

УДК 622.276.6

## ВАРІАНТ МЕТОДУ ІНЖЕНЕРНОГО РОЗРАХУНКУ ЕФЕКТИВНОСТІ АКУСТИЧНОЇ ДІЇ НА ПРИВІБІЙНУ ЗОНУ ПЛАСТА

Я.М.Бажалук, В.І.Чистяков

НВФ "ІНТЕКС", 76000, м. Івано-Франківськ, вул. Шота Руставелі, 1,  
тел./факс (03422) 32400, тел. (03422) 75623

Фізико-механические характеристики данной конкретной системы пласт-коллектор – пластовой флюид, которая присуща каждой скважине, могут быть определены методами объективного лабораторного и технологического анализа. На основе знания этих характеристик можно рассчитать необходимые градиенты давлений, которые приводят к разрушению коллоидно-дисперсной системы флюида в пласте-коллекторе с целью резкого уменьшения её кажущейся вязкости и повышения проницаемости пласта. Рассчитанные градиенты давлений определяют технические параметры скважинных акустических устройств, которые должны воздействовать на пласт для конкретных скважин.

З аналізу матеріалів, викладених у [1,2,3,4], можна зробити висновок, що опис процесів механічних дій на привибійну зону пласта (ПЗП) із застосуванням понять градієнтів тисків дає можливість пов'язати фізико-механічні характеристики системи пласт-коллектор – пластовой флюїд з необхідними значеннями градієнтів тисків в пласті і флюїді, створюваних з метою зміни характеристик вказаної системи. Фізико-механічні характеристики даної конкретної системи пласт-коллектор – пластовой флюїд можуть бути визначені методами об'єктивного лабораторного та технологічного аналізу, на основі яких розраховуються необхідні градієнти тисків для зміни вказаних характеристик системи пласт-флюїд, а розраховані градієнти тисків визначають технологічні параметри свердловинних акустичних пристроїв, які мають діяти на пласт для конкретних свердловин.

Як і в [1,2,3], вважаємо, що фільтраційні властивості ПЗП залежать від фізико-хімічного стану колоїдно-дисперсної системи (КДС), тобто рідини з частками забруднювачів, що заповнюють порів простори продуктивного пласта. В процесі фільтрації рідини в свердловину концентрація забруднювачів в рідині ПЗП збільшується, виникає коагуляція-злипання частинок забруднювачів, які утворюють просторову сітку в структурі рідини. Така структурована рідина стає неньютонівською, в'язкість якої на кілька порядків вища від вихідної в'язкості дисперсійного середовища [2,3].

Тому для підвищення проникності ПЗП треба одноразово зменшити зв'язок пластового флюїду, що являє собою КДС, з твердою фазою пласта, який має пори (канали), заповнені флюїдом, і зруйнувати просторову сітку КДС, тобто зменшити в'язкість самої КДС шляхом "подрібнення" її дисперсної фази. Такі дії можна виконати механічним способом за допомогою свер-

The physical mechanics of performance of the given concrete system a layer – collector – layer fluid, which is inherent in each slit, can be certain (determined) by methods of the objective laboratory and technologic analysis. Because of knowledges of these performances can be calculated necessary gradients of pressure, which to set to destruction colloid – dispersibles system fluid in a layer – collector with the purpose of a sharp diminution of its apparent viscosity and increase of a permeability of a layer.

The designed gradients of pressure determine technical parameters of acoustic systems (devices), which should influence a layer for concrete bore hole.

дловинних акустичних пристроїв, тому вони і мають назву акустичних дій (АД) на пласт.

Як відомо [1,3], для початку руху неньютонівської рідини в порах пласта граничний градієнт тиску можна оцінити за допомогою такої нерівності:

$$\text{grad } P > \frac{4\tau_0}{d} \quad (1)$$

де:  $\tau_0$  – гранична напруга зсуву, яка відповідає мінімальному перепаду статичного тиску, що викликає руйнування просторової сітки КДС;

$d$  – ефективний діаметр пор пласта-коллектора.

Ця нерівність (1) дуже слабка, майже рівність, оскільки при переході виразу (1) у рівність течія в порах пласта лавиноподібно припиняється. Через неоднорідність властивостей пласта припинення або виникнення течії флюїду у пласті згладжується, але ці процеси мають все ж таки достатньо різкий характер [1].

