

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗМІНИ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ ОБСАДНИХ ТРУБ ПРИ ЗГІНІ

Я.С.Коцкулич, О.М.Лев, О.Б.Марцинків

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська 15, тел. (03422) 42153,
e-mail: drill@nuing.edu.ua

Подаються результати експериментальних досліджень впливу згину на напружений стан і форму поперечного перерізу обсадних труб, які узгоджуються з результатами теоретичних досліджень. Рекомендовано в методиці розрахунку обсадних колон для кріплення похило-скерованих свердловин враховувати не лише додаткові осеві напруження від згину, але і зниження опірності труб зовнішньому тиску за рахунок збільшення їх овальності.

Ключові слова: кріплення похило-скерованих свердловин, обсадна колона, напружений стан, деформація, згин, овальність

Приведены результаты экспериментальных исследований влияния изгиба на напряженное состояние и форму поперечного сечения обсадных труб, которые согласуются с результатами теоретических исследований. Рекомендуется в методике расчета обсадных колонн для крепления наклонно-направленных скважин учитывать не только дополнительные осевые напряжения от изгиба, но и снижение сопротивляемости труб наружному давлению за счет увеличения их овальности.

Ключевые слова: крепление наклонно-направленных скважин, обсадная колонна, напряженное состояние, деформация, изгиб, овальность

The article shows the results of the experimental research devoted to the influence of bend on the stress state and form of casing cross section which conform with the results of theoretical research. In the methods of casing string calculations for mounting of directional wells there has been recommended to take into consideration not only additional axial stress from bend but also decrease of pipes' resistance to the external pressure due to the enlargement of pipe out-of-roundness.

Keywords: mounting of directional wells, casing string, stress state, deformation, bend, out-of-roundness

Умови роботи обсадних колон із збільшенням глибин буріння ускладнюються, внаслідок чого підвищуються вимоги до їх кріпленості, що найбільш характерно для кріплення похило-скерованих свердловин. Тому дослідження працездатності обсадних колон, особливо в інтервалах інтенсивного викривлення свердловини, створить передумови щодо попередження ускладнень і аварій з обсадними колонами як у процесі буріння, так і у ході експлуатації свердловин.

Для проведення експериментальних досліджень напруженого стану моделей обсадних труб при одночасній дії згинаючої сили і внутрішнього тиску була виготовлена лабораторна установка.

Вимірювання деформацій моделей обсадних труб здійснювалося з допомогою тензорезисторних датчиків 2ПКБ-20-200ГБ з використанням станції «СІИТ-3». За величиною деформації визначали напруження в небезпечних перерізах труби. Як моделі обсадних труб використано насосно-компресорні труби, виготовлені зі сталі групи міцності «Д», довжиною 7м, діаметром 60,3мм і товщиною стінки 5,0мм.

Установка складається із досліджуваної труби, на кінцях якої нагвинчуються заглушки з каналами для під'єднання до гідравлічної системи з допомогою штуцерів. Заглушки з'єднуються з моделями обсадних труб за допомогою подовженої конічної трубної різьби і надійно герметизується.

На рис. 1 зображено схему гідравлічної обв'язки експериментальної установки. Експериментальні дослідження проводилися у такій послідовності. Модель обсадної труби 1, з попередньо наклеєними на її поверхні за прийнятою схемою тензорезисторів, під'єднували до насосної групи.

Заповнення внутрішньої порожнини труби 1 здійснювалося технічною водою з допомогою центробіжного насоса 18 при відкритому вентилі 10, а для створення внутрішнього тиску як робоча рідина використовувалося трансформаторне масло. Внутрішній тиск створювався з допомогою плунжерного насоса 19 і ручного преса 20, які можуть працювати незалежно один від одного. Згин труби здійснювали з допомогою домкрата 5, під'єданого до гідравлічної схеми. Величина прогину труби реєструвалася механічним самописцем 6.

