

АНАЛІЗ РУХУ ГРАНУЛ ПРОППАНТА У ТРІЩИНАХ ТА ПЕРЕДУМОВИ ЗРОСТАННЯ ПЛАСТА ПРОППАНТА ПРИ ГІДРАВЛІЧНОМУ РОЗРИВІ

Ю. Г. Дяченко

*Полтавський коледж нафти і газу Полтавського національного
технічного університету імені Юрія Кондратюка;
36021, м. Полтава, вул. М.Грушевського, 2а;
тел./факс +380 (532) 60-57-63; e-mail:pngrt@yandex.ua*

В даній статті авторка аналізує ефективність проведення гідравлічного розриву пласта (ГРП), яка в першу чергу визначається якістю закріплення тріщини проппантом та провідність тріщин. В статті розглядаються можливі форми утворених тріщин і наводяться данні про глибоке проникнення проппанту у тріщину, але при цьому також наводяться умови закриття тріщини у присвердловинній зоні. Охарактеризовані основні фактори, що впливають на зростання пласта проппанта та природа його набивання у тріщини.

Ключові слова: *поровий тиск, дебіт, привибійна зона, гідравлічний розрив пласта, тріщина, проппант, кварцовий пісок.*

Мета статті: *проаналізувати рух гранул проппанту у тріщинах і механізм виникнення та поширення тріщин, що дозволить спрогнозувати геометрію тріщини й оптимізувати її параметри; охарактеризувати природу набивання проппанта у тріщини.*

Сучасна нафтогазовидобувна промисловість зробила ставку на максимальне збільшення дебіту нових і старих свердловин шляхом дії на привибійну зону для розробки віддалених від ствола свердловини частин нафтогазоносного пласта.

Одним з ефективних методів дії на привибійну зону свердловин – є гідравлічний розрив пластів (ГРП). Цей метод застосовується для підвищення продуктивності нафтових і газових родовищ.

Дія тріщин, утворених внаслідок ГРП, направлена на окремі ділянки продуктивного пласта. Таким чином, в залежності від розміщення тріщин, змінюється напрям і швидкість фільтраційних потоків, встановлюється зв'язок із іншими зонами підвищеної проникності.

Гідравлічний розрив – це процес, при якому тиск рідини впливає на породу пласта аж до її руйнування і виникнення тріщини. Процес розриву полягає у створенні штучних і розширенні існуючих тріщин в породах привибійної зони під дією підвищених тисків рідини, яка нагнітається у свердловину [3].

Тріщина створюється шляхом закачування рідин відповідного складу у пласт із швидкістю, яка перевищує її поглинання пластом. Тиск рідини зростає до підвищення внутрішньої напруги у породі. Тривала дія тиску рідини розширює тріщину углиб від точки розриву [1]. Рідина, яка передає тиск на породу пласта, називається рідиною розриву [4].

При використанні рідини, що не фільтрується, механізм розриву пласта стає схожим з розривом товстостінних посудин. Тріщини, що утворюються при цьому, мають, як правило, вертикальне або похиле направлення. При розриві рідиною, що фільтрується, тиск розриву зазвичай значно менше [5].

Для запобігання зімкнення тріщин у свердловину під тиском до 1600 ат закачують рідину (воду або нафту), оброблену відповідним хімреагентом для підвищення її в'язкості (50-500 МПа \times c), в яку додають розклинюючий матеріал – проппант (зазвичай пісок). Призначення цього матеріалу – утримати створену тріщину в розкритому стані після зниження тиску рідини.

Після завершення процесу гідророзриву і скидання тиску проппант утримує тріщину відкритою і, отже, проникною для рідин пластів. Остання порція проппанта у кількості 100-150 кг повинна містити радіоактивні речовини, щоб надалі можна було за допомогою гамма-каротажа перевірити – зони поглинання розклинюючого матеріалу.