Оскільки оцінка характеристики пласта за розмірами діаметрів пор  $d$  не прийнята, краще перейти до загальноприйнятого поняття "коефіцієнт проникності"  $K_{np}$ , який слугує для оцінки фільтраційних властивостей пластів. Відомо, що коефіцієнт проникності  $K_{np}$  пропорційний  $d^2$  (виходячи з елементарних гідродинамічних уявлень). Тому, [3]

$$\text{grad } P \sim \frac{\tau_0}{\sqrt{K_{np}}} \quad (2)$$

Якщо прийняти

$$K_{np} = \alpha \frac{\pi d^2}{4} \approx 0,786 \alpha d^2,$$

то

$$\text{grad } P \approx 3,54 \tau_0 \sqrt{\frac{\alpha}{K_{np}}}, \quad (3)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт пропорційності.Загалом  $\text{grad } P$  за визначенням дорівнює

$$\text{grad } P = \frac{dP}{dl} \approx \frac{\Delta P}{\Delta l}, \quad (4)$$

де  $\Delta P$  – перепад (зміна) тиску між двома одиничними площадками середовища, ізотропного і однорідного у прийнятому напрямі, які віддалені одна від одної на відстань  $\Delta l$ . Зміна тиску  $dP$  у середовищі розповсюджується зі швидкістю пружних коливань  $C$ , тобто  $C$  – швидкість акустичних хвиль. Відстань  $dl$  пружна хвиля пройде за час  $dt$ , тому

$$\text{grad } P = \frac{dP}{dl} = \frac{dP}{C dt} = \frac{dt}{C}. \quad (5)$$

Чисельник виразу (5) є миттєвою крутизою фронту зміни тиску  $P$  в часі в даному середовищі.

На практиці для АД на ПЗП використовують гідродинамічні свердловинні пристрої (гідроударники) різних конструкцій. Конструкції гідроударників містять рухливі механізми, які мають, як правило, достатньо велику інерційність, тобто масу. Це зумовлено певними конструкторськими вимогами, пов'язаними, в першу чергу, з вимогами міцності, надійності і довготривалості. Реально існуючі конструкції гідроударників дають змогу забезпечити перекриття перетоку рідини у своїх каналах із швидкістю в кращому випадку не меншою декількох одиниць мілісекунд, тобто верхній частотний діапазон швидкодії гідроударників становить кілька сотень герц. Винятком є електроіскрові випромінювачі, для яких можуть бути досягнуті великі перепади тисків з частотою в декілька тисяч герц. Однак ці випромінювачі можуть бути використані лише при відносно малих гідростатичних тисках, тобто для неглибоких свердловин [3].

П'єзoeлектричні та магніострикційні випромінювачі у даному випадку не розглядаємо, бо вони випромінюють досить вузькочастотні гармонічні коливання, тоді як для ефективної дії на ПЗП треба віддати перевагу випромінювачам з досить широким діапазоном частот випромінюваних коливань [1,2,3,4,5].

Із врахуванням спектрального складу створюваних у свердловинах ударних дій в рідинному середовищі за допомогою механічних гідроударників можна вважати, що верхня межа по частоті коливань з суттєвою інтенсивністю становить величину порядку до 1000 Гц. Для частоти  $f = 1$  кГц довжина хвилі коливань  $\lambda$  в рідині, що заповнює простір свердловини, наприклад, у воді, зі швидкістю розповсюдження гідроударних хвиль  $C = 1500$  м/с, дорівнює

$$\lambda = C \cdot T = C / f = 1500 / 1000 = 1,5 \text{ м},$$

де  $T$  – період коливань.

Активна зона випромінювання гідроударів у рідині в свердловині за допомогою існуючих гідроударників становить величину від декількох десятків сантиметрів до одиниць метра залежно від конструкції випромінювача. Тому з достатньою мірою наближення можна вважати, що для активних частот акустичних хвильових коливань у свердловинній рідині джерело цих коливань є точковим і випромінює у навколишнє (свердловинне) середовище сферичні хвилі. Як відомо [6], сферичні хвилі коливань випромінюють збудники, лінійні розміри яких не перевищують довжини хвилі випромінюваних коливань, а у нашому випадку мінімальна довжина хвилі коливань становить згідно з приведеним розрахунком величину порядку 1,5 м.

