УДК 622.245.4

Я. С. Коцкулич, д-р техн. наук; **І. В. Рибіцький**, канд. техн. наук; **В. І. Гриманюк**, **О. І. Бунікевич**

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Україна

ДО ПИТАННЯ ВИБОРУ КРИТЕРІЮ ОЦІНЮВАННЯ ДЕФОРМАЦІЙНОЇ ЗДАТНОСТІ ТАМПОНАЖНОГО КАМЕНЮ

Текст анотації українською мовою. Виконано аналіз існуючих критеріїв оцінки деформаційної здатності тампонажного каменя. Розглянуто механізм виникнення напружень і деформацій системи «обсадна колона-цементний камінь» з врахуванням динамічних навантажень, що виникають в свердловині. Обґрунтовано вибір критерія оцінки деформаційної здатності тампонажного каменя у разі динамічних навантажень на кріплення свердловини. Описано методику та наведено результати вимірювань запропонованого коефіцієнта деформаційної здатності тампонажного каменю армованого поліпропіленовою фіброю та хризотил-азбестом. Визначено подальший напрямок досліджень.

***Ключові слова**: напруження, деформація, тампонажний камінь, динамічні навантаження.*

У результаті впливу комплексу статичних та динамічних навантажень на обсадну колону цементне кільце з часом втрачає здатність зберігати герметичність затрубного простору свердловини [1]. За результатами аналітичних досліджень встановлено, що в цементному кільці затрубного простору виникає значне розтягуюче напруження 1,4–2,2 МПа, які небезпечні щодо руйнування цементного кільця. Доведено, що цементний розчин без вмісту спеціальних домішок, які покращують фізико-механічні властивості цементного каменю, не здатний забезпечити якісне та герметичне кріплення свердловини впродовж тривалого терміну її експлуатації [2]. В зв'язку з цим, дослідниками, що працюють в даному напрямку, запропоновано велика кількість рецептур тампонажних розчинів, які, на їх погляд, певним чином здатні вирішити зазначну проблему.

Невід'ємною частиною створення нової рецептури є обґрунтування та вибір критерію оцінювання якості запропонованого тампонажного розчину. Так, для оцінювання тривалості перебування тампонажного розчину в стані найбільш сприятливому для утворення флюїдопровідних каналів, автором [3] запропоновано критерій ефективності тампонажного розчину, який визначається як відношення часу загуснення тампонажного розчину до тривалості початку тужавіння. Чим більше це відношення, тим меншим буде час для сприятливого утворення каналів в тужавіючому тампонажному розчині. Недоліком цього критерію є те, що він не враховує роботу цементного каменю у свердловині піч час подальшої її експлуатації. Після затвердіння цементного розчину формуються контактні зони на межі фільтраційної кірки, обсадної колони та цементного каменю, які також, як і тужавіючий цементний розчин, можуть бути середовищем формування флюїдопровідних каналів.

В роботі [4] вибрали фрактально-синергетичну концепцію для оцінки механічних властивостей цементного каменю. В якості основних критеріїв цієї концепції розглядаються наступні параметри: теоретична міцність цементного каменя на основі ряду співвідношень, енергія пластичної деформації, границя тріщиностійкості та гранична деградація цементного каменя. Недоліком цього підходу полягає в потребі виготовлення спеціальних форм та пристроїв для проведення дослідів, а також рутинності розрахунків.

В роботі [5] автор доводить, що тампонажний камінь у свердловині в більшій мірі піддається розтягуючим навантаженням та пропонує в якості критерію деформаційної здатності обрати відношення границі міцності тампонажного каменю на розтяг (σ_P) до

границі міцності тампонажного каменю на стиск ($\sigma_{СТ}$), виходячи з того, що $\sigma_{СТ}$ та $\sigma_Р$ є граничними значеннями в тенденції руйнування цементного каменя з точки зору його міцності, тобто згідно формули (1)

$$\sigma_{СТ} > \tau_{ЗС} > \sigma_{ЗГ} > \sigma_Р \tag{1}$$

Такий підхід не враховує динамічного навантаження, що виникає у свердловині впродовж всього періоду її будівництва та експлуатації які за величиною значно більші та небезпечні щодо збереження цілісності цементного кільця за обсадною колоною.

