

- маловязкими жидкостями / В. П. Бондаренко и др. // Перспективы повышения ресурса и надежности эксплуатации пар трения, смазывающихся рабочими средами. – К.: ИСМ АН УССР, 1987. – С. 47–53.
4. Халепа А. Д. Карбидохромрвые твердые сплавы повышенной прочности и их работоспособность в парах трения. // Перспективы развития ресурса и надежности эксплуатации пар трения, смазывающихся рабочими средами. – К.: ИСМ АН УССР, 1987. – С. 54–58.
  5. Линенко-Мельников Ю. П., Агеева И. Ю. Изнашивание перфораторных буровых коронок // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника, технология его изготовления и применения. – К.: ИСМ им. В. Н. Бакуля, 2011. – Вып. 14. – С. 60–71.
  6. Линенко-Мельников Ю. П., Лисовский А. Ф. Повышение износостойкости изделий из металлокерамических твердых сплавов за счет неравномерного распределения кобальта в изделиях // Абразивный износ и повышение износостойкости деталей путем наплавления и напыления. – Киев, 1970. – С. 21–25.
  7. А. с. № 389247, СССР, МКИ 21С 25/38. Опора вращения породоразрушающего инструмента / Ю. П. Линенко-Мельников, Э. Г. Аптов и др. – Оpubл. 05.07.1973; Бюл. № 29.
  8. А. с. № 394539, СССР, МКИ Е 21С 9/00. Опора вращения породоразрушающего инструмента / Ю. П. Линенко-Мельников, Э. Г. Аптов. – Оpubл. 22.08.1973; Бюл. № 34.

*Поступила 01.06.12*

УДК 622.276.7; 534-24

**М. М. Западнюк**

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Україна*

### **ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ ГЕНЕРОВАНИХ ХВИЛЬ ГІДРОДИНАМІЧНОГО ПРИБОРУ НА ЗМІНУ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПРИВІБІЙНОЇ ЗОНИ**

*Наведено результати теоретичних досліджень процесів виникнення та розповсюдження гідродинамічних та акустичних коливань в флюїдонасичених пластах. Висвітлено питання ефективного використання гідроакустичного впливу на привибійну зону з метою інтенсифікації припливу вуглеводнів. Виявлено протиріччя існуючих експериментальних та промислових випробувань, запропоновано нові підходи для реалізації процесів вуглеводневилучення.*

**Ключові слова:** генератор, свердловина, пласт, розробка, гідроакустика, пристрій.

Під час розроблення будь-якого родовища створюються всі умови для досягнення як найбільшої нафтогазовіддачі. Якщо кінцеве нафтогазовилучення всіх родовищ України на 2–3 % перевищуватиме середнє, це сприятиме значному приросту промислових запасів нафти і газу. Проблема підвищення нафтогазовіддачі вирішується не лише при розробленні нових родовищ, а й експлуатації діючих, навіть істотно виснажених. Під виснаженням у цьому разі слід розуміти вилучення переважно початкових запасів пластової енергії, що супроводжується значним зниженням пластового тиску. Відбір залишкової нафти і газу в таких умовах пов'язаний з низкою проблем, зокрема таких: при час зниженні тиску в пласті нафта частково дегазується і стає більш в'язкою; з'являється вільний газ, що погіршує фазову проникність породи для нафти; нафтовий поклад може більшою чи меншою мірою обводнитись. Роботи, з вилучення залишкових запасів прийнято називати вторинними

методами видобутку вуглеводнів. Для отримання максимально можливого результату від застосування методів підвищення вуглеводневилучення необхідно оцінити нафто- та водонасиченість експлуатаційних об'єктів, їх проникність та якість залягаючої в них нафти.

Відома велика кількість методів підвищення флюїдовилучення з пластів. Вони різняться типом використовуваної енергії, методами дії, характером взаємодії фаз. Сучасні методи нафтогазовилучення розділяють на чотири основні групи [1]: гідродинамічні; фізико-хімічні; газові; теплові.

Практика застосування зазначених методів засвідчує, що найчастіше вплив на пласт реалізується саме за комбінованим принципом дії: гідродинамічної та теплової, гідродинамічної та фізико-хімічної, теплової і фізико-хімічної та ін. Галузь ефективного застосування кожного з цих методів залежить від геолого-фізичних властивостей порід-колекторів; фізико-хімічних властивостей рідин, які насичують ці породи; періоду та стану розроблення покладу. Успішність застосування на конкретному родовищі певного методу підвищення нафтогазовилучення залежить від правильності його вибору, що має використовуватися на основі критеріїв, за якими його можливо застосувати. Ці критерії розробляють на основі аналізу результатів експериментальних та теоретичних досліджень.