Після заповнення досліджуваної труби 1 водою вентилі 7 і 10 закривали і переходили до режиму створення внутрішнього тиску. Під час створення тиску в трубі вентиль 9 і за необхідності вентиль 12, відкриті, а вентиль 8, "скид" маніфольда 17, "скид" і "нагнітання" маніфольда 16 – закриті. Створення тиску у циліндрі домкрата 5 проводилось при відкритому вентилі 8 і вентилі "нагнітання" маніфольда 16 та закритих вентилі 9, "скиді" маніфольда 16, "скиді" і "нагнітання" маніфольда 17.

Ручний прес 20 підключається до роботи у разі необхідності прискореного підвищення

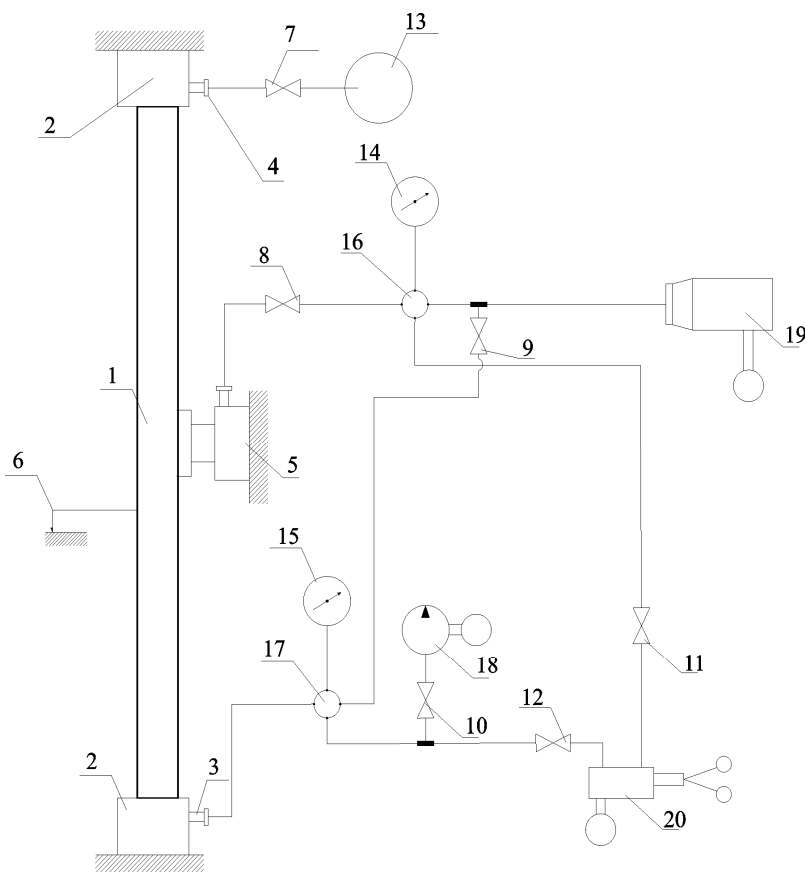


Рисунок 1 – Схема гідравлічної обв’язки установки

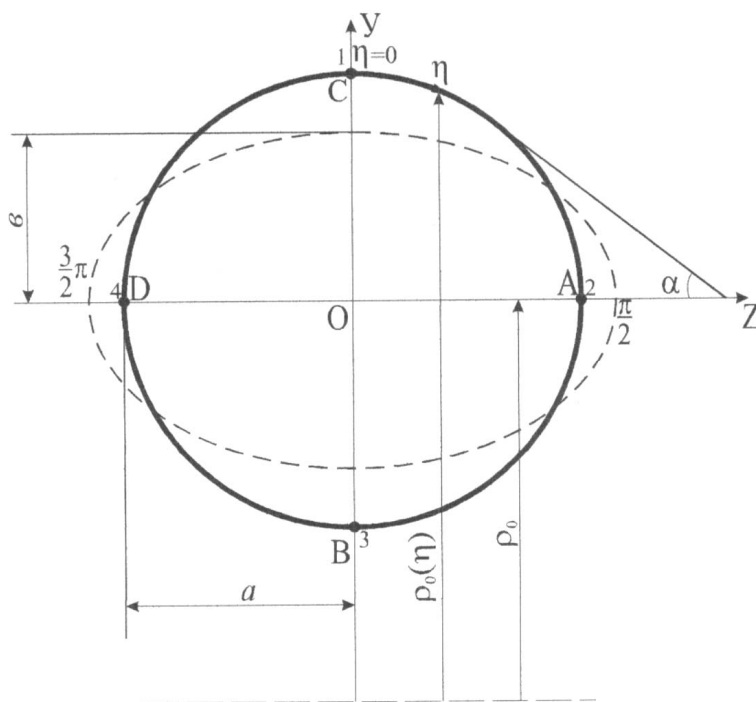


Рисунок 2 – Схема зміни форми поперечного перерізу труби при згині

тиску в системі або для створення згинаючих навантажень. Для створення внутрішнього тиску відкривають вентиль 12, а вентилі 10 і 11 закривають. Для створення згинаючих навантажень вентиль 12 закривають і відкривають вентилі 8 і 11.

Деформації заміряли в точках А, В, С і Д (рис.2) для прямолинійної труби при зміні тиску від 0 до 25,0 МПа з кроком 5,0 МПа. Аналогічні заміри проведені при зміні стріли прогину осі труби до 100 мм з кроком 25 мм.

Таблиця 1 – Результати експериментальних досліджень за відсутності тиску

Стріла прогину, м	Радіус кривизни, м	Деформація	Точки заміру (координата)			
			С (0)	А (π/2)	В (π)	Д (3π/2)
0	∞	ε ₁	0	0	0	0
