

АНАЛІЗ ТА ВДОСКОНАЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ ЗВОРОТНОГО ЦЕМЕНТУВАЛЬНОГО КЛАПАНА

І.Ф. Концур, М.М. Лях, В.В. Михайлюк, І.А. Засядько

*ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 42166,
e-mail: no@nupg.edu.ua*

Цементування обсадних колон є одним із найважливіших етапів будівництва нафтових і газових свердловин. Від якості цементування залежить як подальше проведення буріння свердловини так і її експлуатація після завершення буріння. Одним із найвідповідальніших елементів оснащення обсадних колон є зворотний клапан. У результаті аналізу існуючих конструкцій зворотних цементувальних клапанів виявлено ряд недоліків. Для пришвидшення спуску обсадних колон і підвищення якості їх цементування вдосконалено конструкцію зворотного цементувального клапана, який дозволяє автоматично заповнити буровим розчином обсадну колону при її спуску та проводити контрольну перевірку герметичності різьбових з'єднань до цементування колони.

Для прикладу в статті розглянуто запропонований зворотний клапан, який може бути використаний під час спуску експлуатаційної колони діаметром 168 мм. Розраховані перепади тиску в окремих елементах даного клапана, наведені результати теоретичних та експериментальних досліджень тиску розриву мембрани. Використавши метод кінцевих елементів, проведено імітаційне моделювання розриву мембрани.

Уточнено значення безрозмірного коефіцієнту для статичних і динамічних умов при застосуванні мембран із фрезерованими під кутом канавками.

Ключові слова: цементувальний клапан, зворотний цементувальний клапан, цементування обсадних колон, запобіжна мембрана.

Цементирование обсадных колонн является одним из важнейших этапов строительства нефтяных и газовых скважин. От качества цементирования зависит как дальнейшее проведение бурения скважины так и ее эксплуатация после завершения бурения. Одним из самых ответственных элементов оснастки обсадных колонн является обратный клапан. В результате анализа существующих конструкций обратных цементировочных клапанов выявлен ряд недостатков. Для ускорения спуска обсадных колонн и повышения качества их цементирования усовершенствована конструкция обратного цементировочного клапана, который позволяет автоматически заполнить буровым раствором обсадную колонну при ее спуске и проводить контрольную проверку герметичности резьбовых соединений до цементирования колонны.

Для примера в статье рассматривается предложенный обратный клапан, который может быть использован при спуске эксплуатационной колонны диаметром 168 мм. Рассчитаны перепады давления в отдельных элементах данного клапана, приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований давления разрыва мембраны. С использованием метода конечных элементов проведено имитационное моделирование разрыва мембраны.

Уточнено значение безразмерного коэффициента для статических и динамических условий при применении мембран с фрезерованными под углом канавками.

Ключевые слова: цементировочный клапан, обратный цементировочный клапан, цементирование обсадных колонн, предохранительная мембрана.

Casing cementing is considered to be one of the most important stages of oil and gas well construction. Further well drilling and its exploitation after ending the drilling greatly depend on the quality of the cementing process. One of the most important elements of casing mountings is a reverse valve. Having analyzed the existing constructions of the reverse cementing valve, a range of drawbacks has been discovered. To speed up the running of casings and the quality improvement of their cementation, the construction of the reverse cementing valve has been improved, allows the filling of the casing with drill mug and conducting the monitoring of the thread connection integrity to casing cementing.

The proposed reverse valve is viewed in the article as an example, which can be used for running the casing with 168 mm in diameter. The changes of pressure in some elements of the given valve have been calculated. The results of theoretical and experimental research of the diaphragm burst pressure have been introduced. The service simulation test of the diaphragm breakoff has been conducted applying the finite-element method.

The value of nondimensional coefficient for static and dynamic conditions when applying diaphragms with angled flutings has been specified.

Key words: cementing valve, reverse cementing valve, casing cementing, safety diaphragm.

Вступ

Цементування обсадних колон є важливим етапом будівництва свердловин. Від якості всього процесу цементування залежать ефективні показники подальшого будівництва свердловини та її експлуатації. Відомо, що тампонажний розчин зберігає свою плинність дуже обмежений час. Тому приділення уваги при-

строям, які пришвидшують процес спуску обсадних колон та підвищують якість цементування, залишається актуальним.

