

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ДИСПЕРСНОАРМОВАНОГО ТАМПОНАЖНОГО КАМЕНЮ ПІД ЧАС СТАТИЧНИХ ТА ДИНАМІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ

В.І. Гриманюк

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 504691,
e-mail: *tdcentre@nung.edu.ua*

Показано актуальність проблеми боротьби з міжколонними тисками. Проаналізовано основні причини неякісного кріплення свердловин. Акцентовано увагу на негативному впливі динамічних навантажень на цементний камінь за колоною в процесі поглиблення свердловини. Обґрунтовано вибір типу дисперсно-армуючих домішок для проведення досліджень. Обрано методіку проведення експерименту при дослідженні впливу динамічних навантажень на цементний камінь. Здійснено порівняльну оцінку впливу домішок хризотил-азбесту та поліпропіленової фібри на статичну та динамічну міцність цементного каменю в різний період його твердіння. Обґрунтовано результати отриманих лабораторних досліджень та сформувано висновки щодо доцільності використання добавки поліпропіленової фібри до цементного розчину.

Ключові слова: тампонажний камінь, міцність, динамічні навантаження, поліпропіленова фібра, хризотил-азбест.

Показано актуальність проблеми боротьби з міжколонними тисками. Проанализированы основные причины некачественного крепления скважин. Акцентировано внимание на негативном воздействии динамических нагрузок на крепление скважины при ее углублении. Обоснован выбор типа дисперсно-армирующей добавки для проведения исследований. Выбрана методика проведения эксперимента для исследования влияния динамических нагрузок на цементный камень. Проведена сравнительная оценка влияния добавок хризотил-асбеста и полипропиленовой фибры на статическую и динамическую прочность цементного камня в разное время его твердения. Обоснованы результаты исследований и сформулированы заключения относительно целесообразности использования полипропиленовой фибры в качестве добавок к цементному раствору.

Ключевые слова: тампонажный камень, прочность, динамические нагрузки, полипропиленовая фибра, хризотил-асбест.

The relevance of internal pressure problem is considered in the article. The main causes of inferior casing have been analyzed. The pernicious effect of the pastematrix dynamic loading while drilling has been specified. The fibrous admixture type and the methodology for laboratory investigations have been substantiated. A comparative assessment of the chrysotile-asbestos and polypropylene fibers admixture affecting static and dynamic strength of cement stone in different periods of its hardening has been carried out. The results and conclusions about practical use of polypropylene fibers in cement grout have been proved.

Keywords: plugging stone, endurance capability, dynamic loading, polypropylene fiber, chrysotile-asbestos

Підвищена увага до якості кріплення нафтових та газових свердловин зумовлена тим, що цей процес є завершальною стадією будівництва гірничої виробки. Будь-які прорахунки під час вибору цементного розчину та технологічного виконання процесу тампонування можуть звести нанівець всі переваги, що були досягнуті в процесі буріння свердловини. Неякісне кріплення свердловини, зазвичай, є причиною нафтогазопроявів, грифоноутворень та відкритих фонтанів, які виникають після введення свердловини в експлуатацію. Це неминуче призводить до забруднення навколишнього середовища, міжпластових перетоків, неправильної оцінки нафтогазових запасів, значних витрат коштів на капітальний ремонт свердловин, а в деяких випадках – до виробничого травматизму.

Попри численні наукові розробки в напрямку покращення реологічних та механічних властивостей тампонажних матеріалів [1], аналіз промислових даних [2] вказує на все ще існуючу проблему якісного кріплення свердловини. За даними автора [3] в акціонерному товаристві “Газпром” (Росія) 25-30% від загальної

кількості свердловин, що перебувають в експлуатації з 1997 року, мають різної величини міжколонні тиски (МКТ). Автор [1] наводить також дані про те, що в кожній третій свердловині на українських підземних сховищах газу спостерігаються МКТ. Причиною негерметичності кріплення вважаються прояви дефектів, сформованих в процесі буріння та кріплення свердловин.

В таблиці 1 виділено ряд основних причин неякісного кріплення свердловини та їх ознаки, що впливають з узагальнених результатів досліджень різних авторів, які працюють над проблемою виникнення МКТ у свердловинах.