		ε ₂	0	0	0	0
0,025	82	ε ₁	3,382·10 ⁻⁴	-9,524·10 ⁻¹²	-3,382·10 ⁻⁴	-9,524·10 ⁻¹²
		ε ₂	-1,006·10 ⁻⁴	-8,652·10 ⁻⁷	1,023·10 ⁻⁴	-8,652·10 ⁻⁷
0,05	41	ε ₁	6,766·10 ⁻⁴	-2,381·10 ⁻¹¹	-6,766·10 ⁻⁴	-2,381·10 ⁻¹¹
		ε ₂	-1,995·10 ⁻⁴	-3,462·10 ⁻⁶	2,064·10 ⁻⁴	-3,462·10 ⁻⁶
0,075	27	ε ₁	1,015·10 ⁻³	-1,905·10 ⁻¹¹	-1,015·10 ⁻³	-1,905·10 ⁻¹¹
		ε ₂	-2,967·10 ⁻⁴	-7,789·10 ⁻⁶	3,122·10 ⁻⁴	-7,789·10 ⁻⁶
0,1	20	ε ₁	1,353·10 ⁻³	2,381·10 ⁻¹¹	-1,353·10 ⁻³	2,381·10 ⁻¹¹
		ε ₂	-3,92·10 ⁻⁴	-1,384·10 ⁻⁵	4,197·10 ⁻⁴	-1,384·10 ⁻⁵

Для зменшення розбіжності результатів вимірювання кожний експеримент повторювався не менше п'яти разів. Для обробки приймалися результати з відхиленнями в межах ± 5%.

Дані експериментальних досліджень наведені в таблиці 1. Для оцінки напруженого стану і форми поперечного перерізу обсадних труб при згині результати наведені без врахування дії внутрішнього тиску.

Розглядаємо обсадну трубу як тонку оболонку. Нехтуємо радіальним напруженням порівняно з поздовжніми і кільцевими [1].

Визначивши відносні деформації, знаходимо за законом Гука поздовжні σ₁ і кільцеві σ₂ напруження у відповідних точках

$$\sigma_1 = \frac{E}{1 - \mu^2} \cdot (\varepsilon_1 + \mu \cdot \varepsilon_2);$$

$$\sigma_2 = \frac{E}{1 - \mu^2} \cdot (\varepsilon_2 + \mu \cdot \varepsilon_1),$$

де: ε₁ – відносні поздовжні деформації;
ε₂ – відносні кільцеві деформації;
μ – коефіцієнт Пуассона;

E – модуль пружності матеріалу труби, Па.