Аналіз результатів існуючих досліджень і публікацій

Якісне цементування – це герметичність обсадної колони та ізоляція пластів один від

одного і від денної поверхні [1]. При чому про якість цементування можна говорити не раніше періоду освоєння або експлуатації свердловин [2]. Для досягнення надійної герметичності необхідно забезпечити якісну адгезію між цементним каменем, обсадною колоною і стінками свердловини.

До основних факторів, які підвищують якість тампонажних робіт, відносяться ті, які забезпечують високу адгезію цементного каменю з обсадною колоною і стовбуром свердловини при найповнішому видаленні бурового розчину тампонажним із заданими властивостями, при найменших витратах ресурсів і часу [3].

Такими факторами є:

1) термін тужавіння і затвердіння тампонажного розчину, реологічні властивості, седиментаційна стійкість;

2) співвідношення і взаємозв'язок бурових і тампонажних розчинів;

3) режим руху бурових і тампонажних розчинів у колонному просторі;

4) об'єм тампонажного розчину, який закачується, і час його контакту із стінками свердловини;

5) ефективність розділення тампонажного, бурового розчинів і протискувальної рідини між собою;

6) використання автоматизованого контролю за проведенням процесу тампонування.

Для забезпечення якісного цементування необхідно правильно вибрати і регулювати технологічні параметри. При проведенні тампонажних робіт необхідно врахувати, що використання одного заходу викликає введення або зміну іншого.

Аналіз існуючих конструкцій зворотних цементувальних клапанів

Одним із відповідальних елементів оснащення обсадних колон є зворотний клапан, який розміщується над її башмаком і виконує такі функції:

1) полегшує обсадну колону під час її спуску у свердловину;

2) служить засобом захисту від можливих відкритих фонтанів під час спуску колон;

3) запобігає зворотному руху тампонажного розчину після завершення його циркуляції.

Сьогодні застосовують зворотні цементувальні клапани таких конструкцій:

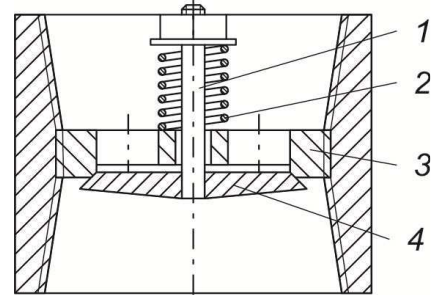
1) тарілчасті;

2) диференційні;

3) клапани ЦКО і ЦКОД;

Тарілчастий зворотний цементувальний клапан (рис. 1) відрізняється від інших простою конструкцією. Він пропускає рідину тільки в одному напрямку – із колони в затрубний простір. При спуску в свердловину обсадна колона, обладнана таким клапаном, витісняє всю рідину в затрубний простір і не забезпечується заповнення колони промивальною рідиною. Таким чином виникає необхідність доливу колон і, крім цього, обмежується швидкість її спуску.

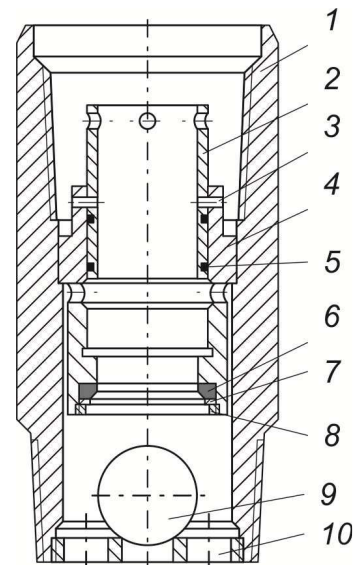
Тарілчасті зворотні клапани не забезпечують надійної герметичності.



1 – шток; 2 – пружина; 3 – сідло; 4 – тарілка

Рисунок 1 – Тарілчастий клапан

Більш досконалим є колонний диференційний зворотний клапан (рис. 2). Під час спуску колони з таким клапаном частина рідини витісняється колоною та направляється в кільцевий простір, інша частина рідини рухається через отвори в обмежувачі 10, коаксіальний та радіальний отвори у втулці 2 всередину колони. Кулька 9 під дією тиску рідини притиснута до ущільнення 6 і перекриває центральний отвір клапана. Після закінчення спуску колони і проведення промивання збільшують подачу цементувальних агрегатів. При цьому збільшується перепад тиску на радіальних отворах втулки 2, що, в свою чергу, призводить до зрізання штифтів 3 та перекривання втулкою вхідних отворів.



