

Литература

9. Волков А. С., Волокитенков А. А. Бурение скважин с обратной циркуляцией промывочной жидкости. – М.: Недра, 1970. – 184 с.
10. Дерусов В. П. Обратная промывка при бурении геологоразведочных скважин. – М.: Недра, 1984. – 184 с.
11. Кардыш В. Г., Кузьмин И. В., Смирнов Ю. Т. Основные направления совершенствования технических средств для бурения с гидротранспортом керна и шлама // Техника и технология бурения с гидротранспортом керна и шлама. – Л.: ВИТР, 1985. – С. 63–64.
12. Бородацкий И. Г. О транспортировании восходящим вертикальным потоком жидкости дробленого керна трещиноватых и слоистых пород // Тр. СКГ НИИ нефтяной промышленности. – Грозный, 1974. – Вып. 31. – С. 18–24.
13. Глухов В. И., Кукес А. И., Петров А. А. Движение керна в восходящем потоке промывочной жидкости // Совершенствование и внедрение технологии промывки и тампонирувания скважин в условиях Восточной Сибири и Крайнего Севера. – М.: ВПО «Союзгеотехника», 1987. – С. 57–65.
14. Методика выбора производительности насоса при бурении с гидротранспортом керна / С. С. Хворостовский, И. С. Хворостовский, А. Ю. Ключников, Е. В. Малинин // Известия ВУЗов. Геология и разведка. – 2001. – № 6. – С. 130–136.
15. Смолдырев А. Е. Гидро- и пневмотранспорт керна по буровым трубам // Изв. вузов. Геология и разведка. – 2002. – № 4. – С. 97–103.
16. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. – М.: Машиностроение, 1992. – 672 с.

Поступила 29.06.12

УДК 622.24

Я. С. Коцкулич, д-р техн. наук; **О. Б. Марцинків**, канд. техн. наук

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Україна

ВПЛИВ ЗГИНУ ОБСАДНИХ ТРУБ НА ЇХ МІЦНІСТЬ ПРИ ДІЇ ЗОВНІШНЬОГО НАДЛИШКОВОГО ТИСКУ

Наведено результати теоретичних досліджень впливу згину обсадної колони на овальність і міцність обсадних труб при дії зовнішнього надлишкового тиску. З використанням напівбезмоментної теорії гнучких оболонок одержано формулу для визначення зовнішнього критичного тиску, що враховує кривизну і зміну поперечного перерізу труби. Порівняно зовнішній критичний тиск прямолінійних труб з отриманими іншими авторами.

Ключові слова: обсадна труба, тиск, згин, напруження.

Для нарощування об'ємів видобування нафти і газу необхідно збільшити обсяги буріння похило-скерованих та горизонтальних свердловин. Кріплення таких свердловин ускладнюється тим, що обсадні колони піддаються спільній дії радіального, осьового та згинаючого навантажень, внаслідок чого вони передчасно виходять з ладу і на їх ремонт необхідно витратити значні кошти, а в окремих випадках свердловини виводять з експлуатації і ліквідовують. В інструкціях з розрахунку обсадних колон на міцність не передбачається враховувати вплив згину обсадних колон у похило-скерованих та горизонтальних свердловинах на міцність труб, а рекомендації, розроблені окремими

авторами, недостатньо аргументовані і їх використання не може забезпечити надійності роботи обсадних колон, що підтверджено промисловими даними. Виходячи з цього, зазначена проблема є актуальною, особливо зважаючи на те, що велику кількість похило-скерованих та горизонтальних свердловин необхідно споруджувати для видобування шахтного метану та сланцевого газу.

Основною характеристикою міцності обсадних труб вважається їх опірність зовнішньому надлишковому тиску, тобто критичний тиск, за якого найбільші напруження в небезпечній точці перерізу труби досягають границі текучості матеріалу труб.