Аналіз сучасних літературних джерел [4, 5] вказує на значний прогрес в сфері розробок спеціальних тампонажних розчинів для покращення якості кріплення свердловини, однак на цементний камінь діє ряд навантажень, які при проектуванні свердловини не враховуються. Ці навантаження виникають в свердловині впродовж всього терміну її спорудження та експлуатації, а, отже, безпосередньо впливають на цілісність цементного каменю поза обсадною ко-

Таблиця 1 — Основні причини неякісного кріплення свердловин та їх характеристики

| № з/п | Причини неякісного кріплення свердловин | Ознаки |
|-------|---|---|
| 1 | Зниження тиску в обсадній колоні в процесі ОЗЦ | Утворення каналів між обсадною колоною та цементним кільцем |
| 2 | Низький коефіцієнт вилучення фільтраційної кірки бурового розчину з міжколонного простору | Утворення каналів між обсадною колоною, цементним кільцем та/або гірською породою |
| 3 | Пониження тиску на пласті | Проникнення пластового флюїду в цементний розчин. |
| 4 | Формування цементного каменю при безпосередньому контакті з цементною кіркою | Зміна макро- та мікроструктури цементного каменю в контактній зоні. |
| 5 | Деформація обсадної колони при її опресуванні та інших технологічних операціях | Утворення каналів між обсадною колоною та цементним кільцем. |
| 6 | Деформація обсадної колони та цементного каменю в процесі механічного буріння | Поява тріщин в цементному камені та/або його остаточне руйнування. |

лоною та якість його зчеплення з обмежуючими поверхнями. Йдеться про динамічні навантаження, які призводять до руйнування цементного кільця та зношування обсадної колони.

Динамічне навантаження — це навантаження, при якому зміна величини, місця та напрямку прикладання сили відбувається так швидко, що під час розрахунку необхідно враховувати значні сили інерції [6]. Наслідком динамічних навантажень є значні напруження та деформації в місцях їх прикладання, що може призвести до зміни механічних властивостей цементного каменю і його руйнування.

Вже при подальшому поглибленні свердловини після цементування обсадної колони важливо зберегти цілісність та герметичність цементного каменю за нею. При бурінні роторним способом за рахунок крутного моменту та сил тертя до обмежуючої поверхні в колоні бурильних труб стає можливим скручування бурильної колони, внаслідок чого виникає динамічний контакт із зовнішніми стінками обсадних труб, від яких цементному каменю передаються ударні імпульси.

Автор [7] наводить інформацію про зниження якості цементування в результаті виконання бурових робіт в обсадній колоні. До виконання цих робіт коефіцієнт якості цементування, який визначається відношенням довжини зацементованої частини колони, яка має хороший контакт, до загальної довжини інтервалу підйому цементного кільця складав 89,1%. Після цього було проведено розбурювання цементного стакана та деталей пакера тришарошквим долотом з використанням турбобура і насосно-компресорних труб. Результатом виконання таких робіт стало зменшення коефіцієнта якості цементування до 47,8%. Зменшення площі контакту пояснюється биттям бурильної колони до стінки обсадної колони з частотою від 90 до 120 ударів на хвилину. При цьому енергія удару досягає 0,03...0,34 кДж. Ударний вплив колони бурильних труб триває циклічно впродовж всього терміну буріння свердловини. Таким чином, навіть технічно нескладні опера-

ції в свердловині призводять до значного погіршення контакту “цементний камінь — обсадна колона”.

Враховуючи вищенаведені факти, метою своїх досліджень автор статті обрав створення цементного розчину, який би міг утворити ударостійкий цементний камінь і не створити при цьому технологічних проблем в процесі його закачування у свердловину.

У статті наводяться результати досліджень цементного каменю, дисперсно армованого поліпропіленою фіброю. Кінцевою метою досліджень є зменшення негативного впливу періодичних динамічних навантажень в свердловині на якість цементування обсадних колон. Також в статті проводиться порівняльний аналіз міцнісних характеристик цементного каменю, виготовленого із запропонованого матеріалу та найбільш поширеного мінерального армуючого матеріалу — хризотил-азбесту.