1 – корпус; 2 – втулка; 3 – штифти; 4 – сідло; 5 – ущільнюючі кільця; 6 – ущільнення; 7 – шайба; 8 – гайка; 9 – кулька з карболіту; 10 – обмежувач

Рисунок 2 – Колонний диференційний клапан

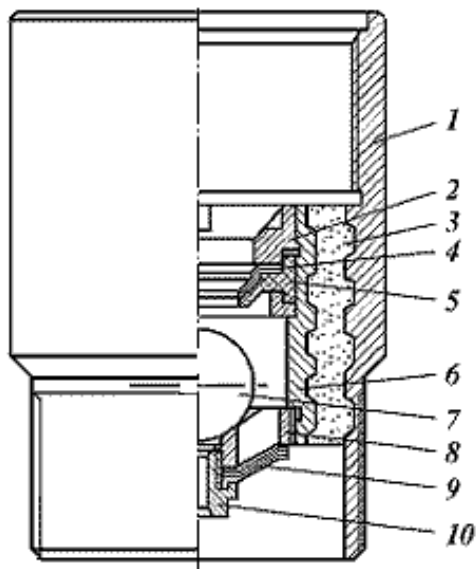
Основними недоліками конструкції цього клапана є:

1) наявність карболітової кульки, що має низьку міцність;

2) низька точність посадки кульки 9 в ущільненні 6, за рахунок чого погіршується герметичність;

3) складність конструкції та вища точність її виготовлення порівняно із тарілчастими клапанами.

Зворотні клапани ЦКОД і ЦКО (рис. 3) характеризуються підвищеною надійністю і забезпечують якісніше цементування [3].



1 – корпус; 2 – кільце натискне; 3 – цементний стакан; 4 – шайба розрізна; 5 – діафрагма; 6 – обойма; 7 – кулька; 8 – обмежувач; 9 – мембрана; 10 – дросель

Рисунок 3 – Клапан ЦКОД

Клапан встановлюється у нижній частині обсадної колони і спускається, як правило, без кульки 7. Кульковий затвір і дросель 10 змонтовані у циліндричній обоймі 6, виготовленій із алюмінієвого сплаву або сірого чавуну. Сама ж обойма фіксується у сталевому корпусі 1 через діафрагму 5, що легко розбурюється. При спуску колони периферійні отвори в обмежувачі 8 перекриті мембраною 9, а отвір в дроселі 10 відкритий. Промивальна рідина із свердловини через дросель 10 перетікає у колону і заповнює її. Під час проміжних промивань мембрана 9 відкривається вниз і відкриває периферійні отвори у обмежувачі 8, забезпечуючи вільний рух рідини. Після спуску перед завершальним промиванням у колону вкидають кульку 7, яка разом із потоком рідини проходить через отвір в натискному кільці 2, пакет розрізних шайб 4, гумову діафрагму 5 і сідає на обмежувач 8. Після цього дросельний клапан виконує функцію звичайного зворотного клапана.

Особливості конструкції клапанів типу ЦКОД дозволили:

1) зменшити висоту цементного стакана в колоні за рахунок усунення необхідності встановлення упорного стоп-кільця;

2) полегшити і прискорити розбурювання цементного стакана і обладнання низу колони;

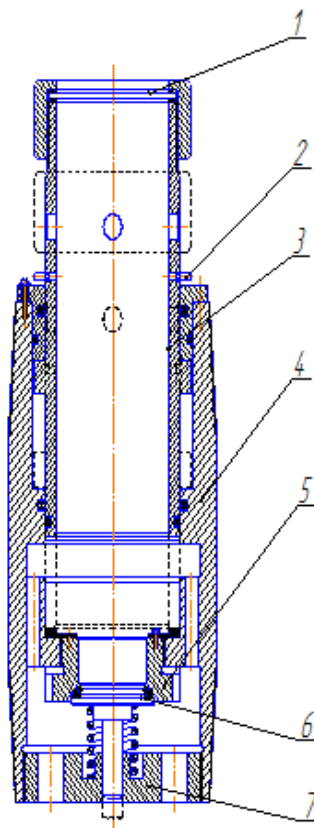
3) залишити колону на період затвердіння цементу без надлишкового тиску за рахунок підвищення герметичності клапана.