Одним з перспективних напрямів вирішення проблеми підвищення нафтогазовіддачі пластів є використання різних хвильових процесів. Для успішного застосування хвильових технологій у процесах видобування нафти і газу необхідно попередньо ретельно проаналізувати всі чинники та визначити які саме параметри впливу забезпечать оптимальний ефект. Запропоновано технічне рішення підвищення ефективності процесу вилучення вуглеводнів, що цілком відповідає сучасним вимогам та включає в себе комплексний вплив. Гідроакустичне оброблення привибійної зони пласта дозволяє впливати на нафтогазові пласти за допомогою знакозмінного тиску різної частоти та інтенсивності. Розроблено хвильовий пристрій, що генерує енергію від потоку рідини, яка проходить крізь нього.

Розроблений генератор унікальний за конструктивним виконанням завдяки можливості використання в ньому будь-яких агресивних рідин. Конструкція гідродинамічного випромінювача акустичних коливань забезпечує довготривалий термін його експлуатації безпосередньо в потоках рідини, газу, нафти чи нафтопродуктів за високих тиску (до 30 МПа) та температури (100–150 °С). Елементи пристрою виготовлені з легованої сталі з хромовим покриттям, що забезпечує безаварійне використання випромінювача в агресивних середовищах за високих параметрах тиску та температури.

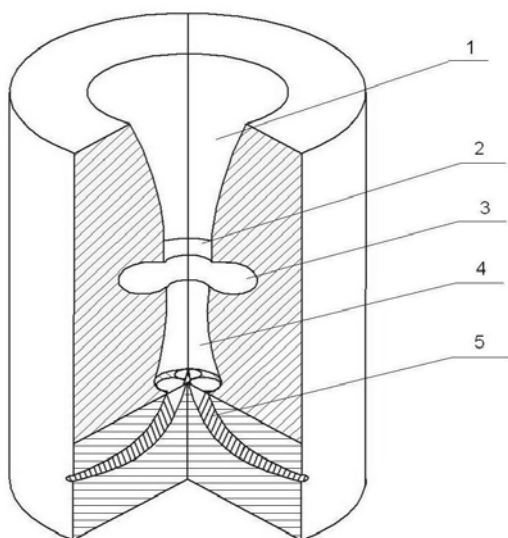


Рис. 1. Схема гідродинамічного генератора акустичних імпульсів

Гідродинамічний генератор акустичних імпульсів конструктивно відповідає вимогам, що висуваються до подібних пристроїв (рис. 1). Генератор під'єднують до колони НКТ [2] і опускають у свердловину до зони перфорації. Потім у гідродинамічний генератор під тиском подають робочий агент, який використовують при різних способах обробки ПЗП. Застосовувана суспензія потрапляє до вхідного отвору конічної форми 1, де виникає явище турбулентності.

Підчас взаємодії потоків осьового та приграничного шару робочого агента відбувається зміщення шарів. При цьому спостерігається випередження ядра центрального шару, що зумовлює підвищення швидкості та нагромадження енергії. За рахунок цього в концентраторі потоку 2 виникають пульсації значної інтенсивності. Приграничний шар після концентратора потоку потрапляє до камери завихрення 3, де набуває високої турбулентності й на виході з камери взаємодії з осьовим

шаром робочого агента. В результаті взаємодії шарів трьох потоків робочого агента, які рухаються з великою швидкістю під тиском, виникають інтенсивні гідроакустичні коливання, частота яких залежить від конструктивних параметрів генератора та початкового тиску. Далі робочий агент потрапляє до розділювача потоку 4, що спрямовує поділений потік до сопел із направляючими канавками 5. За рахунок цього підвищується енергія пульсуючого потоку та створюються гідроакустичні ударні імпульси тиску, що діють на стінки свердловини.

Запропонований пристрій генерує два види коливань: гідродинамічні та акустичні (звукові).

Параметри гідродинамічного впливу на ПЗП регулюють шляхом створення різного тиску в колоні, до якої під'єднаний гідродинамічний випромінювач.

Розглянемо залежність амплітуди та частоти гідродинамічних імпульсів з позиції оптимізації параметрів гідроімпульсного впливу на ПЗП. Градієнт тиску, що створюється поширюваною хвилею, описується залежністю [3]

$$\Delta P = \frac{4A}{\lambda} = \frac{4A\omega}{c}, \quad (1)$$

де  $A$  – амплітуда хвилі,  $\lambda$  – довжина хвилі,  $\omega$  – частота створюваних гідравлічних імпульсів,  $c$  – швидкість звуку в рідині.