Поліпропіленова фібра (ППФ) — це волокно, яке виготовляється з поліпропілену методом екструзії. Довжина волокна складає від 4 до 12 мм, діаметр — 10 мкм. Поліпропілен — це синтетичний матеріал густиною 910 кг/м³ і температурою плавлення 160 °С; характеризується високою ударною міцністю, стійкістю до багаторазових згинань, зносостійкістю, низькою паро- й газопроникністю, високими діелектричними показниками. Поліпропілен не розчиняється в органічних розчинниках, стійкий до дії лугів, водостійкий (водопоглинання складає менше 0,5% після 6 місяців у воді за кімнатних умов). На відміну від поліетилену, поліпропілен твердіший та термостійкіший.

Вибір довжини волокна. Згідно з дослідженнями [1] віддаль від кінця волокна понад $l_s = (5...6) \cdot d_s$ вважають неефективною з точки зору розподілу навантаження. Виходячи з цього, оптимальна довжина волокна мала б не перевищувати 50...60 мкм. Найкоротше поліпропіленове волокно, яке виготовляється промисловою Україною, складає 4 мм. Саме цей тип волокна було обрано для подальших досліджень. Окрім того, практично доведено, що при

Таблиця 2 – Властивості цементного розчину з додаванням поліпропіленової фібри довжиною 4мм

| Тип добавки | Вміст добавки, % | Густина порошку, кг/м ³ | Густина розчину, кг/м ³ | Розтічність, см | Фільтрація, см ³ /30 хв |
|-------------|------------------|------------------------------------|------------------------------------|-----------------|------------------------------------|
| Без добавок | 0 | 3100 ... 3200 | 1860 | 22 | 188 |
| ППФ | 0,25 | 910 | 1860 | 20,7 | 170 |
| | 0,5 | | 1850 | 19,8 | 150 |
| | 0,75 | | 1850 | 19,5 | 136 |
| | 1 | | 1845 | 18 | 127 |

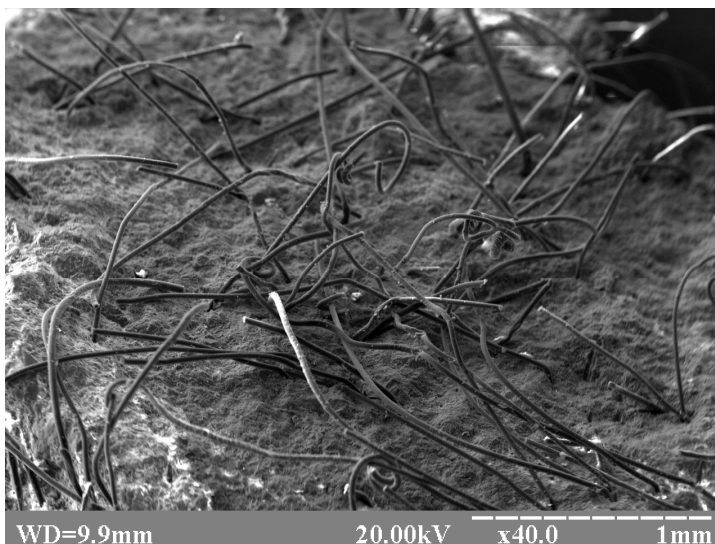


Рисунок 1 — Поліпропіленова фібра довжиною 4 мм в цементному камені під мікроскопом (x40) М 40:1



Рисунок 2 — Характер розташування ППФ в тріщині цементного каменю (x20) М 20:1

використанні довших волокон в процесі перемішування цементного розчину відбувається грудкування фібри та її намотування на механізми перемішування, в результаті чого фібра нерівномірно розподіляється в об'ємі цементного розчину.

Вибір кількості волокна. Керуючись реологічними характеристиками цементного розчину (таблиця 2), а саме його розтічністю, було прийнято рішення про обмеження кількості волок-

на до 1% , оскільки за більшого вмісту волокна розтічність менша 18см, що не дозволяє технологічно забезпечити гідравлічну подачу тампонажного розчину в свердловину.

На рисунках 1 та 2 зображено форму та характер розміщення ППФ в цементному камені.