Виходить, що на межу розділу свердловина – пласт попадає акустична сферична хвиля, якщо випромінювач розташований в свердловині в зоні пласта. Подальший аналіз умов розповсюдження акустичних хвиль в продуктивному пласті дає підстави зробити висновок, що випромінєні у свердловині сферичні акустичні хвилі в пласті трансформуються в циліндричні або близькі до них за фізичним характером, оскільки продуктивний пласт за рахунок граничних розмірів по вертикалі (метри, десятки метрів) можна якоюсь мірою уявити як своєрідний хвильовід для акустичних хвиль, вертикальний розмір якого співрозмірний з довжиною акустичної хвилі в пласті.

Дійсно, якщо прийняти швидкість акустичних хвиль в пласті  $C_n$  рівну приблизно 4500 м/с [7], то на частоті  $f = 1$  кГц довжина хвилі  $\lambda_n$  в пласті дорівнює

$$\lambda_n = C_n / f = 4500 / 1000 = 4,5 \text{ м}.$$

Хвилі менших частот будуть більш довгими.

Цей хвильовід являє собою фізичне середовище, яке має велику протяжність по горизонталі по всіх азимутах (десятки, сотні і тисячі метрів) при відносно малій протяжності по вертикалі (метри, десятки метрів).

Фізичні характеристики продуктивного пласта за пружними та іншими механічними параметрами відрізняються від відповідних характеристик пластів, що прилягають до підшви і покрівлі продуктивного пласта. Якщо ще мати на увазі нафтонасичений пласт, то затухання акустичних коливань в такому пласті значно менше, ніж у вище- і нижчерозташованих ненасичених рідиною пластах, оскільки коефіцієнти затухання акустичних коливань у рідинах значно менші, ніж у твердих полікристалічних середовищах з неоднорідною структурою.

Тому результуючий фронт акустичних коливань у продуктивному пласті, створений сумарними фронтами прямої акустичної хвилі, що розповсюджується вздовж пласта по горизонталі з фронтами відбитих від горизонтальних меж продуктивного пласта (підшви і покрівлі) акустичних коливань можливо з відомим допустимим ступенем наближення вважати фронтом циліндричної акустичної хвилі.

Описане явище також ще більше підкріплюється поведінкою акустичних хвиль, які надають під кутами, відмінними від  $0^\circ$  до нормалі на межі розділу двох середовищ, яке супроводжується відбиттям, заломленням акустичних хвиль та їх трансформацією у поздовжні та поперечні коливання, а також перерозподілом падаючої енергії коливань між згаданими їх видами [6].

Відомо, що малопроникна зона продуктивного пласта, яка оточує перфоровану зону свердловини і зумовлена утворенням у пласті КДС, являє собою "корок" з розмірами стінки по товщині (тобто по горизонталі для вертикальних свердловин) не більше 1,5...2,0 м [3]. При таких геометричних розмірах "корка" затухання коливань в ньому до частоти  $\sim 1\text{КГц}$  незначне і, що важливо, його можна вважати однаковим для всіх частот коливань до  $\sim 1\text{КГц}$ .

Тому у близькій зоні пласта на відстанях від стінки свердловини до десятків, а може бути й до сотень метрів форми акустичних імпульсів тисків, створених свердловинним акустичним пристроєм, наприклад, гідрогенератором, зберігаються практично незмінними. Отже, якщо створити по всій товщині "корка" КДС крутизну переднього фронту акустичного

імпульсу тиску  $\frac{dP}{dt} \approx \frac{\Delta P}{\Delta t}$ , згідно з (3) достатньою для створення  $grad P$ , який викликає

руйнування структури КДС у відповідності з (2), то неньютонівська рідина у КДС перетворюється у ньютонівську і може бути витиснута у свердловинний простір. Витиснути зруйновану структуру КДС з пласта необхідно, бо вона здатна самовідновлюватись [2,3].

Час самовідновлювання структури КДС визначається часом релаксації системи [3], який залежить від матеріалу КДС та ступеня її структурованості і змінюється у широких межах. Тому оптимальною з цієї точки зору акустичною дією на пласт є дія за допомогою від'ємних імпульсів тиску або сполучення імпульсних АД з достатньо крутими фронтами і з одночасною депресією на пласт. Така технологія дії на пласт досить відома і її ефективність перевірена на практиці [8].

Виходячи з викладеного вище, можна запропонувати наступний варіант інженерного методу розрахунку ефективної акустичної дії на ПЗП з метою підвищення продуктивності видобування флюїду з пласта.

З відомих характеристик даної конкретної свердловини або задаємось, або визначаємо (наприклад, по кривій відновлювання тиску) відстань  $l$  від свердловини, на якій в пласті різко знижена проникність, тобто визначаємо товщину згаданого "корка", яка у більшості випадків становить величину не більше 1,5...2,0 м [3].