З метою вибору критерію деформаційної здатності, що враховуватиме динамічні навантаження на цементний камінь, та створення на його основі нового тампонуючого матеріалу який дозволить зберегти цілісність цементного каменю впродовж тривалого періоду експлуатації свердловини, пропонується розглянути механізм виникнення напружень і деформацій системи «обсадна колона-цементний камінь» з врахуванням динамічного впливу який виникає всередині свердловини.

Проаналізуємо систему з відомими внутрішнім $r_В$ та зовнішнім $r_З$ радіусами обсадної колони, яка зображена на рис. 1, 2.

Для визначення напруження в цементному кільці [6] достатньо сумісно розв’язати відоме рівняння рівноваги (2), яке справедливе для плоскої деформації з осьовою симетрією при відсутності масових сил,

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \tag{2}$$

та фізичні рівняння (3)–(5) які описують закон Гука:

$$\varepsilon_r = \frac{1}{E}\left[\sigma_r - \mu(\sigma_\theta + \sigma_Z)\right], \tag{3}$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{1}{E}\left[\sigma_\theta - \mu(\sigma_Z + \sigma_r)\right], \tag{4}$$

$$\varepsilon_Z = \frac{1}{E}\left[\sigma_Z - \mu(\sigma_r + \sigma_\theta)\right], \tag{5}$$

де $\varepsilon_r = du/dr$, $\varepsilon_\theta = u/r$, ε_Z – відповідно радіальна, тангенціальна і осьова деформація; u – радіальне переміщення; E – модуль Юнга цементного каменя; μ – коефіцієнт Пуассона.

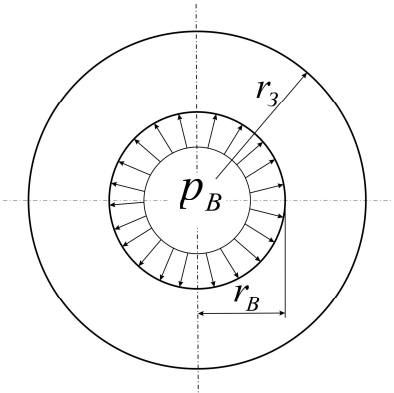

Рис. 1. Розподіл динамічного навантаженя в системі «обсадна колона – цементний камінь» з внутрішнім r_B та зовнішнім $r_З$ радіусами

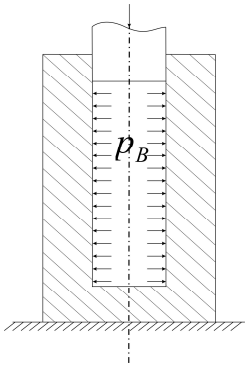

Рис. 2. Схема навантаження системи «обсадна колона – цементний камінь» внутрішнім тиском

Система навантажена внутрішнім тиском p_B як зображено на рис. 2, без зовнішнього впливу. Осьове навантаження $\sigma_Z = 0$, отже формула (4) матиме вигляд:

$$\varepsilon_\theta = \frac{1}{E}\left[\sigma_\theta - \mu\sigma_r\right]. \tag{6}$$

Радіальні та кільцеві напруження в концентричному кільцевому елементі визначають за формулою (7), тобто формулою Ламе,

$$\left.\begin{matrix}\sigma_r \\ \sigma_\theta\end{matrix}\right\} = \frac{r_в^2 p_в - r_з^2 p_з}{r_з^2 - r_в^2} \pm \frac{p_з - p_в}{r_з^2 - r_в^2}\frac{r_в^2 r_з^2}{r^2}, \tag{7}$$

де $p_В$, $p_З$ – відповідно тиски на внутрішній та зовнішній поверхнях кільцевого елементу, радіуси яких рівні відповідно $r_В$ та $r_З$.