При локальному ГРП довжина утворюваних тріщин 10-20 м, при ГРП з утворенням протяжних тріщин оптимальна довжина закріпленої тріщини зазвичай складає 40-60 м; при надглибокому гідророзриві 80-120 м, а при масованому ГРП-1000 м і більше [3].

За допомогою проппанта в отриманій тріщині формується штучний поровий простір, який не дає цій тріщині зімкнутися і створює додаткову площу дренажу свердловини.

Тип і масштаб процесу розриву проектується з метою усунення порушення проникності пласта. Якщо є можливість створити тріщину, що проходить крізь зону ушкодження, заповнену проппантом, і привести падіння тиску до нормальної величини градієнта гідродинамічного тиску, то продуктивність свердловини зростає.

Технологія застосування ГРП в першу чергу ґрунтується на знанні механізму виникнення і поширення тріщин, що дозволяє прогнозувати геометрію тріщини і оптимізувати її параметри.

Ефективність будь-якого гідророзриву в першу чергу залежить від провідності створеної розклиненої тріщини. Провідність, у свою чергу, залежить від розміру і міцності проппанта та розподілення його у тріщині [1].

Можливість тріщини транспортувати рідину до ствола свердловини обумовлені пропускнуою здатністю тріщини. Зазвичай вона визначається добутком проникності тріщини і її ширини.

Необхідно відмітити, що проппант не завжди рухається з рідиною гідророзриву із-за фільтрації рідини в породу, тому не відбувається розкриття тріщини на 100% її площі. Поверхні тріщин, не розділені проппантом, закриваються назад під дією існуючої напруги, тобто ці тріщини змикаються.

Отже, лише розклинені проппантом тріщини будуть доступні потоку рідини і будуть забезпечувати високу ефективність ГРП.

Для того, щоб визначити процес руху проппанта по тріщині, необхідно мати уявлення про форму тріщин.

Тріщина може мати дві основні форми:

1) горизонтальна тріщина – це розрив, що поширюється по всіх напрямках від ствола свердловини в площині, перпендикулярній стволу свердловини;

2) вертикальна тріщина – це розрив, що поширюється в двох напрямках від ствола свердловини. Вертикальні тріщини можуть бути представлені у вигляді еліпса [1].

Для спрощення розрахунків форму тріщини приймають у вигляді прямокутника та допускають, що рідина має прохід по всій висоті тріщини, а проппант входить в тріщину завжди однаково – по її ширині.

Рух гранул проппанта залежить від розміру і форми проппанта, щільності та концентрації його, від швидкості рідини, її в'язкості та густини.

Горизонтальна швидкість руху гранул і швидкість осідання (вертикальна швидкість) визначатимуть розподіл гранул в тріщині. Гранули проппанта входять в тріщину разом з течією рідини і продовжували б свій горизонтальний рух з постійною швидкістю, якби не контактували із стінками породи. Якби рідина мала низьку в'язкість або різниця між густиною рідини і гранулами була б більшою, відбувалося б буксування і гранули рухалися б повільніше за рідину. Одночасно гранули рухатимуться вертикально вниз під дією сили тяжіння. Коли сила тяжіння буде зрівноважена силами гравітації, станеться осідання гранул. Швидкість осідання гранул проппанта в ньютонівській рідині залежить від діаметра гранули, в'язкості рідини, різниці між щільністю гранул і густиною рідини.

Горизонтальна швидкість рідини залежить від ширини тріщини і витрати рідини при закачуванні. По мірі продовження робіт по розриву закачується більше рідини, і тріщина росте в довжину та ширину. Якщо підтримується постійний темп закачування швидкість у будь-якому місці по довжині тріщини з часом повільно знижується, оскільки збільшується ширина тріщини. До того ж в процесі закачування відбуваються втрати флюїду, що призводять до збільшення концентрації проппанта, зменшенню швидкості руху рідини і часткове осідання проппанта.

Таким чином, відстань вздовж тріщини, яку проходять гранули проппанта, перш ніж досягти основи тріщини, залежить від значення

швидкості рідини, швидкості осідання і висоти тріщини. Швидкість рідини залежить від витрати при закачуванні, ширини і висоти тріщини в даний момент.