Величину  $grad P$  можна визначити згідно з виразами (2) або (3). При цьому гранична напружка зсуву  $\tau_0$  визначається для пластового флюїду даної свердловини на основі статистичних даних по конкретному родовищу. Коефіцієнт

проникності  $K_{np}$  визначається на основі геофізичних даних для даного пласта, а значення коефіцієнта  $\alpha$  можна визначити або на основі статистичних даних для визначених порід пластів-колекторів, або на основі докладних досліджень кернів даного пласта у лабораторних умовах.

Оскільки при викладених вище припущеннях форма акустичного імпульсу тиску, що створюється в гідросередовищі свердловини гідроударником і розповсюджується у близькій до свердловини зоні пласта, залишається в першому наближенні незмінною, то подальший розрахунок ведеться тільки за амплітудою тиску акустичного імпульсу при постійній тривалості його фронту, вершини і спаду.

Результуючий фронт акустичних коливань у продуктивному пласті, створений сумарними фронтами прямої акустичної хвилі, що розповсюджується вздовж пласта по горизонталі, з фронтами відбитих від горизонтальних меж продуктивного пласта (підшови і покрівлі) акустичних коливань, можна з певним наближенням вважати фронтом циліндричної акустичної хвилі [4,5]. Для акустичного імпульсу у пласті, що характеризується циліндричною хвильовою поверхнею, рівняння зміни амплітуди імпульсу тиску  $P_1$  залежно від відстані до стінки свердловини має вигляд [9]

$$P_1 = \frac{P_\alpha}{\sqrt{\frac{r_c + l}{r_c}}}$$

де:  $P_\alpha$  – амплітуда тиску у пласті при вході в пласт;

$r_c$  – радіус свердловини зовнішній;

$l$  – відстань від зовнішньої поверхні свердловини до певної точки пласта.

Звідси походить і вираз для градієнтів тисків у пласті  $grad P_1$

$$grad P_1 = \frac{grad P_\alpha}{\sqrt{\frac{r_c + l}{r_c}}} \quad (6)$$

Із (6) випливає

$$grad P_\alpha = grad P_1 \sqrt{\frac{r_c + l}{r_c}}$$

Акустичний імпульс, що збуджується в гідросередовищі свердловини (у свердловинній рідині), проникає в пласт через перфоровану зону стінок обсадної колони і затрубного цементного кільця. Через це ступінь проникнення АД з гідросередовища свердловини у пласт визначається в першу чергу гідродинамічною досконалістю свердловини, характеристиками пласта (його породою та її метаморфічним станом) і частотами хвильових дій акустичних імпульсів (тобто основним енергетичним спектром частот АД).

Не вдаючись у деталі проходження пружних механічних коливань через тонкі плівки (прошарки), товщина яких замала порівняно з довжинами пружних хвиль, величини коефіцієнта досконалості свердловини залежно від її конструкції і т.п., можна скористатись, наприклад, графіком, наведеним у [10, с.37, рис.20], який виражає залежність коефіцієнта  $K$  проходження акустичної енергії зі свердловини крізь її шарові стінки в пласт з врахуванням того, що частотний спектр АД на пласт у нашому конкретному прикладі не перевищує декількох кілогерц.

З цього графіка випливає, що для частот хвильових пружних коливань до декількох кілогерц коефіцієнт  $K$  для різних порід пласта змінюється не дуже сильно, приблизно в два рази (від  $\sim 0,45$  до  $\sim 0,9$ ). Оскільки коефіцієнт  $K$  дорівнює відношенню інтенсивностей, які пропорційні квадрату тиску  $P^2$ , то зміна тисків при переході пружних коливань з одного середовища в друге пропорційна  $\sqrt{K}$ . Так само відбувається і зміна  $\text{grad } P$ , тобто зміна градієнтів тисків при переході зі свердловинного середовища (води) в породу пласта лежить у межах 0,67...0,95 для різних порід для приблизно рівних швидкостей пружних коливань  $C$  у цих породах (звичайно, для тих частот коливань, які вже згадувались).

Окремому дослідженню підлягає питання про швидкість розповсюдження  $C$  пружних механічних дій у гетерогенному середовищі продуктивного пласта. Згідно з виразом (5),  $\text{grad } P$  визначається як крутизною фронту імпульсу акустичної дії, так і швидкістю  $C$  розповсюдження пружних механічних дій у даному середовищі.