Розрахунок прямолінійної труби в постановці задачі Бернуллі не відрізняється від розрахунку прямолінійного бруса, при складному згинанні, за відомими формулами і методами опору матеріалів. У результаті досліджень здійснених ще на початку минулого століття, встановлено, що труба, з відхиленням поздовжньої осі від прямолінійної має значно меншу жорсткість на згин, ніж аналогічна прямолінійна труба. Це явище першим пояснив Т. Карман, що поклато початок теоретичному дослідженню згину труб з відхиленням поздовжньої осі від прямолінійної з урахуванням впливу деформацій поперечних перерізів [1].

Очевидно, що згин труби з криволінійною поздовжньою віссю на відміну від прямолінійної супроводжується зміною форми поперечних перерізів і напруження, які виникають при цьому, спричиняють сплющення перерізу труби.

Дія згинаючого моменту призводить до збільшення початкової кривизни труби і її круглий переріз перетворюється на овальний, витягнутий у напрямку, перпендикулярному до площини кривизни. Розтягнуті в результаті згину поздовжні волокна зміщуються до центру кривизни поздовжньої осі труби, стиснуті – від її центру. Видовження волокон труби менше, ніж за такої самої кривизни бруса. При цьому не лише знижуються опірність труби згину, тобто підвищується її гнучкість, що впливає на деформацію поперечного перерізу криволінійної труби, але і суттєво змінюється її напружений стан. Описане явище названо ефектом Кармана.

Визначенню критичного зовнішнього тиску для обсадних труб при згині в умовах двовісного (осьового і радіального) навантаження присвячена незначна кількість наукових робіт. Л. Б. Ізмайловим і В. М. Кокаєвим [2] розв'язана така задача з використанням критерію найбільших деформацій. У найнебезпечнішій точці труби виникають кільцеві напруження, значення яких розрахував Г. М. Саркісов [3], а поздовжні напруження визначають за відомими формулами опору матеріалів для стержнів з малою кривизною. Використовуючи другу теорію міцності, автори [2] визначали еквівалентне напруження і відповідно величину зовнішнього критичного тиску.

Проте такий підхід до розв'язку поставленої задачі має певні неточності зокрема: за формулою Г. М. Саркісова визначають кільцеві напруження прямолінійної труби; у формулі для визначення поздовжніх напружень не враховано деформацію поперечного перерізу в разі згину труби.

Дослідження характеру зміни напружень і деформацій труб при згині пов'язані з певними труднощами, які не вдається вирішити відомими методами з використанням формул опору матеріалів. Оцінити напружений стан кривої труби можна за допомогою теорії тонких оболонок, яка ґрунтується на кінематичній та статичній гіпотезах Кірхгофа.

Для визначення зовнішнього критичного тиску обсадної труби з урахуванням згину скористаємося результатами досліджень, наведеними в [4; 5]. Розглянемо ділянку колони обсадних труб довжиною ℓ , яка має овальність у поперечному перерізі, постійну товщину стінки і початкову кривизну поздовжньої осі $1/\rho_0$. Торці труби жорстко закріплені й навантажені згинальними моментами M або силами, статично еквівалентними M , а на стінку труби ззовні діє рівномірний радіальний тиск p_z . Деформація поперечних перерізів труби змінюється по довжині від найбільших значень у середньому перерізі ($X = 0$) і до нуля на кінцях ($X = \pm 0,5\ell$). Розрахунок здійснимо для найбільш небезпечного, тобто середнього перерізу ($X = 0$).

Для вирішення задачі скористаємося гіпотезою Кармана [6], за якою деформацію всіх віддалених від торців поперечних перерізів труби приймають однаковою і розрахунки проводять

без врахування впливу кінцевих закріплень. Як зазначено авторами [6; 7]. Таке припущення справджується для достатньо довгих труб, що цілком відповідає колоні обсадних труб.