При гідророзриві відбувається процес осідання гранул проппанта на поверхні породи. Нижні гранули досягають основи тріщини швидше, ніж верхні. З часом більш нові гранули осідають згори тих, які були введені раніше. На основі тріщини починає формуватися пласт проппанта. Після того, як гранули досягають основи тріщини, вони не просуваються далі в тріщину, а утворюють стійкий пласт проппанта.

При проведенні більшості гідророзривів застосовується рідина з досить високою в'язкістю, яка зменшує швидкість осідання проппанта. Таким чином, тільки невелика частина проппанта утворює пласт, що осів, а більша частина тріщини буде вмещувати проппант у зваженому стані. При довготривалому закачуванні гранули зваженого проппанта можуть досягти основи тріщини до завершення роботи. Найбільшу відстань по довжині тріщини, яку може пройти проппант за даних умов, називають "інтервал переміщення". Після того, як пройдений інтервал переміщення, зростання пласта проппанта відбувається лише у вертикальному напрямку, тому що гранули, що входять в тріщину, осідають згори пласта проппанта. Протягом всього часу закачування відбувається одночасна зміна багатьох факторів, що впливають на темпи росту проппантового пласта.

Фактори, що впливають на зростання пласта проппанта:

- збільшення ширини тріщини, що призводить до зменшення швидкості рідини і скороченню відстані, яку гранули проходять горизонтально;

- температура рідини-носія проппанта, яка може збільшуватися, що призводить до зниження в'язкості;

- охолодження стінок тріщини, останні порції проппанта менш схильні до дії високих температур, і в'язкість рідини вище, ніж на початкових стадіях;

- флюїдні втрати збільшують концентрацію проппанта, що призводить до більшого впливу гранул та зниження швидкості осідання і в'язкості рідини. Це явище називають "затримане осідання".

Сумарний ефект цих факторів виражається у збільшенні швидкості рідини і зростанні проппантового пласта. Проте, по мірі збільшення швидкості рідини гранули проппанта також проходять "інтервал переміщення", оскільки скорочується відстань до поверхні проппантового пласта.

По мірі того, як збільшується висота пласта проппанта, зменшується площа поперечного перерізу тріщини, через яку проходить рідина, що призводить до збільшення швидкості рідини. Наступить момент, коли гранули рухатимуться разом з рідиною, не осідаючи. Проппантовий пласт в цей час називають "висотою рівноваги".

На гранули проппанта діє й напруження закриття тріщини. В результаті цього деякі гранули можуть бути роздавлені або втиснуті у м'яку породу.

В глибоких свердловинах або свердловинах, де сили в пласті високі, проппанти повинні витримувати високі зусилля до стискування, часто більше 10000 фунтів на квадратний дюйм (68,9 МПа) – високоміцні проппанти. Якщо сили в тріщині занадто високі для цього проппанта, він подрібнюється, руйнується і тому не матиме достатньої проникності, щоб дозволити належний приплив нафти або газу.

В неглибоких свердловинах, проппанти не вимагають такої міцності, задовольняючись проміжними значеннями міцності. Ці проппанти використовуються коли стискаючі зусилля лежать між 5000 і 10000 фунтів (34,5-68,9 МПа). Інші проппанти можуть використовуватися де стискаючі зусилля низькі. Наприклад, при низьких стискаючих зусиллях як проппант часто використовується пісок.

Якщо гранули роздавлюються або вдавлюються в породу, пропускна здатність тріщини зменшуватиметься і може знизитися настільки, що провідність пласта проппанта і проникність породи-колектора майже не відрізнятимуться. В цьому випадку результати гідророзриву пласта будуть незадовільними внаслідок втрати провідності тріщини. До такого ж результату може привести й процес утворення полімерної кірки на поверхні тріщини і наявність певної кількості полімеру, що залишається у пласті проппанту.