Клапан ЦКО конструктивно відрізняється від клапанів ЦКОД тільки відсутністю мембрани і дроселя. Всі інші деталі майже повністю уніфіковані. Однак їхня конструкція має недоліки. Так, для спуску кульки необхідно затратити більше часу, що приводить до збільшення вартості експлуатації бурової установки. Відповідно до технічної документації кожному типорозміру клапана ЦКОД відповідає тільки один діаметр дроселя у зворотному клапані при всьому існуючому широкому виборі їх спуску, що часто призводить до різноманітних ускладнень, наприклад, недостатнє заповнення промивною рідиною (у випадку коли отвір малий) і перелив (у випадку коли отвір великий). Крім цього, гумові мембрани на обмежувальних кільцях через низьку міцність не забезпечують надійного перекриття рідини.

Крім цього, всі розглянуті конструкції клапанів мають спільний недолік – відсутність можливості проводити контрольну перевірку герметичності різьбових з'єднань колони до її цементування, що є особливо важливим під час кріплення газових свердловин.

Викладення основного матеріалу

На основі проведеного аналізу конструкцій клапанів запропоновано зворотний клапан (рис. 4). Він встановлюється над башмаком обсадної колони і служить одночасно стоп-кільцем [5].



1 – мембрана; 2 – штифти; 3 – плаваюча втулка; 4 – корпус; 5 – сідло; 6 – тарілка; 7 – напрямна

Рисунок 4 – Запропонований зворотний клапан

Цей клапан виконує такі функції:

1) забезпечує автоматичне заповнення промивною рідиною обсадну колону під час її спуску у свердловину;

2) дає змогу проводити контрольну перевірку герметичності різьбових з'єднань колони обсадних труб перед її цементуванням;

3) дає можливість проводити процес цементування обсадної колони (пропустити цементний розчин у кільцевий простір і запобігти його зворотному руху всередину колони).

Будова і принцип дії запропонованого зворотного цементувального клапана наступні. Клапан складається з корпусу 4, що є сталевим циліндром, зовнішній діаметр якого рівний діаметру обсадної колони. В корпус встановлюється плаваюча втулка 3, яка утримується на корпусі за допомогою зрізних штифтів. Зверху на втулці розміщена мембрана 1, яка закріплена спеціальною гайкою. У корпусі за допомогою різьби кріпиться сідло клапана 5 та напрямна 7 із підпружиненою тарілкою 6, на конічній посадковій поверхні якої знаходиться ущільнювальне кільце круглого перерізу.

Під час спуску обсадної колони у свердловину промивна рідина проходячи через отвори у напрямній 7, коаксіальні отвори у корпусі 4 і радіальні отвори у втулці 3 заповнює колону. Після спуску колони на проектну глибину проводять контрольну перевірку герметичності різьбових з'єднань труб. Для цього збільшують подачу насосного агрегату, що призводить до збільшення перепаду тиску у радіальних отворах втулки 3, зрізуються штифти 2 і плаваюча втулка 3 під дією тиску рідини переміщується вниз, тим самим перекриває коаксіальні отвори у корпусі. При цьому перекриваються і радіальні отвори втулки. Стрибок тиску, що фіксується манометром цементувальної головки, буде свідчити про герметичність різьбових з'єднань колони.

Для контрольної перевірки герметичності різьбових з'єднань обсадної колони у конструкції клапана встановлена розривна мембрана 1 із двома фрезерованими під кутом канавками. Подальше збільшення тиску до заданого значення розриває мембрану 1. Після розриву мембрана втримується в місці кріплення. В подальшому проводимо кінцеве промивання свердловини, а клапан працює вже як звичайний зворотний. Цементний розчин, проходячи через центральний отвір у втулці 3, відхиляє тарілку 6 і через отвори напрямної 7 потрапляє в колонний простір.

Після закінчення процесу циркуляції тампонажного розчину і припинення роботи цементувальних агрегатів тарілка 6, під дією пружини і тиску тампонажного розчину із колонного простору притискується до сідла 5, запобігаючи зворотному руху цементного розчину у колону.

Гідравлічний розрахунок клапана проводиться із умови запобігання переливу рідини на усті при спуску колони [2]. Діаметр радіальних отворів у плаваючій втулці повинен забезпечувати необхідний перепад тиску для зрізання

штифтів. Перепад тиску в отворах клапана при промиванні і цементуванні свердловини визначається за формулою [2]:

$$P = \frac{\rho \cdot Q^2}{20 \cdot \alpha^2 \cdot f^2}, \quad (1)$$

де ρ – густина рідини;

Q – подача насосних агрегатів;

α – коефіцієнт витрат;

f – площа відповідного отвору.