За вихідні приймаємо спрощені рівняння типу Мейснера, одержані на основі напівбезмоментної теорії гнучких оболонок [6; 7]:

$$\begin{aligned} \ddot{\psi} + \nu \nu \cos \alpha &= -m \sin \alpha; \\ \ddot{\nu} - \nu \psi \cos \alpha &= -p_0 f, \end{aligned} \quad (1)$$

де ψ, ν – невідомі функції η ; α – кут між дотичною до серединної поверхні труби (в точці з координатою η) і віссю Z (див. рисунок); ν, m – безрозмірні параметри кривизни труби і її зміни; f – функція, яка враховує в рівняннях зовнішній тиск p_3 ; p_0 – безрозмірний параметр зовнішнього тиску, який враховує кривизну і зміну форми поперечного перерізу труби.

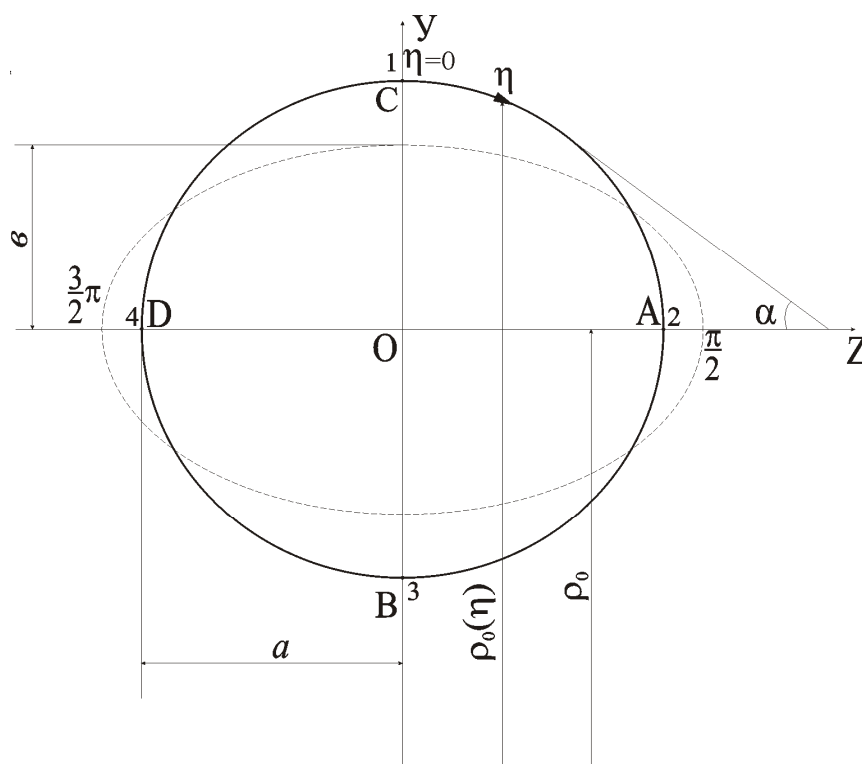


Рисунок 1. Схема зміни форми поперечного перерізу при згині обсадної колони

При розв'язуванні рівнянь (1) прийняли такі припущення:

- трубу вважають настільки тонкостінною, що до неї можна застосувати гіпотези теорії тонких оболонок;
- розміри поперечного перерізу труби в площині кривизни малі порівняно з радіусом кривизни осі;
- кут повороту дотичної до середньої лінії контура поперечного перерізу ν малий і відповідає умові $1 \pm \nu \approx 1$;
- радіус кривизни серединної поверхні труби в будь-якій точці є величиною такого самого порядку, що й периметр поперечного перерізу труби, поділений на 2π .