Вміст дрібних частинок в проппанті може істотно знизити проникність тріщини розриву. Добре промитий і оброблений проппант не містить великої кількості дрібнозернистих домішок.

Від розміру гранул залежить упаковка проппанта в тріщині і, відповідно, його проникність. При збільшенні розміру гранул збільшується проникність пласта проппанта, але знижується міцність і виникають проблеми з перенесенням проппанта вздовж тріщини [4].

Таким чином, проникність тріщини залежить від взаємозв'язаних чинників: типу, розміру і однорідності проппанта; міри його руйнування або деформації; кількості і способу переміщення проппанта.

Якщо гранули проппанта ламаються, може скоротитися термін служби свердловини. З цієї причини проппанти зазвичай розробляються так, щоб мінімізувати дроблення. Бажано розробити форму проппанта так, щоб забезпечити високу міцність і схильність до набивання, які посилюватимуть приплив нафти або газу. Оптимальна форма може відрізнятися для різних глибин, напруги закриття тріщини, геологічних умов навколишнього ґрунту і матеріалів.

Природа набивання проппанта може впливати на течію нафти і газу через тріщини. Якщо гранули проппанта стають занадто щільно укладеними, вони швидше перешкоджатимуть потоку нафти і газу.

Природа набивання може також впливати на сумарну турбулентність, що утворюється в тріщинах. Занадто велика турбулентність може підвищити зворотне винесення гранул проппанта з тріщини до ствола свердловини. Це може небажано знижувати приплив нафти і газу, забруднювати свердловину, призводити до зносу обладнання у свердловині і підвищити собівартість видобутку, оскільки проппанти, які течуть назад у свердловину, треба видаляти з нафти і газу. Занадто висока турбулентність може також підвищити ефект течії, що не підкоряється закону Дарсі і може привести до зниження провідності.

Говорячи про провідність тріщини, варто згадати те, як частинки проппанта (піску або надлегких проппантів) можуть упаковуватися (створювати певну структуру) один з одним при розміщенні їх в замкнутих умовах під надмірним тиском. Найочевидніша структура упаковки для частинок піску і надлегких проппантів – це пласт.

Проппанти можуть упаковуватися як в один пласт, так і формувати декілька пластів, що знаходяться один над одним. Структура, що складається з одного пласта проппанта, називатиметься монопласт. При цьому, якщо монопласт (один пласт проппанта) буде заповнений не повністю, тобто, в якійсь частині пласта буде відсутній проппант і замість проппанта там буде порожнеча, то така структура носитиме назву частковий монопласт.

У кожній зцементованій гірській породі є природні мікротріщини, які під дією гірського тиску (тиск, що створюється породами, що залягають вище) щільно стиснуті. Проникність таких тріщин незначна. Під тиском, що створюється у свердловині при нагнітанні рідини, остання фільтрується в першу чергу по зонах найбільшої проникності, у тому числі в природні тріщини. При цьому між пропластками по вертикалі створюється різниця тиску, так як в більш проникних пропластках і тріщинах тиск буде вище, ніж в малопроникних або практично непроникних. В результаті виникає зусилля, що діє на покрівлю і підшву проникного пласта; розміщені вище породи піддаються деформації, і на межах пропластків утворюються тріщини або ж розширюються вже наявні мікротріщини.

Таким чином, заповнення закріплювачем присвердловинної частини тріщини гідророзриву – важливий етап її кріплення. Цьому питанню приділяється особлива увага і вважається, що провідність тріщини поблизу свердловини має вирішальне значення [5].

Експериментальні дослідження і промисловий досвід показують, що незакріплена присвердловинна частина тріщини, що становить всього 3% її довжини, приводить до закриття вхідної ділянки і значно знижує ефект від гідророзриву, а збільшення провідності вхідної ділянки його підвищує. Тому присвердловинну частину тріщини вважають критичною для підвищення ефективності ГРП. Крім того, в цій частині тріщини упаковка проппанта схильна до найбільшої напруги, рівної ло-

кальному гірському тиску за вирахуванням поточного порового тиску, оскільки поровий тиск поблизу ствола свердловини при відборі нафти понижений.