Для прикладу розглянемо різні варіанти вибору кількості отворів і їх діаметрів у зворотному клапані для експлуатаційної колони діаметром 168 мм (d_1, d_2, d_3 – діаметри отворів, відповідно, у плаваючій втулці, корпусі та напрямній клапана).

| I | II |
|------------------------|------------------------|
| $d_1 = 10$ мм, 2 отв.; | $d_1 = 10$ мм, 6 отв.; |
| $d_2 = 10$ мм, 4 отв.; | $d_2 = 10$ мм, 8 отв.; |
| $d_3 = 20$ мм, 4 отв.; | $d_3 = 20$ мм, 6 отв.; |
| III | IV |
| $d_1 = 10$ мм, 8 отв.; | $d_1 = 15$ мм, 4 отв.; |
| $d_2 = 10$ мм, 8 отв.; | $d_2 = 10$ мм, 8 отв.; |
| $d_3 = 20$ мм, 6 отв.; | $d_3 = 20$ мм, 4 отв.; |

Вихідні дані:

$\rho_1 = 1250$ кг/м³ – густина промивальної рідини;

$\rho_2 = 1650$ кг/м³ – густина тампонажного розчину;

$\alpha_1 = 0,62; \alpha_2 = 0,9; \alpha_3 = 0,9$ – коефіцієнти витрат отворів;

$Q = 22$ л/с – подача насосного агрегату.

Результати перепадів тиску при промиванні свердловини зведені у табл. 1, а при цементуванні – у табл. 2.

У вдосконаленій конструкції зворотного цементувального клапана необхідно виконувати отвори за IV варіантом (що забезпечить мінімальний сумарний перепад тиску).

Дійсний сумарний перепад тиску в клапані при промиванні і цементуванні свердловини буде нижчий, за рахунок його зменшення в отворах корпусу (P_2), оскільки більша частина рідини пройде через відкритий тарілчастий клапан.

Для контрольної перевірки герметичності різьбових з'єднань колони обсадних труб в конструкції цементувального клапана передбачено мембрану, виготовлену з латуні Л63-3 ГОСТ 931-90, границя міцності якої рівна 300 МПа. За технологією проведення цементування мембрана повинна розриватися. Спочатку при лабораторних випробуваннях застосовувались різні типи запобіжних мембран: плоскі, випуклі, з широкою кільцевою канавкою, з ризками, з фрезерованими під кутом канавками. Однак враховуючи той факт, що при контрольній перевірці герметичності різьбових з'єднань колони існує ймовірність утворення зайвих пластичних деформацій мембрани, уламки від розриву якої можуть засмітити клапанний ву-

Таблиця 1 – Перепади тиску в отворах клапана при промиванні свердловини

| Варіант | Перепад тиску, МПа | | | Сумарний, $\sum P_{\text{пр}}$ |
|---------|-------------------------|--------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| | В отворах втулки, P_1 | В отворах корпусу, P_2 | В отворах напрямної, P_3 | |
| I | 31,92 | 3,78 | 0,23 | 35,94 |
| II | 3,54 | 0,94 | 0,10 | 4,58 |
| III | 1,99 | 0,94 | 0,10 | 3,03 |
| IV | 1,58 | 0,94 | 0,23 | 2,75 |

Таблиця 2 – Перепади тиску в отворах клапана при цементуванні свердловини

| Варіант | Перепад тиску, МПа | | | Сумарний, $\sum P_{\text{ц}}$ |
|---------|-------------------------|--------------------------|----------------------------|-------------------------------|
| | В отворах втулки, P_1 | В отворах корпусу, P_2 | В отворах напрямної, P_3 | |
| I | 42,14 | 4,99 | 0,312 | 47,44 |
| II | 4,68 | 1,25 | 0,138 | 6,07 |
| III | 2,63 | 1,25 | 0,138 | 4,02 |
| IV | 2,08 | 1,25 | 0,312 | 3,64 |

зол, що призведе до зниження герметичності і надійності клапана, а тому запропоновано використовувати мембрану з двома фрезерованими під кутом канавками (рис. 5). Дані концентратори напружень дозволяють мембрані повністю розкриватися, звільняючи при цьому прохідний отвір і не засмічуючи уламками клапанний вузол.