За допомогою методу лінійного розв'язку в тригонометричних рядах отримали вирази для визначення напружень максимальних поздовжніх σ_1 та кільцевих, σ_2 , що виникають у перерізі зігнутої труби:

$$\sigma_1 = \frac{E \delta}{t \sqrt{12(1-\mu^2)}} \left[b_1 \cos \eta + 3 b_3 \cos 3\eta \pm \mu \sqrt{\frac{3}{1-\mu^2}} (2 a_2 \cos 2\eta + 4 a_4 \cos 4\eta) \right]; \quad (2)$$

$$\sigma_2 = \frac{E \delta}{t \sqrt{12(1-\mu^2)}} \left[\pm \sqrt{\frac{3}{1-\mu^2}} (2 a_2 \cos 2\eta + 4 a_4 \cos 4\eta) - \frac{t}{\rho_0} (b_1 \sin \eta + b_3 \sin 3\eta) (S_1 \sin \eta + S_3 \sin 3\eta) \right] - p_3 \frac{t}{\delta}.$$

Знаки «+» і «-» відповідають напруженням на внутрішній і зовнішній стінках труби. За одержаними формулами можна визначити поздовжні та кільцеві напруження згину, що виникають у будь-якій точці поперечного перерізу обсадної труби з врахуванням зміни його форми, при дії згинаючого навантаження і радіального тиску в межах зміни полярного кута η від нуля до 2π .

Інші компоненти напруження згідно з гіпотезою тонких оболонок значно менші порівняно з σ_1 і σ_2 , тому ними можна знехтувати.

Розрахунок на міцність сталевих обсадних труб здійснюють згідно третьою або четвертою теорією міцності. Якщо кривизна осі труби дуже мала (практично прямолінійна, тобто $\rho > 500$ м), поздовжні σ_1 та кільцеві σ_2 напруження практично такі самі, як і прямолінійної труби, причому σ_1 значно менше σ_2 . Тоді друга і третя теорії міцності мало чим відрізняються, і тільки в цьому разі можна рекомендувати застосувати формулу Л. Б змайлова. В даному разі прийнято, що радіус викривлення змінюється у межах від 500 м до 100 м, тому при таких значеннях ρ , як показують розрахунки, поздовжні напруження σ_1 досягають великих значень $\sigma_1 \gg \sigma_2$, і доцільно використовувати третю або четверту теорію міцності.

Оскільки аналітичні залежності для визначення поздовжніх σ_1 та кільцевих σ_2 напружень громіздкі, для аналізу доцільніше використовувати третю теорію міцності [8]. Крім того, слід зазначити, що радіальні напруження σ_3 незначні (грунтуючись на другій гіпотезі Кірхгофа), і результати розрахунків за третьою та четвертою теоріями міцності будуть близькими.

Найбільші напруження будуть у точці з координатою $\eta = 0$, що знаходиться на внутрішній поверхні труби. В цій точці

$$\sigma_1 = \frac{E \delta}{t \sqrt{12(1-\mu^2)}} \left[b_1 + 3 b_3 + \mu \sqrt{\frac{3}{1-\mu^2}} (2 a_2 + 4 a_4) \right]; \quad (3)$$

$$\sigma_2 = \frac{E \delta}{t \sqrt{12(1-\mu^2)}} \sqrt{\frac{3}{1-\mu^2}} (2 a_2 + 4 a_4) - p_3 \frac{t}{\delta}.$$

Величина еквівалентних напружень у небезпечній точці при згині обсадної труби визначається за формулою

$$\sigma_e = \sigma_1 - \sigma_2. \quad (4)$$

Прирівнюючи σ_e до границі текучості σ_τ , одержимо спрощене рівняння, з якого можна визначити безрозмірний параметр зовнішнього тиску ρ_0

$$\sigma_\tau = E t S_1 \left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_0} \right) - \frac{3 E \delta p_0 (S_1^2 - C_1^2)}{8 t (1 + \mu) (3 - p_0)} + \frac{E p_0}{12 (1 - \mu^2)} \left(\frac{\delta}{t} \right)^2. \quad (5)$$