Інші компоненти напруження у відповідності з гіпотезою тонких оболонок дуже малі порівняно з σ₁ і σ₂, тому ними можна знехтувати [1, 4].

Визначимо величини напружень в точках А, В, Д і С (рис.2), скориставшись напівбезмоментною теорією тонких оболонок. За вихідні приймаємо спрощені рівняння типу Мейснера, які для випадку круглих труб з малою кривизною мають вигляд [1]

$$\begin{aligned} \dots \\ \psi + v\nu \cos \alpha &= -m \sin \alpha; \\ \dots \\ \nu - v\psi \cos \alpha &= 0, \end{aligned}$$

де: ψ, ν – невідомі функції η;

α – кут між дотичною до серединної поверхні труби (в точці з координатою η) і віссю z (рис. 2);

v, m – безрозмірні параметри кривизни труби і її зміни;

$$v = \sqrt{12(1 - \mu^2)} \frac{t^2}{\rho \delta};$$

$$m = v \left(1 - \frac{\rho}{\rho_0} \right),$$

де: ρ₀, ρ – відповідно радіуси кривизни осі труби до і після деформації, м;
δ – товщина стінки труби, м.

Крапки над невідомими функціями ψ і ν означають диференціювання за безрозмірною координатою η, пропорційною довжині меридіану серединної поверхні S, відліченої від прийнятого початку координат

$$\eta = \frac{S}{t},$$

де t – периметр поперечного перерізу труби, поділений на 2π.

Для розв'язання рівнянь (2) скористаємося методом лінійного розв'язку в тригонометричних рядах. Розглянемо трубу з поперечним перерізом, симетричним відносно осей у і z (рис.2), і розкладемо функції sin α і cos α в ряди Фур'є [1, 2]

$$\begin{aligned} \sin \alpha &= \sum_{j=1,3} S_j \sin j\eta; \\ \cos \alpha &= \sum_{j=1,3} C_j \cos j\eta. \end{aligned}$$

В розкладаннях sin α і cos α відсутні всі парні члени, що виходить з умови симетрії. Для перерізів, форма яких мало відрізняється від кола, в (5) можна обмежитися тільки двома членами, і коефіцієнти розкладу S_j і C_j можуть бути визначені із співвідношень [3]

$$S_1^2(1 + \lambda^2) - 0.5S_1(\lambda^2 + \lambda + 2) + \frac{1}{16}(\lambda - 1)(\lambda + 3) = 0;$$

$$C_1 = \frac{1 + \lambda(4S_1 - 1)}{4};$$

$$S_1 - S_3 = 1; \quad C_1 + C_3 = 1;$$

$$\lambda = \frac{2 + e}{2 - e},$$

де e – овальність труби.

Підставляючи (5) в (2), одержимо систему рівнянь, розв'язок якої будемо шукати у вигляді рядів Фур'є [1, 4]

$$\psi = \sum_{j=1,3} b_j \sin j\eta ; \quad (7)$$

$$v = \sum_{n=2,4} a_n \sin n\eta , \quad (8)$$

де a_n і b_j – коефіцієнти розкладу.

Прирівнюючи коефіцієнти при $\sin \eta$, $\sin 2\eta$, в лівій і правій частині кожного з рівнянь (2), і враховуючи, що для обсадних труб

$$v \ll 1, \quad C_1, S_1 \approx 1, \quad |S_3| \ll 1, \quad |C_3| \ll 1,$$

отримаємо систему рівнянь, з яких визначаємо невідомі a_n, b_j

$$a_2 \approx -\frac{1}{8} \cdot v \cdot m;$$

$$a_4 \approx \frac{-v^2 \cdot a_2 + 2 \cdot v \cdot m \cdot S_3 + 18 \cdot v \cdot C_3 \cdot b_1}{576}; \quad (9)$$

$$b_1 \approx m \cdot S_1;$$

$$b_3 \approx \frac{1}{9} \cdot m \cdot S_3 + \frac{1}{18} \cdot v \cdot (a_2 + a_4).$$

Згідно з напівбезмоментною теорією переміщення ω по нормалі до серединної поверхні зв'язано з кутом повороту співвідношенням [4]

$$v = -\frac{1}{b} \cdot \frac{d\omega}{d\eta} - \frac{1}{r} \int \frac{\omega}{r} \cdot b \cdot d\eta , \quad (10)$$

де r – радіус кривизни серединної поверхні труби, м.