Основні розрахункові співвідношення отримують прирівнюванням деформацій на контактних поверхнях. В зв'язку з цим, з формули (6) за допомогою формули (7) визначимо кільцеві деформації на контактах:

$$(\varepsilon_\theta)_{r=a} = \frac{p_B}{E}\left(\frac{r_з^2 + r_в^2}{r_з^2 - r_в^2} + \mu\right) - \frac{p_з}{E}\left(\frac{r_з^2 + r_в^2}{r_з^2 - r_в^2} + 1\right) \tag{8}$$

$$(\varepsilon_\theta)_{r=b} = \frac{p_B}{E}\left(\frac{r_з^2 + r_в^2}{r_з^2 - r_в^2} - 1\right) - \frac{p_з}{E}\left(\frac{r_з^2 + r_в^2}{r_з^2 - r_в^2} - \mu\right) \tag{9}$$

$$\sigma_{\theta(r=a)} = p_B\frac{r_з^2 + r_в^2}{r_з^2 - r_в^2} - p_з\left(\frac{r_з^2 + r_в^2}{r_з^2 - r_в^2} + 1\right) \tag{10}$$

$$\sigma_{\theta(r=b)} = p_B\left(\frac{r_з^2 + r_B^2}{r_з^2 - r_B^2} - 1\right) - p_з\frac{r_з^2 + r_B^2}{r_з^2 - r_B^2} \tag{11}$$

Вплив динамічного навантаження у свердловині на обсадну колону і цементне кільце за обсадною колоною можна представити у вигляді $p_В = p$, $p_З = 0$. Тоді формули (8)–(11) приймуть вигляд:

$$(\varepsilon_\theta)_{r=a} = \frac{p}{E}\left(\frac{r_з^2 + r_B^2}{r_з^2 - r_B^2} + \mu\right) \tag{12}$$

$$(\varepsilon_\theta)_{r=b} = \frac{p}{E}\left(\frac{r_з^2 + r_B^2}{r_з^2 - r_B^2} - 1\right) \tag{13}$$

$$\sigma_{\theta(r=a)} = p\frac{r_з^2 + r_B^2}{r_з^2 - r_B^2} \tag{14}$$

$$\sigma_{\theta(r=b)} = p\left(\frac{r_з^2 + r_B^2}{r_з^2 - r_B^2} - 1\right) \tag{15}$$

Кільцеве напруження розтягуюче, а радільне – стискаюче. На внутрішній поверхні σ_t досягає найбільшого значення і визначається за формулою (12). Радіальне напруження на внутрішній поверхні дорівнює p.

На рис. 3 показані епюри зміни радіального та кільцевого напружень за товщиною кільця при навантаженні внутрішнім тиском від динамічного навантаження.

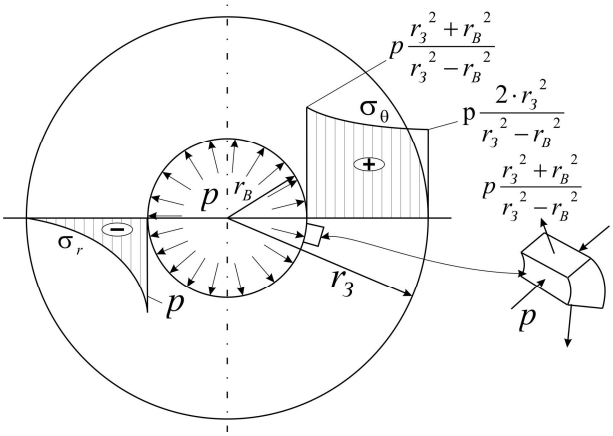

Рис. 3. Епюра зміни радіального та кільцевого напружень за товщиною кільця при навантаженні внутрішнім тиском

Згідно з теорією найбільших дотичних напружень ($\sigma_z = 0$)

$$\sigma_{екв} = \sigma_1 - \sigma_3 = p\frac{r_3^2 + r_B^2}{r_3^2 - r_B^2} - (-p) \tag{16}$$