Дослідження властивостей цементного розчину і каменю проводились у відповідності до ДСТУ БВ.2.7.-86-99 [8]. Результати досліджень зведені до таблиці 3 та частково зобра-

Таблиця 3 — Міцнісні характеристики досліджуваних сумішей

| № з/п | Тип домішки | Вміст домішки, % | Межа міцності, МН/м ² | | | |
|-------|-----------------------------|------------------|----------------------------------|--------------|--------------|--------------|
| | | | 2 доби | 7 діб | 14 діб | 28 діб |
| 1 | ПЦТ-I-50 | 0 | <u>2.6</u> | <u>5.5</u> | <u>10.09</u> | <u>17.66</u> |
| | | | 0.26 | 1.03 | 1.23 | 1.59 |
| 2 | Поліпропіленова фібра (4мм) | 0,25 | <u>2.94</u> | <u>12.18</u> | <u>16.24</u> | <u>18.67</u> |
| | | | 0.5 | 1.00 | 1.47 | 1.65 |
| 3 | | 0,5 | <u>3.36</u> | <u>13.46</u> | <u>19.89</u> | <u>29.85</u> |
| | | | 0.39 | 1.3 | 1.49 | 2.22 |
| 4 | | 0,75 | <u>4.25</u> | <u>14.63</u> | <u>21.18</u> | <u>31.13</u> |
| | 0.85 | | 1.92 | 2.25 | 2.55 | |
| 5 | 1 | <u>5.42</u> | <u>16.22</u> | <u>23.18</u> | <u>32.40</u> | |
| | | 1.03 | 2.17 | 2.60 | 2.82 | |
| 6 | Азбест марки А-6-50 | 0,25 | <u>3.62</u> | <u>8.41</u> | <u>15.02</u> | <u>16.82</u> |
| | | | 0.52 | 0.76 | 1.34 | 2.60 |
| 7 | | 0,5 | <u>3.36</u> | <u>10.51</u> | <u>14.72</u> | <u>20.80</u> |
| | | | 0.56 | 1.07 | 1.34 | 2.80 |
| 8 | | 0,75 | <u>3.26</u> | <u>15.05</u> | <u>18.69</u> | <u>28.90</u> |
| | 0.95 | | 1.88 | 2.44 | 3.90 | |
| 9 | 1 | <u>4.06</u> | <u>18.99</u> | <u>21.13</u> | <u>36.16</u> | |
| | | 1.24 | 2.15 | 3.36 | 4.14 | |

Примітка: значення в чисельнику — міцність на стиск, в знаменнику — міцність на розтяг

жені на рисунках 3 та 4. Окрім того, на графіках відображено результати аналогічних досліджень з використанням в якості дисперсноармуючої домішки найбільш поширеного мінерального армуючого матеріалу — хризотил-азбесту 7-го сорту.

Як видно з результатів досліджень, цементний камінь з домішкою азбесту у віці 28 діб має вищу межу міцності на розтяг та приблизно рівну межу міцності на стиск порівняно з аналогічною концентрацією поліпропіленової фібри в цементному розчині за будь-яких концентрацій домішки. Це пояснюється кращою інтеграцією фібрил хризотилу в матриці цементного каменю, хоча застосування ППФ також підвищує міцність цементного каменю відносно цементу без добавок, що свідчить про достатньо хороший контакт ППФ з цементним каменем.

Як згадувалось раніше, окрім статичного навантаження на кріплення свердловини діє і динамічне навантаження. Враховуючи цей факт, автором статті було проведено ряд досліджень, пов'язаних з визначенням впливу динамічних навантажень на цілісність цементного каменю з додаванням ППФ та азбесту. З цією метою автором використана методика визначення коефіцієнта міцності методом товчення, запропонована М.М. Протодьяконовим [9]. Суть методики полягає у визначенні роботи, затраченої на руйнування цементного зразка певної маси під дією вільно падаючого вантажу

з заданої висоти. Згідно з дослідженнями автора [9], робота, затрачена на подрібнення одного і того ж зразка, залежить від висоти падіння, маси вантажу та кількості прикладених до взірця ударів, і визначається за формулою:

$$A = \frac{P \cdot h \cdot n}{m},$$

де P — вага падаючого вантажу, Н;
h — висота падіння вантажу, м;
n — кількість ударів вантажу до зразка;
m — маса досліджуваного зразка, кг.

Найбільший коефіцієнт використання роботи удару досягається шляхом зміни кількості ударів, за умови що ці удари є “критичними”, тобто в результаті цих ударів відбувається інтенсивне руйнування зразка.