Задаючись ω у виді ряду Фур'є

$$\omega = \sum_{n=2,4} \omega_n \cdot \cos n\eta \quad (11)$$

і підставивши (11), (8) в (10), знайдемо залежність коефіцієнтів ω_n ряду для ω від коефіцієнтів a_n :

$$\omega_n = b \cdot a_n \cdot \frac{n}{n^2 - \frac{b^2}{r^2}} . \quad (12)$$

Підставивши (12) в (11), зрештою одержимо:

$$\omega = \sum_{n=2,4} b \cdot a_n \cdot \frac{n}{n^2 - \frac{b^2}{r^2}} \cdot \cos n\eta . \quad (13)$$

Порівняння коефіцієнтів a_2 і a_4 із (9) свідчить [5], що $|a_4| \ll |a_2|$. Отже у виразі (13) можна обмежитися тільки одним членом ряду, і тоді, враховуючи, що $t/r \approx 1$, маємо

$$\omega = \omega_2 \cdot \cos 2\eta \approx \frac{2}{3} \cdot b \cdot a_2 \cdot \cos 2\eta . \quad (14)$$

З (14) виходить, що точки С і В зміщуються до центра на величину $\omega_0 = \frac{2 \cdot b \cdot a_2}{3}$, а точки А і D на таку ж величину віддаляються від центра, тобто поперечний переріз серединної поверхні труби ще більше сплющується, як це показано на рис. 2 пунктирною лінією. Велика і мала піввісь еліпса в деформованому стані ста-

ють рівними відповідно $a + \omega_0$ і $b - \omega_0$. В результаті овальність перерізу збільшується на величину e' і стає рівною

$$e = e_0 + e' , \quad (15)$$

де $e' = \frac{4a_2}{3}$.

Грунтуючись на другій гіпотезі Кірхгофа, основною задачею стає визначення поздовжніх σ_1 і кільцевих σ_2 напружень, що виникають в стінках труби при її згині.

Найбільші поздовжні і кільцеві напруження σ_1, σ_2 , які виникають в перерізі зігнутої труби, визначаються через функції ψ, v [1]

$$\sigma_1 = \frac{E\delta}{t\sqrt{12(1-\mu^2)}} \left(\psi \pm \mu \sqrt{\frac{3}{1-\mu^2}} v \right); \quad (16)$$

$$\sigma_2 = \frac{E\delta}{t\sqrt{12(1-\mu^2)}} \left(\pm \sqrt{\frac{3}{1-\mu^2}} v - \psi \frac{t}{\rho_0} \sin \alpha \right).$$

Підставляючи в (10) функції ψ і v із (7) і (8), одержуємо

$$\sigma_1 = \frac{E\delta}{t\sqrt{12(1-\mu^2)}} \left[b_1 \cos \eta + 3b_3 \cos 3\eta \pm \mu \sqrt{\frac{3}{1-\mu^2}} (2a_2 \cos 2\eta + 4a_4 \cos 4\eta) \right]; \quad (17)$$

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

Знаки «+» і «-» відповідають напруженням на внутрішній і зовнішній стінках труби. Одержані формули дозволяють визначити поздовжні і кільцеві напруження, які виникають в будь-якій точці поперечного перерізу обсадної труби з врахуванням зміни його форми, під дією згинаючого навантаження в межах зміни полярного кута η від 0 до 2π .

Результати теоретичних розрахунків і експериментальних досліджень наводяться в таблиці 2, з якої видно, що внаслідок згину із зменшенням радіуса кривизни збільшуються як поздовжні, так і кільцеві напруження. Згин спричиняє виникнення розтягуючих поздовжніх і кільцевих напружень на випуклій поверхні труби (точка С, рис.2), стискаючих – в точках А і D (рис.2) і стискаючих поздовжніх та розтягуючих кільцевих на увігнутій поверхні труби (точка В, рис.2).