або

$$\sigma_{екв} = p\frac{2r_3^2}{r_3^2 - r_B^2} \tag{17}$$

Прослідкуємо, як зміняться напруження σ_r та σ_t по мірі зменшення товщини кільця. Нехай $r_3 = r_B + \delta$ де δ – товщина кільця. Тоді формули (14) та (15) приймуть вигляд:

$$\sigma_{\theta(r=a)} = p\frac{(r_B + \delta)^2 + r_B^2}{r_3^2 - r_B^2}, \tag{18}$$

$$\sigma_{\theta(r=b)} = p\frac{r_B^2}{\delta(2r_B + \delta)} \tag{19}$$

При малому значенні δ

$$\sigma_{\theta(r=a)} \approx \sigma_{\theta(r=b)} \approx p\frac{a}{\delta} \tag{20}$$

Радіальне напруження σ_r на внутрішній поверхні рівне «$-p$», а на зовнішній – нулю незалежно від товщини циліндра.

Таким чином, видно, що для циліндра з малою товщиною стінки розтягуюче напруження розподілено за товщиною практично рівномірно, тискаюче – не істотно порівняно з розтягуючим такою самою мірою, як товщина δ стінки мала по відношенню до радіуса.

З вищенаведеного видно, що є необхідність пошуку такого критерію деформаційної здатності, який оцінював би і граничне розтягуючи навантаження і можливість максимального деформування досліджуваного тампонажного каменю при динамічному навантаженню.

Автори пропонують обрати в якості критерію оцінювання деформаційної здатності тампонажного каменю у разі динамічного навантаження відношення (21) динамічного модуля пружності ($E_Д$) до статичного модуля пружності ($E_{СТ}$) тампонажного каменю:

$$КДЗ = \frac{E_Д}{E_{СТ}} \tag{21}$$

За значенням КДЗ можна оцінити роботу цементного каменю як у статичних умовах, так і при динамічного навантаження.

Збільшення величини КДЗ призводить до підвищення деформаційної здатності тампонажного каменю і досягається шляхом збільшення динамічного модуля пружності за рахунок введення армуючих домішок.

Визначення статичного модуля пружності проводилось за відомою методикою [7] шляхом втискування циліндричного індентора в зразок цементного каменю після семи діб тужавіння. Втискування проводилось в п’яти точках в межах пружної деформації досліджуваного зразка.

Динамічний модуль пружності визначали шляхом вимірювання тривалості проходження повздовжніх та поперечних акустичних хвиль через досліджуваний цементний камінь, що являв собою зразки прямокутної форми розміром 20×20×40 мм віком 7 діб [6]. Дослідження проводились за допомогою серійного ультразвукового дефектоскопа DiO-562 LC , двох прямих суміщених ультразвукових п’єзоелектричних перетворювачів П111-2,5К1-2003, для введення поперечної акустичної хвилі та двох похилих ультразвукових п’єзоелектричних перетворювачів для введення повздовжньої акустичної хвилі. Відносна похибка вимірювання швидкості поперечних тат поздовжніх акустичних хвиль складала не більше 0,1 %. Розрахунки динамічного модуля пружності проводились за формулами (22) та (23):

$$E_{\text{д}} = c_{повз}^2 \frac{\rho}{g} \frac{(1+\mu)(1-2\mu)}{(1-\mu)}, \quad (22)$$

де $c_{повз}$ – швидкість проходження повздовжньої акустичної хвилі, м/с; ρ – густина гірської породи, кг/м^3; g – прискорення вільного падіння, м/с^2; μ – динамічний коефіцієнт Пуассона

$$\mu = \frac{0{,}5 - R^2}{1 - R^2}, \quad (23)$$

де R – відношення швидкості поперечної хвилі до швидкості повздовжньої хвилі.

В таб. 1 наведено результати аналізу якості контакту цементного каменю з обсадною колоною при різних видах динамічного навантаження.