У загальному випадку параметр зовнішнього тиску буде

$$\rho_0 = \frac{\frac{3 E \delta (S_1^2 - C_1^2)}{8 t (1 + \mu)} + 3 \left(\frac{E}{12 (1 - \mu^2)} \left(\frac{\delta}{t} \right)^2 \right) - \left(\sigma_\tau - E t S_1 \left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_0} \right) \right)}{2 \left(- \frac{E}{12 (1 - \mu^2)} \right) \times}$$

$$+3\left(\frac{E}{12(1-\mu^2)}\left(\frac{\delta}{t}\right)^2\right) - \left(\sigma_{\tau} - Et S_1\left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_0}\right)\right) \left[\frac{E}{12(1-\mu^2)}\left(\frac{\delta}{t}\right)^2 \left(\sigma_{\tau} - Et S_1\left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_0}\right)\right) \right] - 12\left(\frac{E}{12(1-\mu^2)}\left(\frac{\delta}{t}\right)^2 \left(\sigma_{\tau} - Et S_1\left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_0}\right)\right)\right) \times \left(\frac{\delta}{t}\right)^2 \right]. \quad (6)$$

Знаючи величину p_0 , можна визначити величину зовнішнього критичного тиску $p_{кр}$

$$p_{кр} = \frac{p_0 E}{12(1-\mu^2)\left(\frac{\delta}{t}\right)^3}. \quad (7)$$

Для спрощення розрахунку з визначення параметра зовнішнього тиску p_0 , формулу (6) зведемо до простішого вигляду, ввівши такі заміни:

$$A = \frac{3 E \delta (S_1^2 - C_1^2)}{8 t (1 + \mu)} + 3 \left(-\frac{E}{12(1-\mu^2)} \left(\frac{\delta}{t}\right)^2 \right) - \left(\sigma_{\tau} - Et S_1 \left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_0} \right) \right);$$

$$B = -\frac{E}{12(1-\mu^2)} \left(\frac{\delta}{t}\right)^2; \quad (8)$$

$$C = \sigma_{\tau} - Et S_1 \left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_0} \right).$$

Тоді

$$p_0 = \frac{A + \sqrt{A^2 + 12 B C}}{2 B}. \quad (9)$$

Для прямолінійної обсадної труби ($\rho_0 = \rho = \infty$), коефіцієнти $b_1 = b_3 \in 0$. Поздовжні σ_1 і кільцеві напруження σ_2 в небезпечній точці стають від'ємними і $|\sigma_1| < |\sigma_2|$. У цьому разі $\sigma_e = |\sigma_2|$ і рівняння, з якого визначають параметр зовнішнього тиску p_0 , набуде вигляду

$$\sigma_{\tau} = \frac{3 E \delta p_0 (C_1^2 - S_1^2)}{8 t (1 - \mu^2) (3 - p_0)} + \frac{E p_0}{12 (1 - \mu^2)} \left(\frac{\delta}{t}\right)^2. \quad (10)$$

Аналогічно, як і в попередньому випадку, з виразу (10) знаходимо параметр зовнішнього тиску p_0

$$p_0 = \frac{\frac{E}{4(1-\mu^2)}\left(\frac{\delta}{t}\right)^2 + \frac{3E\delta(C_1^2 - S_1^2)}{8t(1-\mu^2)} + \sigma_{\tau} - \sqrt{\left(-\frac{E}{4(1-\mu^2)}\left(\frac{\delta}{t}\right)^2 - \frac{3E\delta(C_1^2 - S_1^2)}{8t(1-\mu^2)} - \sigma_{\tau}\right)^2 - \frac{E}{(1-\mu^2)}\left(\frac{\delta}{t}\right)^2 \sigma_{\tau}}}{\frac{E}{6(1-\mu^2)}\left(\frac{\delta}{t}\right)^2}. \quad (11)$$

Знаючи величину p_0 , з формули (7) визначаємо критичний тиск $p_{кр}$.