Середовище продуктивного пласта є пористим, основу його – структурну пористу сітку (скелет) – складає тверда мінеральна порода. Незалежно від того, чи заповнені пори цього середовища пластовим флюїдом чи ні (у гіпотетичному випадку у порах може бути і вакуум), пружні механічні коливання розповсюджуються в цьому середовищі, і швидкість їх розповсюдження, природно, наближається до швидкості розповсюдження пружних механічних дій у суцільному твердому середовищі породи пласта, оскільки за об'ємом мінеральна порода складає більшість у загальному об'ємі пласта-колектора. Тому швидкість  $C$  розповсюдження АД в продуктивному пласті лежить в межах  $(3,5...5,5) \cdot 10^3$  м/с [7]. В середньому можна прийняти швидкість АД в пласті  $C = 4500$  м/с.

Величина швидкості АД в пласті  $C$  є суттєвою тому, що градієнт тиску в пласті зменшується з ростом швидкості згідно з (5).

Виходячи з визначення коефіцієнта  $K$  проходження акустичної енергії із свердловини в пласт, можна записати такий вираз:

$$\text{grad } P_{\alpha} = \sqrt{K} \cdot \text{grad } P_c,$$

де:  $\text{grad } P_{\alpha}$  – градієнт тиску у пласті при вході акустичних коливань в пласт із зовнішньої поверхні свердловини;

$\text{grad } P_c$  – градієнт тиску в свердловинній рідині на внутрішній поверхні свердловини.

Звідси

$$\text{grad } P_c = \frac{\text{grad } P_{\alpha}}{\sqrt{K}}. \quad (7)$$

Для окремої гармонічної дії на пласт вираз (7) є математично цілком коректним. Для імпульсної дії, яку ми приймаємо для аналізу, цей вираз є наближеним, і міра наближення до реального процесу АД на пласт визначається величиною зміни знаменника  $\sqrt{K}$  залежно від частоти у спектрі гармонічних складових, що описують реальний імпульс АД.

Як вже відзначалось, спектр гармонік АД лежить в межах декількох кілогерц і для різних порід  $\sqrt{K}$  в цьому випадку лежить в межах 0,67...0,95. Тим більше, для однієї і тієї ж породи пласта у вказаному спектрі величина  $K$  змінюється не більше, ніж на  $\pm 20\%$ , тобто зміна величини  $\sqrt{K}$  в цьому випадку лежить в межах  $\pm 10\%$ . Через це ступінь наближення розрахунків до реальних значень величин, що розраховуються, буде знаходитись приблизно у тих самих межах.

Як було проаналізовано раніше, джерело АД на пласт гідроударниками тієї чи іншої конструкції можна вважати точковим, що випромінює в свердловинну рідину (воду) сферичні хвилі. Тиск в такому типі хвиль змінюється обернено пропорційно відстані від джерела [9], отже, і градієнт тиску підлягає такій же залежності. Тому

$$\text{grad } P_c = \frac{r_2}{r_{c1}} \cdot \text{grad } P_2, \quad (8)$$

де:  $r_2$  – зовнішній радіус поверхні гідроударника;

$r_{c1}$  – радіус внутрішньої циліндричної поверхні свердловини (внутрішньої поверхні обсадної труби);

$\text{grad } P_2$  – градієнт тиску, що створюється у свердловинній рідині (воді) на поверхні гідроударника.

Із (8) маємо

$$\text{grad } P_2 = \text{grad } P_c \cdot \frac{r_{c1}}{r_2}. \quad (9)$$

Із загального виразу (5) для градієнтів тисків випливає

$$\frac{dP_2}{dt} = C_6 \cdot \text{grad } P_2, \quad (10)$$

де:  $\frac{dP_2}{dt}$  – похідна за часом тиску  $P_2$ , що розвивається на поверхні гідроударника;

$C_6$  – швидкість акустичної хвилі у воді.