З таб. 1 видно, що при будівництві та експлуатації свердловини навантаження на цементний камінь може коливатись в широкому діапазоні, однак у всіх випадках після зняття навантаження якість контакту суттєво погіршується, що є основною причиною виникнення негерметичності кріплення свердловини. Для забезпечення якісного розмежування пластів необхідно, щоб КДЗ = 50–70.

З метою покращення роботи цементного каменю в динамічних умовах проведено його армування волокнистими домішками. Зокрема, для порівняння було обрано найбільш розповсюджений армуючий матеріал для цементних розчинів – хризотил азбест (марка А-6-50). Разом з тим, досліджувався новий неорганічний матеріал – поліпропіленове фіброволокно довжиною 4 мм (ППФ-4).

Таблиця 1. Результати аналізу промислових даних щодо якості цементування за різного динамічного навантаження у свердловині

№	Вид навантаження	Навантаження, МПа	Якість контакту «цементний камінь-обсадна колона» за даними АКЦ, %		КДЗ
			до створення навантаження	після зняття навантаження	
1	Перфорація (кульова, торпедна, кумулятивна)	100–200	80–90	0–10 (в зоні перфорації)	66,7–133,3
2	Гідравлічний розрив пласта	300–600	50–60	0–7	200–400
3	Опресування обсадної колони	30–50	64–100	1–19	20–33,3
4	Механічне буріння	60–85	90	48	40–56,7

Поліпропіленова фібра (ППФ) – це волокно, яке виготовляють з поліпропілену методом екструзії. Довжина волокна становить 4–12 мм, діаметр 10 мкм. Поліпропілен, синтетичний матеріал густиною 910 кг/м^3 і температурою плавлення 160 °С, характеризується високою ударною міцністю, стійкістю до багаторазових згинань, зносостійкістю, низькою паро- та газопроникністю, високими діелектричними показниками. Поліпропілен не розчиняється в органічних розчинниках, стійкий до дії лугів, водостійкий (водопоглинання не перевищує 0,5 % після шести місяців зберігання у воді при кімнатних умовах). На відміну від поліетилену, поліпропілен є твердіший та термостійкіший. Результати досліджень наведені в таб. 2.

З даних таблиці 2 видно, що збільшення добавки ППФ сприяє підвищенню динамічного модуля пружності тампонажного каменю та, відповідно, КДЗ.

Таблиця 2. Результати вимірювань коефіцієнта деформаційної здатності тампонажного каменю, армованого поліпропіленовою фіброю та хризотил-азбестом

№	Рецептура розчину	Швидкість хвилі, м/с поперечна / повздовжня	Густина тампонажного каменю, кг/м^3	Модуль пружності E · 10^9 Па		$\frac{E_Д}{E_{СТ}}$
				динамічний	статичний	
1	Без домішок	3500 / 3333	1840	31,6	2,2	14,3
2	0,1 % ППФ	3405 / 3329	1840	55,8	1,53	36,5
3	0,2 % ППФ	3380 / 3315	1840	62,7	1,55	40,4
4	0,3 % ППФ	3230 / 3184	1835	74,9	1,61	46,5
5	0,4 % ППФ	3065 / 3029	1835	80,5	1,64	49,1
6	0,5 % ППФ	2879 / 2850	1830	90,6	1,70	53,3
7	0,6 % ППФ	2730 / 2710	1830	94,4	1,77	56,2
8	0,7 % ППФ	2617 / 2600	1830	102,5	1,86	55,1
9	0,8 % ППФ	2490 / 2477	1830	114,5	1,94	59,0
10	0,9 % ППФ	2315 / 2305	1825	118,6	2,05	57,9
11	1,0 % ППФ	2265 / 2256	1825	123,2	2,2	56,0
12	0,1 % А-6-50	3398 / 3300	1840	44,6	2,0	22,3
13	0,2 % А-6-50	3290 / 3200	1840	43,7	2,0	21,8
14	0,3 % А-6-50	3151 / 3080	1840	47,4	2,1	22,6
15	0,4 % А-6-50	3069 / 3011	1840	52,5	2,3	22,8
16	0,5 % А-6-50	2984 / 2939	1835	60,6	2,5	24,3
17	0,6 % А-6-50	2901 / 2862	1835	63,7	2,7	23,6
18	0,7 % А-6-50	2823 / 2791	1835	70,6	2,8	25,2
19	0,8 % А-6-50	2744 / 2714	1835	69,0	2,8	24,6
20	0,9 % А-6-50	2653 / 2627	1835	74,2	2,9	25,5
21	1,0 % А-6-50	2583 / 2559	1830	71,0	3,1	22,9