Експериментальним шляхом визначено, що вантаж вагою 27,5 Н, який падає з висоти 0,7 м, створює удар, що призводить до критичного руйнування цементного каменю об'ємом $5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$ з включенням досліджуваних домішок. Водосумішеве відношення в усіх цементних розчинах було прийнято однаковим — 0,5. Результат кожного експерименту — середнє значення чотирьох дослідів на однакових зразках з однаковим компонентним складом. Частково результати експерименту представлені в таблиці 4. Загальні результати досліджень подаються у вигляді графічної залежності на рисунку 5. На рисунку 6 зображено проміжний

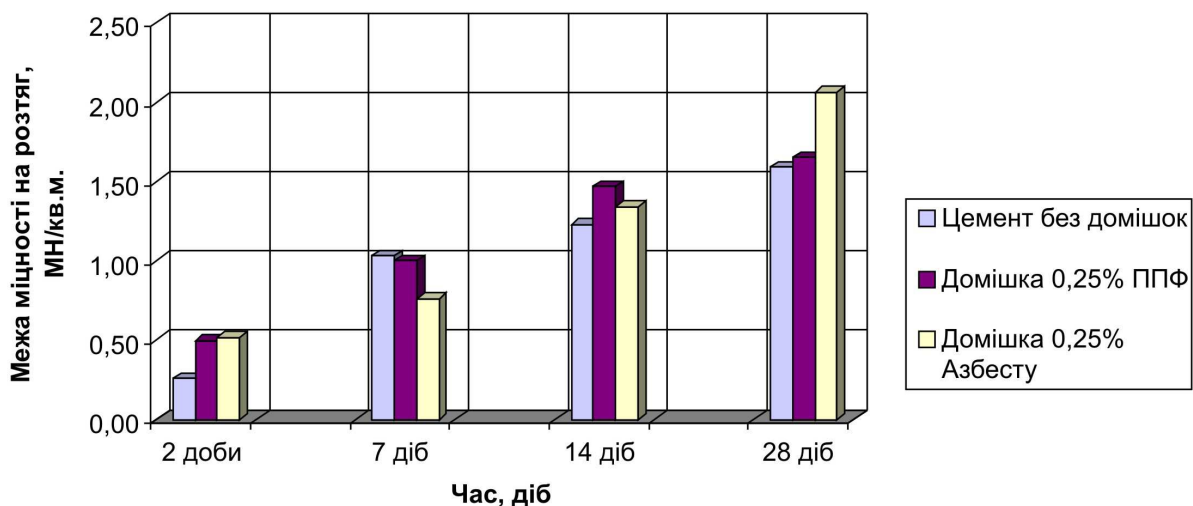


Рисунок 3 — Залежність міцності на розтяг цементного каменю з 0,25%-ною концентрацією домішки від часу твердіння