Для спрощення розрахунку формулу (11) запишемо у вигляді

$$p_0 = \frac{-D - \sqrt{D^2 - 12BK}}{2B}. \quad (12)$$

$$\text{де } D = -\frac{E}{4(1-\mu^2)}\left(\frac{\delta}{t}\right)^2 - \frac{3E\delta(C_1^2 - S_1^2)}{8t(1-\mu^2)} - \sigma_{\tau};$$

$$B = \frac{E}{12(1-\mu^2)}\left(\frac{\delta}{t}\right)^2; \quad (13)$$

$$K = \sigma_{\tau}.$$

Формулу (7), а відповідно (8) і (12) виведено для рівностінної труби. Для різностінної труби необхідно розглянути найнесприятливіший випадок, коли точка з координатою $\eta = 0$ розміщується на внутрішній поверхні труби з мінімальною товщиною стінки перерізу $\delta_{\min} = 0,875\delta$.

Для перевірки вірогідності одержаних формул з використанням напівбезмоментної теорії тонких оболонок порівняли значення зовнішніх критичних тисків, отримані за іншими формулами для прямолинійних труб (див. таблицю).

Значення критичних тисків для обсадних труб діаметром 168 мм

Границя текучості сталі σ_T , МПа	Овальність	Товщина стінки, мм		Критичний тиск $P_{кр}$, МПа				
		δ	δ_{\min}	різностінна труба			рівностінна труба	
				за формулою Г. М. Саркісова	за формулою Т. Ю. Єременко	за формулою (7)	за формулою Б. В. Булгакова	за формулою (7)
380	0,01	7,3	6,39	16,821	19,395	19,283	20,656	22,293
		10,6	9,27	32,996	38,422	37,253	38,858	41,306
	0,005	7,3	6,39	19,804	21,941	22,315	24,444	25,82
		10,6	9,27	37,847	42,592	41,855	44,246	45,959
550	0,01	7,3	6,39	20,224	22,417	23,015	25,542	27,288
		10,6	9,27	44,322	51,27	50,269	53,085	56,615
	0,005	7,3	6,39	23,053	24,498	25,815	29,525	30,886
		10,6	9,27	51,229	57,435	57,066	61,039	63,728

У роботі Т. Е. Єременка [9] наведено результати обчислення величини критичних тисків для обсадних труб діаметром 168 мм з різною овальністю та границею текучості сталі. Для обчислення критичного тиску з урахуванням різностінності використовували формулу Г. М. Саркісова. Одержані дані порівнювали зі значеннями критичного тиску, визначеного за формулою Б. В. Булгакова. Результати розрахунків наведено у таблиці, де зведено також результати, що впливають з формули (7) у разі відсутності згину обсадної колони.

Як бачимо, з формул, що враховують різностінність труб, формула Т. Е. Єременка і одержана (7) дають найвищі значення критичного тиску.

Т. Е. Єременко подав детальний аналіз розрахункової схеми овального різностінного кільця, яку використав Г. М. Саркісов, і результати, що впливають із розв'язку задачі щодо деформації зазначеного кільця під дією зовнішнього тиску. Висновок, який впливає з цього аналізу, зводиться до того, що формула для критичного тиску одержана Г. М. Саркісовим дає занижені значення порівняно з реальними. Згідно з формулою Г. М. Саркісова розрахункову товщину стінки визначають з врахуванням від'ємних допусків на відхилення від номінальної товщини, що дорівнює 12,5 %, а також з врахуванням відхилення ваги труби, що дорівнює 6 %. Врахування цих відхилень у формулі Г. М. Саркісова призводить до зменшення розрахункової величини зминаючого тиску. З цієї причини результати, одержані при зім'ятті в стенді труб з фактично меншою величиною допусків на товщину стінки, виявились вищі за результати, які одержані за розрахунковими формулами. Ця різниця в окремих випадках досягала 20 %.