Із виразів (6)-(9) одержуємо

$$\text{grad } P_r = \frac{r_{c1}}{r_2} \cdot \frac{1}{\sqrt{K}} \cdot \sqrt{\frac{r_c + l}{r_c}} \cdot \text{grad } P_l. (11)$$

Звідси із (10) отримуємо крутизну фронту АД на пласт  $dP_2/dt$ , що створюється на поверхні гідроударника у воді, достатньої для того, щоб на визначеній відстані в зоні пласта від внутрішньої поверхні свердловини забезпечити градієнт тиску  $\text{grad } P_l$  для руйнування КДС флюїду пласта

$$\frac{dP_2}{dt} = C_6 \cdot \frac{r_{c1}}{r_2} \cdot \frac{1}{\sqrt{K}} \cdot \sqrt{\frac{r_c + l}{r_c}} \cdot \text{grad } P_l. (12)$$

Таким чином, для розрахунку параметра гідродинамічної АД на пласт – крутизни фронту тиску  $dP_2/dt$  – необхідно мати такі дані:

1. Характеристику пласта, оцінювану за коефіцієнтом проникності  $K_{np}$  і коефіцієнтом  $\alpha$ .

2. Граничну напругу зсуву  $\tau_0$ , що викликає руйнування просторової сітки КДС, яка характеризує стан флюїду у пласті.

3. Використовуючи дані вищезгаданих пунктів 1 і 2, можна розрахувати  $\text{grad } P_l$  згідно з виразом (3).

4. Задаючи зону (відстань)  $l$  ураження колектора пласта [3] і знаючи конструкцію свердловини (значення величини  $r_c$ ), визначаємо

величину  $\sqrt{\frac{r_c + l}{r_c}}$ . При цьому треба мати на

увазі, що величина  $l$  відрховується від зовнішньої поверхні обсадної колони свердловини.

5. Знаючи гідродинамічну досконалість свердловини та характеристики пласта, визначаємо коефіцієнт  $K$  проходження акустичної енергії із свердловини в пласт.

6. Знаючи радіус гідроударника  $r_2$  і радіус свердловини (внутрішній)  $r_{c1}$ , визначаємо

$$\frac{r_{c1}}{r_2}.$$

7. В принципі вираз (12) повинен давати величину крутизни фронту АД на пласт із запасом (з перевищенням). Справа в тому, що відстань ураження колектора  $l$  оцінюється у [3] за відношенням потенційної проникності до фактичної і має явно виражений нелінійний характер. На відстані  $l$  до 1,5...2,0 м проникність

пласта приймає значення, яке дорівнює природній проникності пласта з її природною сіткою КДС, а, отже, і її граничною величиною напруги зсуву  $\tau_{01}$ , зумовленою природним станом флюїду в пласті. У вираз же (12) входить величина  $\text{grad } P_l$ , розрахована за зсувною напругою  $\tau_0 > \tau_{01}$ , яка характеризує стан КДС флюїду в зоні ураження колектора. Це обмеження зумовлено невизначеністю функціональної залежності напруг зсуву КДС  $\tau_{01}$  від відстані ураження колектора  $l$ . Очевидно, визначення такої залежності потребує додаткових детальних досліджень.

### Література

1. Крутин В.Н. Механизм акустической интенсификации притоков нефти из продуктивных пластов // НТВ "Каротажник". – Тверь: ГЕРС, 1998. – Вып.42.
2. Горбачев Ю.И. Физико-химические основы ультразвуковой очистки призабойной зоны нефтяных скважин // НТВ "Каротажник". – Тверь: ГЕРС, 1999. – Вып.57.
3. Горбачев Ю.И. Акустическое воздействие и повышение рентабельности разработки нефтяных месторождений // НТВ "Каротажник". – Тверь: ГЕРС, 2000. – Вып.60.
4. Бажалук Я.М., Чистяков В.І. Вплив на пласт-колектор полями змінних тисків // Тези науково-практичної конференції "Стан і перспективи впровадження технологій з інтенсифікації видобутку газу та нафти на родовищах України". – Івано-Франківськ, 2002.
5. Дыбленко В.П., Камалов Р.Н., Шарифуллин Р.Я., Туфанов И.А. Повышение продуктивности и реанимация скважин с применением виброволнового воздействия. – М.: ООО "Недра-Бизнесцентр", 2000. – 381с.
6. Бергман Л. Ультразвук и его применение в науке и технике. – М.: ИИЛ, 1957. – 726 с.
7. Сейсморазведка. – М.: Недра, 1996. – Т. 4. – 688 с.
8. Бажалук Я.М. и др. А.с. №1662158. Способ воздействия на прискважинную зону пласта. (СССР). – 1989.
9. Кошкин Н.И., Ширкевич М.Г. Справочник по элементарной физике. – М.: Наука, 1988. – 256 с.
10. Кузнецов О.Л., Ефимова С.А. Применение ультразвука в нефтяной промышленности. – М.: Недра, 1983. – 192 с.