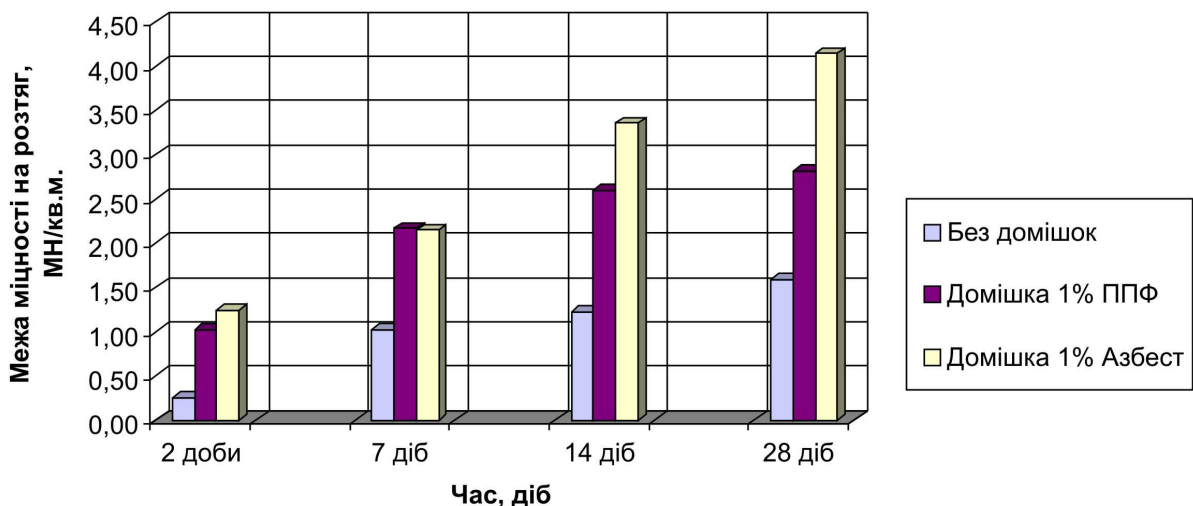


Рисунок 4 — Залежність міцності на розтяг цементного каменю з 0,25%-ною концентрацією домішки від часу твердіння

Таблиця 4 — Результати досліджень залежності величини енергії, затраченої на руйнування зразка у віці 28 діб, від типу домішки

| № | Назва домішки та її вміст в розчині | Маса цементного зразка, кг | Кількість ударів | Енергія, затрачена на руйнування зразка, $\times 10^3$ Дж/кг | Середнє значення енергії, $\times 10^3$ Дж/кг |
|----|-------------------------------------|----------------------------|------------------|--|---|
| 1 | Без домішок | 0,094 | 22 | 4,5 | 4,5 |
| 2 | | 0,095 | 21 | 4,2 | |
| 3 | | 0,094 | 23 | 4,7 | |
| 4 | | 0,094 | 22 | 4,5 | |
| 5 | 1 % Азбесту А-6-50 | 0,093 | 26 | 5,4 | 5,7 |
| 6 | | 0,092 | 27 | 5,6 | |
| 7 | | 0,092 | 27 | 5,6 | |
| 8 | | 0,093 | 29 | 6,0 | |
| 9 | 1 % ППФ-4 | 0,092 | 55 | 11,5 | 11,7 |
| 10 | | 0,092 | 56 | 11,7 | |
| 11 | | 0,093 | 57 | 11,8 | |
| 12 | | 0,093 | 56 | 11,6 | |

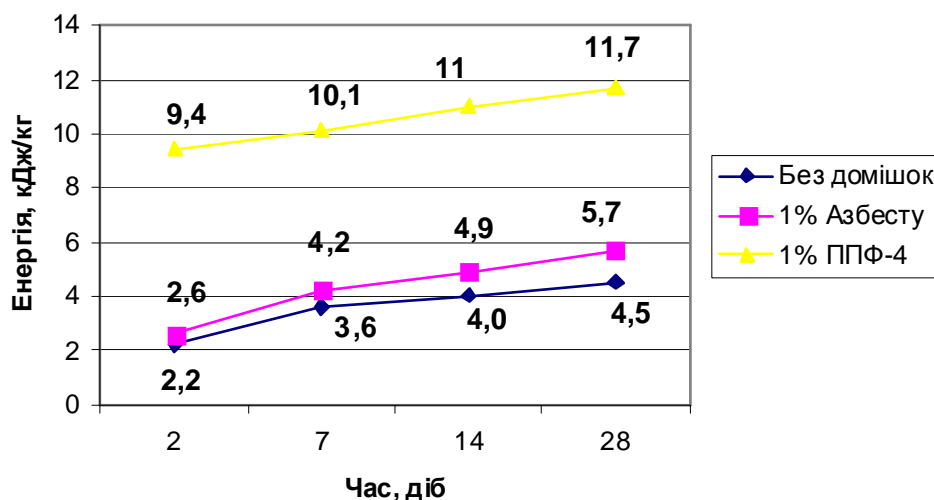


Рисунок 5 — Залежність енергії, затраченої на руйнування цементного каменю, від типу домішки та часу його твердіння



Рисунок 6 — Результат дроблення цементного каменю без домішок (з ліва) та з додаванням 1% ППФ-4 (з права) після 22-ох ударів

результат експерименту після прикладання динамічного навантаження до цементного каменю без домішок та з включенням одновідсоткової добавки ППФ-4.