Висновки

При вмісті добавки ППФ 0,5–1,0 % значення КДЗ знаходиться у рекомендованих межах, проте слід враховувати, що 1 %-на концентрація є граничною за умови прокачуваності тампонажного розчину, тому в рецептуру розчину необхідно ввести домішки які дозволять зменшити відсотковий вміст ППФ не знижуючи при цьому КДЗ та не погіршуючи реологічні властивості розчину.

Домішка хризотил-азбесту забезпечує дещо вище статичне значення модуля пружності тампонажного каменю, але значно менший динамічний модуль пружності, ніж ППФ. Відповідно КДЗ з добавкою хризотил-азбесту знаходиться нижче допустимої величини, тобто тампонажний камінь з його домішкою не забезпечить необхідного рівня герметичності затрубного простору за динамічного навантаження на обсадну колону.

Текст аннотации на русском языке. Выполнено анализ существующих критериев оценки деформационной способности тампонажного камня. Рассмотрено механизм возникновения напряжений и деформаций системы «обсадная колона-цементный камень» с учетом динамического воздействия которое возникает внутри скважины. Обосновано выбор критерия оценки деформационной способности тампонажного камня в случае динамических нагрузок на крепь скважины. Описано методику и приведено результаты измерений предложенного коэффициента деформационной способности тампонажного камня армированного полипропиленовой фиброй и хризотил-асбестом. Определено направление исследований в дальнейшем.

***Ключевые слова**: напряжения, деформация, тампонажный камень, динамические нагрузки.*

Abstract in English. The analysis of current criterion of deformation value ability of plugging stone has been done. The mechanism of tension and deformation appearing in the system «casing column - plugging stone» in article with pointing of dynamic loads on well has been considered. The alternative of criterion of deformation value ability of plugging stone in case of dynamic load have been substantiated. It has been described the principles and results of proposed criterion measuring which was reinforced by chrysotile-asbestos and polypropylene fibers admixture. The direction of future research have been proved.

***Key words**: tension, deformation. plugging stone, dynamic load.*

Література

1. Чередниченко В. Г., Паринов П. Ф., Абрамов С. А. О деформациях и напряжениях возникающих в цементном кольце // Техника и технология промывки и крепления скважин. – Краснодар: ВНИИКрнефть, 1982. – С. 143–151.
2. Булатов А. И. Формирование и работа цементного камня в скважине. – М.: Недра, 1990. – 407 с.
3. Горський А. Т. Критерий оценки эффективности реагентов для регулирования времени схватывания тампонажних растворов. – Тюмень: Тр. ЗапСибНИГНИ, 1982. – Вып. 180. – С. 143–146.
4. Самсыкин А. В. Разработка композиционных тампонажних составов повышенной сопротивляемости динамическим воздействиям для сохранения герметичности крепи скважин: Автореф. дис. канд. техн. наук. – Уфа, 2010 – 20 с.
5. Колесник В. И. Совершенствование методов повышения герметичности заколонного пространства скважин подземных хранилищ: автореф. дис. канд. техн. наук. – Ивано-Франковск, 1990. – 18 с.
6. Феодосьев В. И. Сопротивление материалов. – М.: МГТУ им. М. Э. Баумана, 2003. – 592 с.
7. Свойства горных пород и методы их определения. / Под ред. М. М. Протодьяконова. – М.: Недра, 1969. – 392 с.

Надійшла 07.06.12