Визначимо як змінюється форма поперечного перерізу труби внаслідок дії згинаючого навантаження за формулами (2) – (15).

Аналіз результатів розрахунку (табл.3) підтверджує, що овальність труб збільшується у випадку зменшення радіуса викривлення, причому чим менший радіус викривлення, тим інтенсивніше зростає овальність труб.

Таблиця 2 – Величини поздовжніх σ_1 і кільцевих σ_2 напружень згину

Радіус кривизни, м	Напруження, МПа	Координати							
		0		$\pi/2$		π		$3\pi/2$	
		експериментальні	теоретичні	експериментальні	теоретичні	експериментальні	теоретичні	експериментальні	теоретичні
∞	σ_1	0	0	0	0	0	0	0	0
	σ_2	0	0	0	0	0	0	0	0
82	σ_1	71,09	71,16	-0,06	-0,06	-70,97	-71,04	-0,06	-0,06
	σ_2	0,2	0,2	-0,2	-0,2	0,2	0,2	-0,2	-0,2
41	σ_1	142,32	142,45	-0,24	-0,24	-141,84	-141,97	-0,24	-0,24
	σ_2	0,8	0,8	-0,8	-0,8	0,8	0,8	-0,8	-0,8
27	σ_1	213,66	213,86	-0,54	-0,54	-212,58	-212,78	-0,54	-0,54
	σ_2	1,8	1,8	-1,8	-1,8	1,8	1,8	-1,8	-1,8
20	σ_1	285,04	285,31	-0,96	-0,96	-283,13	-283,4	-0,96	-0,96
	σ_2	3,19	3,19	-3,19	-3,19	3,19	3,19	-3,19	-3,19

Таблиця 3 – Овальність моделей обсадних труб залежно від радіуса кривизни

Радіус кривизни, м	Початкова овальність, %	Додаткова овальність, %	Результуюча овальність, %
∞	0,25	0	0,25
82	0,25	0,00063795	0,251
41	0,25	0,00255243	0,253
27	0,25	0,00574296	0,256
20	0,25	0,0102047	0,26

Виходячи з викладеного можна зробити такі висновки.

1. При проектуванні профілів похило-скерованих свердловин передбачати обмеження інтенсивності викривлення в інтервалах набору і спаду зенітного кута не тільки з умови проходження обсадної колони в цих інтервалах, але і з умови міцності труб.

2. В методиці розрахунку обсадних колон для кріплення похило-скерованих свердловин передбачити врахування додаткових осьових напружень внаслідок згину та зниження опірності труб зовнішньому тиску за рахунок збільшення їх овальності.

Література

1 Аксельрад Э.Л. Расчет трубопроводов / Э.Л. Аксельрад, В.П. Ильин. – Л.: Машиностроение, 1972. – 240 с.

2 Коцкулич Я.С. К вопросу изменения формы поперечного сечения обсадных труб в искривленных скважинах / Я.С. Коцкулич, О.М. Лев // Нефть и газ. – 1989. – № 7. – С.38-41.

3 Аксельрад Э.Л. Изгиб и потеря устойчивости тонкостенных труб при гидростатическом давлении / Э.Л. Аксельрад // Изв. АН СССР, ОТН. – Механика и машиностроение. – 1962. – № 1. – С. 98-110.

4 Аксельрад Э.Л. Гибкие оболочки / Э.Л. Аксельрад. – М.: Наука, 1976. – 376 с.

5 Коцкулич Я.С. Определение деформации поперечного сечения обсадных труб в наклонно-направленных скважинах. / Я.С. Коцкулич, О.М.Лев, В.Я.Дацишин. – 1987. – Рукопись деп. в УКРНИИИТИ 28.09.1987г. № 2743-Ук 87.

Стаття поступила в редакційну колегію
05.10.09

Рекомендована до друку професором
Мойсишиним В.М.