Висновки

Поліпропіленова фібра, як і волокна хризотил-азбесту, значно підвищують міцнісні характеристики цементного каменю. При цьому, значення границі міцності на стиск для обох матеріалів приблизно співпадає протягом всього періоду тужавіння цементного каменю. Однак, міцність на розтяг досліджуваних зразків ППФ та азбесту є різною. Так, у віці 7-8 діб починає зростати “розрив” між цими значеннями, котрий до 28 діб може скласти 2-2,5 рази. Така різниця пояснюється поступовою інтеграцією волокон хризотил-азбесту в матрицю цементного каменю аж до повного її поглинання, в той час як волокна ППФ мають частковий контакт з цементним каменем і зберігають його впродовж всього періоду гідратації цементу.

З іншого боку, цементний камінь з вмістом ППФ вдвічі краще, ніж з азбест, та втричі кра-

ще за цемент без добавок, сприймає динамічні навантаження, які значно частіше виникають у свердловині та є вкрай небезпечними з точки зору збереження герметичності за колонного простору. Цей факт пояснюється збереженням властивостей механічної пружності ППФ незалежно від середовища, терміну застосування. Ударна хвиля, котра розповсюджується в цементному камені при раптових динамічних навантаженнях, гаситься за рахунок пружних властивостей поліпропілену, що сприяє збереженню цілісності самого цементного каменю. Щодо азбесту, то через свою хімічну взаємодію з цементом він з часом набуває таких самих механічних властивостей, що і цементний камінь, тобто стає міцним, але крихким.

До переваг використання ППФ можна також віднести її властивість “зшивати” частини цементного каменю, що були відокремлені внаслідок його розколювання (рис. 2). Незважаючи на частковий контакт фібри з матрицею цементу, фіброволокно перешкоджає розкриттю тріщини після прикладання критичного руйнівного навантаження до цементного каменю. Окрім того, характерне розміщення фібри попереджає

тангенціальне зміщення поверхонь тріщини між собою, що в подальшому сприяє ефекту “самозаліковування” тріщини.

Подальші наукові дослідження планується спрямувати на вдосконалення рецептури розчину, з метою його здешевлення та покращення механічних властивостей для циклічних термобаричних умов тужавіння.

Література

1 Сухін Є.І. Елементи створення, формування та експлуатації підземних сховищ газу / Є.І. Сухін, Б.І. Навроцький. – К. : ППНВ, 2004. – 528 с. – ISBN 966-8638-00-X.

2 Тершак Б.А. Стан та перспектива забезпечення надійності заколонного простору кріплення свердловин на пізній стадії розробки родовищ України [Текст] / Б.А. Тершак, Я.С. Коцкулич, М.В. Сенюшкович // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2007. – №2(23). – С. 123-126.

3 Незаметдинов Р.М. Совершенствование технологии усовершенствования негерметичности эксплуатационных колонн [Текст] : Автореф. дис. канд. техн. наук. – Р.М. Незаметдинов – Уфимский государственный технический ун-т нефти и газа. — Уфа, 1999.- 24 с.

4 Буслаев В.Ф. Применение композиционных материалов для крепления и эксплуатации скважин / Буслаев В.Ф. – Ухта: УГТУ, 2005. – 136 с.

5 Колесник В.И. Совершенствование методов повышения герметичности заколонного пространства скважин подземных хранилищ [Текст] : автореф. дис. канд. техн. наук : спец. 05.15.06 «Бурение скважин» / В.И. Колесник – Ивано-Франковский национальный технический ун-т нефти и газа. — Ивано-Франковск, 1990. — 18 с.

6 Шейкин А.Е. Структура, прочность и трещиностойкость цементного камня / А.Е. Шейкин. – М.: Стройиздат, 1974. – 188 с.

7 Мельников Ю.В. Нарушение контактов цементного кольца с обсадной колонной и стенками скважины при проведении технологических операций в этой колонне / Ю.В. Мельников, А.А. Утробин, В.Г. Смоляников // Бурение. – 1977. – №4. – С. 56-59.

8 Цементи тампонажні. Методи випробувань. [Текст] : ДСТУ БВ.2.7.-86-99 (ГОСТ 26789.1-96) – К.: Державний комітет будівництва, архітектури та житлової політики України, 1999. – 22 с.

9 Свойства горных пород и методы их определения / [Ильницкая Е.И., Тедер Р.И., Ватолін Е.С., Кунтыш М.Ф.]. – М: Недра, 1969. – 392 с.

*Стаття надійшла до редакційної колегії
27.03.12*

*Рекомендована до друку професором
Коцкуличем Я.С.*