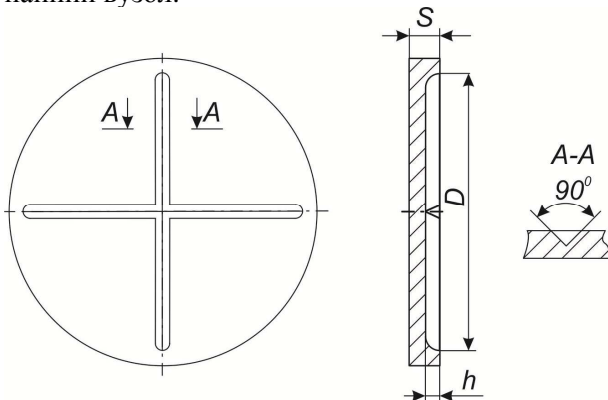


Рисунок 5 – Запобіжна мембрана

Тоді напруження розриву в мембрані будуть:

$$\sigma_p = \frac{Q_p}{F_p}, \quad (2)$$

де Q_p – зусилля розриву, Н;

F_p – площа розриву, м².

Площа розриву мембрани визначається за формулою:

$$F_p = l(\delta - h) \cdot i, \quad (3)$$

де l – довжина одного фрезерованого паза, м;

δ – товщина мембрани, м;

h – глибина паза, м;

i – число пазів.

Зусилля розриву мембрани товщиною 3 мм, з глибиною паза $h=1,8$ мм, довжиною $l=90$ мм, кількістю пазів – 2.

$$Q_p = \sigma_p \cdot F_p, \quad (4)$$

$$Q_p = 300 \cdot 10^6 \cdot 0,09 \cdot (0,003 - 0,0018) \cdot 2 = 0,0648 \cdot 10^6 = 64800 \text{ Н.}$$

Тиск, при якому розривається мембрана:

$$P = \frac{Q_p}{F}, \quad (5)$$

де F – площа, яка сприймає зусилля розриву Q_p .

$$F = \frac{\pi \cdot D^2}{4}, \quad (6)$$

$$F = \frac{3,14 \cdot 0,09^2}{4} = 6,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2,$$

де D – внутрішній діаметр плаваючої втулки, м.

Тиск, при якому розривається мембрана буде становити:

$$P = \frac{64800}{6,4 \cdot 10^{-3}} = 10,125 \text{ МПа.}$$

Наступна формула найбільш поширена і проста, що використовується для розрахунку запобіжних мембранних клапанів [4]:

$$P = \frac{k \cdot \sigma_s \cdot \delta}{D}, \quad (7)$$

де P – тиск розриву, МПа;

k – емпіричний безрозмірний коефіцієнт, приймається в межах 3,0...4,2;

σ_s – границя міцності матеріалу мембрани, МПа;

δ – вихідна товщина мембрани, $\delta=3-1,8=1,2$ мм;

D – робочий діаметр, $D = 90$ мм.

$$P = \frac{3,0 \cdot 300 \cdot 1,2}{90} = 12 \text{ МПа.}$$

Розрахунок мембрани [4] застосовуваний тільки для орієнтовного визначення розривного тиску в залежності від її товщини і діаметра.

Значення, віднайдене за формулою (5) віднімається від значення, знайденого за формулою (7) через велике значення емпіричного безрозмірного коефіцієнта.

Експериментальні випробування мембрани з фрезерованими під кутом канавками проводилися для визначення безрозмірного коефіцієнта (для статичних і динамічних умов).

$$K = \frac{P \cdot D}{\sigma_{\delta} \cdot \delta}$$

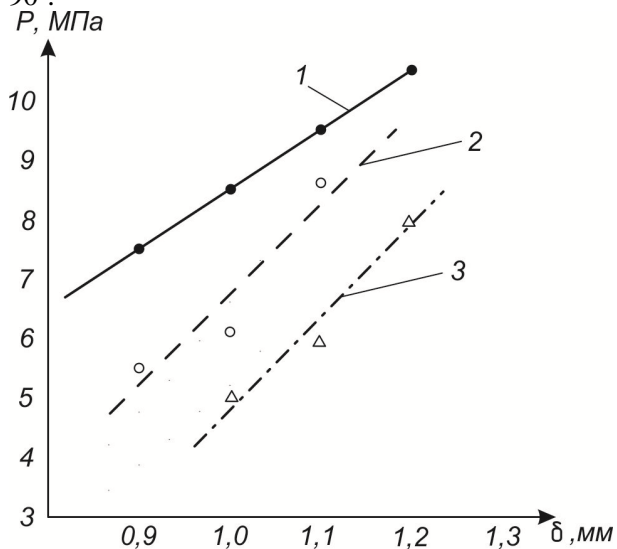
Спершу проводились експерименти для визначення мінімальної кількості повторень одного режиму, що забезпечує показник точності вимірювань 3...5% при ймовірності 0,9. Доведено, що кожен дослід необхідно повторити не менше трьох разів.