При проектуванні технології заповнення тріщини закріплювачем планують спеціальні заходи, спрямовані на особливо ретельне кріплення гирла тріщини.

При кріпленні вертикальної тріщини на початку її заповнення вводять крупнозернистий закріплювач, у кінці закачування збільшують концентрацію закріплювачу і знижують темп закачування. Останнє слід робити обережно, так як зниження витрати може значно зменшити динамічну ширину тріщини, і необхідний ефект не буде досягнутий.

Отже, найбільш високої ефективності гідророзриву можна досягти, якщо вибір свердловин для обробок і оптимізація параметрів тріщин, що забезпечує баланс між фільтраційними характеристиками пласта і тріщини, здійснюються з урахуванням геолого-фізичних властивостей об'єкту, розподілу напруги у пласті, що визначає орієнтацію тріщин, системи заводнення і розставлення свердловин.

Ефект від проведення гідророзриву неоднаково проявляється в роботі окремих свердловин, тому необхідно розглядати не лише приріст дебіта кожної свердловини внаслідок гідророзриву, але й вплив взаємного розташування свердловин, конкретного розподілу неоднорідності пласта, енергетичних можливостей об'єкту та ін. Такий аналіз можливий тільки на основі математичного моделювання процесу розробки ділянки пласта або об'єкта в цілому з використанням адекватної геолого-промислової моделі, яка виявляє особливість геологічної неоднорідності пласта.

Література

1. Каневская Р.Д. Аналитические решения задач о притоке жидкости к скважине с вертикальной трещиной гидроразрыва и их использование в численных моделях фильтрации / Р.Д.Каневская, Р.М.Кац // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. – 1996. – №6. – С. 69-80.
2. Щуров В.И. Технология и техника добычи нефти / В.И.Щуров. – М.: Недра, 1983. – 368 с.
3. Справочная книга по текущему и капитальному ремонту нефтяных и газовых скважин / А.Д.Амиров, К.А.Карапетов, Ф.Д.Лемберанский и др. – М.: Недра, 1979. – 309 с.
4. Токунов В.И. Технологические жидкости и состав для повышения продуктивности нефтяных и газовых скважин / В.И.Токунов, А.З.Саушин. – М.: ООО«Недра–Бизнесцентр», 2004. – 711 с
5. Застосування розклинювальних агентів при гідророзриві // Російські нафтогазові технології (ROGTEC). – Вип. 6. – С. 50-57.
6. Инструкция по технологии глубокопроникающего гидравлического разрыва пласта. – М., 1998. РМНТК – Нефтеотдача.

*Стаття надійшла до редакційної колегії 19.01.2016 р.
Рекомендовано до друку к.т.н. Цьомком В.В.,
д.т.н., професором Дорошенком В.М. (м. Київ)*

**THE ANALYSIS OF PROPPING AGENT GRANULES
MOVEMENT IN THE CRACKS AND PRECONDITION
OF GROWTH OF PROPPING AGENT LAYER
IN HYDRAULIC FRACTURING**

Y. G. Diachenko

*Poltava college of oil and gas of the Poltava national technical university
named by Yuri Kondratiuk; 36021, Poltava, M. Grushevsky str., 2a;
ph./fax +380 (532) 60-57-63; e-mail: pngrt@yandex.ua*

In this article the author analyzes the effectiveness of the hydraulic fracturing of the layer (LHF), which is primarily defined by the quality of propping agent fixing cracks and crack conductivity. The article covers possible forms of created cracks and the data of deep penetration of propping agent into the crack, but also there are given the conditions of crack closing at the bore drilling zone. There were characterized the main factors of affecting the growth of propping agent layer and the nature of its stuffing it into the cracks.

Key words: *pore pressure, flow rate, bottomhole zone, hydraulic fracturing, crack, propping agent, quartz sand.*