбашевим, свідчать про те, що наявність цементного каменя і оточуючого масиву гірських порід збільшують опір труб зминанню на 20-28%. За наявності глинистої кірки між трубою і цементним каменем збільшення тиску зминання сягає в середньому 12%. Позитивна роль цементного кільця ще більше проявляється у випадку зминання овальних труб з цемент-

ним каменем і оточуючим масивом гірських порід, де фактичний тиск зминання на 70-80% більший, ніж розрахунковий. В той же час, якщо тиск на обсадні труби через цементний камінь передавати рідким середовищам, то опір зминанню не збільшиться.

Роль цементного каменя та його поведінка в реальних умовах може бути визначена з вирішенням таких питань: чи можливе на практиці формування за колоною такого ж цементного каменя, який використовується для проведення експериментальних досліджень і приймається для розв'язку теоретичних задач; зокрема, чи завжди при експлуатації свердловин зберігається щільність контакту між цементною оболонкою і трубою та цементною оболонкою і гірським масивом при різних тисках і температурах, або чи можливе створення за обсадною колоною цементної оболонки високої міцності і без тріщин, яка була б концентрично розташована відносно обсадної колони. Крім того, на сьогодні точно не встановлені пружні константи цементного каменя і міцнісні показники, які змінюються з часом, внаслідок його повзучості в умовах тривалої експлуатації свердловин.

Отже, на підставі викладеного можна зробити висновок, що для вирішення проблем, пов'язаних з формуванням якісного і довговічного кріплення свердловин, необхідно уточнити методику розрахунку обсадних колон на міцність (особливо за наявності гірських порід з реологічними властивостями) та розробити заходи для формування у міжколонному та заколонному просторах надійного ізоляційного екрану з тампонажних матеріалів.

Література

- 1 Назаров И.А., Мамедов Э.А. Наличие пластов глин в разрезах скважин, как один из основных факторов, обуславливающих смятие колонн. // Азербайджанское нефтяное хозяйство. – 1967. – № 8. – С. 19-24.
- 2 Гоптарьова Н.В. Геолого-геофізичні чинники деформаційних процесів природних масивів і експлуатаційних колон свердловин нафтогазових родовищ внутрішньої зони передкарпатського прогину: Дисерт. на здобуття наук. ступеня канд. геологічних наук / ІФНТУНГ. – Івано-Франківськ, 2003. – 178 с.
- 3 Стрелец Г.А. и др. Нарушения обсадных колонн в соленосных отложениях.// Нефтяное хозяйство. – 1970. – № 2. – С. 28-31.
- 4 Мамедов И.Х. и др. Смятие обсадных колонн при проводке скважин в соленосных отложениях // Изв. ВУЗов. Нефть и газ. – 1980. – № 8. – С.23-26.
- 5 Гребенников Н.П. О повреждении обсадных колонн в интервалах залегания соленосных обложений. // РНТС Бурение. – 1972. – № 4. – С.14-18.
- 6 Екобори Т. Физика и механика прочностии и разрушения твердых тел. – М.: Металлургия, 1972. – 264 с.
- 7 Журков С.Н., Томашевский Э.И. Временная зависимость прочности при различных

режимах нагружения / В кн.: Некоторые проблемы прочности твердого тела. – М.: Изд-во АН СССР, 1959. – С.68-76.

8 Гудрамович В.С., Переверзев Е.С. Несущая способность и долговечность элементов конструкций. – Киев: Наукова думка, 1981. – 284 с.

9 Мочернюк Д.Ю. Расчет обсадных труб на сопротивление действию внешнего гидростатического давления и равномерного давления со стороны массива горных пород // Сб. Расчет бурильных и обсадных колонн. – М.: ВНИИОЭНГ, 1971. – С.44-67.

10 Андреев Л.В. и др. Устойчивость оболочек при неосесимметрической деформации. – М.: Наука, 1988. – 208 с.

11 Коцкулич Я.С., Сенюшкович М.В., Тищенко О.В., Наритник І.І. Аналіз методик розрахунку обсадних колон на двовісне навантаження // Науковий вісник ІФНТУНГ. – 2006. – № 1(13). – С.30-34.

12 Burkowsky M., Ott H., Schillinger H., Cemented pipe-in-pipe casing string solve field problems // World Oil. – 1981. – Vol. 19. – № 5. – pp.143-147.