Статичні випробування мембрани проводились 3...5% водняним розчином емульсії при подачі насоса 0,5 л/с, а динамічні – технічною водою при подачі насоса 20 л/с. Тиск розриву мембрани фіксувався зразковим манометром.

Значення коефіцієнта К для статичних умов склали 1,8... 2,7, а для динамічних умов – 1,3...2,5.

Експериментальні значення безрозмірного коефіцієнта показують, що при застосуванні мембран з фрезерованими під кутом канавками необхідно враховувати також умови їх роботи (статичні чи динамічні).

На рис. 6 приведені теоретичні та експериментальні залежності тиску розриву мембрани клапана із фрезерованими канавками під кутом 90° .



1 – розрахункова; 2 – статичні умови випробування (подача насоса 0,5 л/с); 3 – динамічні умови випробування (подача насоса 20 л/с)

Рисунок 6 – Залежності тиску розриву мембран клапана із фрезерованими канавками під кутом 90°

Також приведено імітаційне моделювання (рис. 7) мембрани з фрезерованими під кутом канавками в програмному середовищі, в якому використовується метод кінцевих елементів.

Explicit Dynamics
Equivalent Stress
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: MPa
Time: 9,3212e-005
14.02.2017 10:39

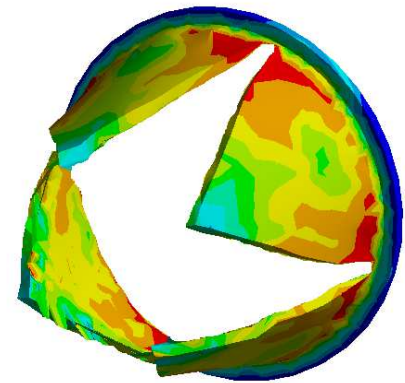
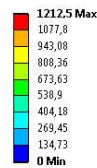


Рисунок 7 – Результати імітаційного моделювання мембрани з фрезерованими канавками під кутом 90°

Висновки

Проведені дослідження дали змогу сформулювати такі висновки:

- запропонований зворотний клапан пришвидшить спуск обсадних колон, покращить технологію проведення тампонажних робіт, підвищить якість кріплення свердловин та культуру праці робітників;

- цей зворотний клапан може використовуватись у вертикальних, горизонтальних та похилоскерованих свердловинах;

- даний зворотний цементувальний клапан забезпечить можливість проведення контрольної перевірки герметичності різьбових з'єднань колони до її цементування;

- отримані уточнені значення емпіричного безрозмірного коефіцієнта можуть використовуватись при розрахунку запобіжних мембран з фрезерованими канавками під заданим кутом.

Література

1 Лівак І.Д., Концур І.Ф., Шостаківський І.І. Основи нафтогазової справи. Навчальний посібник. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2014. – 432 с.

2 Бабаян Э.В., Черненко А.В., Мойса М.Ю. Инженерные расчеты при креплении нефтяных и газовых скважин. – Краснодар: Совет. Кубань, 2012. – 384 с.

3 Коцкулич Я.С., Кочкодан Я.М. Буріння нафтових і газових свердловин. Підручник. – Коломия, Вік, 1999. – 504 с.

4 Кондратьева Т.Ф. Предохранительные клапаны. – М: Машиностроение, 1976. – 232 с.

5 Концур І.Ф., Лях М.М., Маслій А.Я. Клапан для обсадних колон. Патент на корисну модель. UA №75505 МПК E21B 34100 Опубл. 10.12.2012. Бюлетень №23.

Стаття надійшла до редакційної колегії
23.05.17

Рекомендована до друку
професором Карпашем М.О.
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)
професором Майстренком А.Л.
(Інститут надтвердих матеріалів
ім. В. М. Бакуля НАН України, м. Київ)