Результати проведених розрахунків для найгірших умов, коли в розрахунковому перерізі мінімальна товщина стінки труби $\delta_{\min} = 0,875\delta$, засвідчили, що одержані результати збігаються з аналогічними, визначеними за формулою Г. М. Саркісова.

Із порівняння результатів, одержаних за формулами (7) для рівностінної труби з товщиною стінки δ та Б. В. Булгакова, впливає, що формула (7) дає дещо вищі значення критичного тиску. Раніше в роботі [9] наголошувалось, що формула Б. В. Булгакова дає занижені результати порівняно з експериментальними. Як показали виконані стендові

дослідження обсадних труб [10], сплюснення їх відбувається за межею області пружних деформацій металу, тобто в області пластичних деформацій. При цьому було встановлено, що наявність пружно-пластичних деформацій металу в перерізі труби пов'язане з підвищенням зминаючого тиску. В окремих дослідах збільшення зминаючого тиску труб досягло 15–20 % і більше. Збільшення міцності пояснюється ущільненням металу, що властиво йому при розвитку напружень текучості [10].

Отже, одержана на основі напівбезмоментної теорії тонких оболонок формула для розрахунку критичного тиску прямолінійних обсадних труб справедлива, і її можна використовувати при проектуванні обсадних колон і для розрахунку криволінійних труб.

Приведены результаты теоретических исследований влияния изгиба обсадной колонны на овальность и прочность обсадных труб при действии внешнего избыточного давления. С использованием полубезмоментной теории гибких оболочек получена формула для определения внешнего критического давления, учитывающая кривизну и изменение поперечного сечения трубы. Проведено сравнение внешнего критического давления прямолинейных труб с полученным другими авторами.

Ключевые слова: обсадная труба, давление, изгиб, напряжение.

The results of theoretical investigations of how casing pipe banding influences on its ovality and strength during outside pressure is considered in the article. With a help of halfmoment theory of banding covers it have been taken the formula for calculating the value of outside pressure. In this formula the curvature and casing pipe diameter changing have been considered. The comparing of outside pressure values for straightforward pipes of another authors have been analyzed.

Keywords: casing pipe, pressure, bend, tensions.

Література

1. Karman Th. Uber die Formänderung dünnwandiger Rohre, insbesondere federnder Ausgleichrohre / Th Karman. – VDI, Bd. 55, 1911. – S. 45.
2. Измайлов Л. Б., Кокаев В. Н. Расчет обсадных колонн наклонных скважин на сопротивляемость смятию // В кн.: Вопросы эксплуатации нефтепромысловых труб. – Куйбышев, 1980. – С. 88–93.
3. Саркисов Г. М. Расчеты бурильных и обсадных колонн. – М.: Недра, 1971. – 205 с.
4. Коцкулич Я. С., Лев О. М. К вопросу изменения формы поперечного сечения обсадных труб в искривленных скважинах // Нефть и газ. – 1989. – № 7. – С. 38–41.
5. Коцкулич Я. С. Напряженное состояние обсадных колонн в нефтяных и газовых скважинах // Ивано-Франк. ин-т нефти и газа. – Ивано-Франковск, 1992. – 104 с.: ил. – Деп. в УкРИНТЭИ 28.04.92, № 493. – Ук92.
6. Аксельрад Э. Л., Ильин В. П. Расчет трубопроводов. – Л.: Машиностроение, 1972. – 240 с.
7. Аксельрад Э. Л. Гибкие оболочки. – М.: Наука, 1976. – 376 с.
8. Справочник по сопротивлению материалов / С. П. Фесик – Киев: Будівельник, 1982. – 277 с.
9. Еременко Т. Е. Крепление нефтяных и газовых скважин. – М.: Недра, 1965. – 214 с.
10. Еременко Т. Е. Исследование и расчет обсадных труб. – К.: Тех. литература УССР, 1962. – 216 с.

Надійшла 15.06.12