Вважаючи рідину ньютонівською, застосуємо рівняння Гагена–Пуазейля для поширення швидкості руху флюїду в капілярі:

$$v(r) = \frac{1}{4\mu} (r^2 - r_0^2) A, \quad (2)$$

де  $\mu$  – коефіцієнт динамічної в'язкості,  $r$  – відстань від осі до капіляра,  $r_0$  – радіус капіляра.

Дотичні напруження на стінці капіляра визначаємо зі співвідношення

$$\tau_0 = \mu \frac{\partial v}{\partial r}. \quad (3)$$

Звідси, використовуючи рівняння (2), отримуємо

$$\tau_0 = \frac{r_0}{2} A. \quad (4)$$

З рівняння (4) випливає, що  $\tau_0$  для кожного окремого капіляру визначатиметься насамперед його радіусом, оскільки градієнт тиску в будь-якому об'ємі постійний. Відповідно на основі рівняння (4) отримаємо вираз для обчислення середньої дотичних напружень на стінках капілярів у середовищі [4]:

$$\langle \tau \rangle = \frac{\langle r \rangle}{2} A. \quad (5)$$

Важливою умовою для того, щоб на стінках капілярів зруйнувався поверхневий шар, створений відкладами кольматантів, є

$$\langle \tau \rangle \geq \delta, \quad (6)$$

де  $\delta$  – границя міцності кольматанта на зсув.

З урахуванням залежностей (1), (5) та (6) запишемо критерій ефективності гідроімпульсного впливу:

$$A\omega \geq \frac{\delta c}{2\langle r \rangle}. \quad (7)$$

Критерій (7) свідчить, що для руйнування кольматуючих відкладів на поверхні порового простору колектора необхідно, щоб добуток амплітуди гідро імпульсів на частоту перевищував деяке граничне значення, що визначається насамперед, характеристиками міцності кольматанта (міцністю на  $\delta$ ), а також властивостями пластового флюїду (швидкості звуку в ньому) та структури порового простору (густина розподілу порових каналів за радіусами). Проте енергія, яка передається середовищу при проходженні імпульсів, пропорційна:

$$E \sim (A\omega)^2. \quad (8)$$

Акустичні коливання, які генерує гідродинамічний випромінювач, доволі складні за природою, оскільки вони низькочастотні та поширюються в обмеженому середовищі. В зв'язку з цим оцінити випромінювану потужність доволі важко, що зумовлено двома чинниками. По-перше, відсутністю методів та пристроїв для визначення та оцінювання енергії акустичних хвиль. По-друге, утворення звуку в гідродинамічних випромінювачах супроводжується такими процесами, як високорозвинена турбулентність і акустика, а також переплетена гідродинаміка двофазної системи. Тому виділити енергетичні параметри акустичних хвиль доволі важко. Разом з тим відомо, що механізм утворення звуку в гідродинамічних випромінювачах пов'язаний з періодичними викидами робочої рідини з кавітаційної зони. Отже, можна доволі точно визначити об'ємну швидкість  $Q_0$ , яка створюється пульсуючим джерелом звуку. Відоме таке твердження: якщо розміри пульсуючого джерела набагато менші від довжини хвилі, яку він випромінює, таку систему можна розглядати як пульсуючу сферу [5]. Оскільки в розглянутому випадку ці умови зберігаються, випромінювану потужність можна обчислити за формулою

$$N = \left( \frac{\rho \omega^2}{4\pi \cdot c} \right) \left( \frac{Q_0^2}{2} \right), \quad (9)$$

де  $\rho$  – густина;  $\omega$  – частота;  $c$  – швидкість звуку в середовищі.

З урахуванням рівняння (9) та умови, що запропонований гідродинамічний випромінювач асиметричний, об'ємну швидкість  $Q_0$  можна визначити через коливну швидкість  $v$  руху пульсуючої сфери:

$$Q_0 = 4\pi r^2 v, \quad (10)$$

де  $r$  – радіус еквівалентної сфери.

Радіус еквівалентної сфери легко визначити геометрично. Коливну швидкість визначають за таких передумов. Виходячи з механізму звукоутворення легко можна визначити тривалість викидання вмісту кавітаційної зони. Коливна швидкість  $v$  пов'язана з акустичним тиском  $p_{ак}$  співвідношенням

$$v = -\frac{1}{\rho} \int_{-\infty}^t \nabla p_{ак} dt, \quad (11)$$

де  $\rho$  – густина середовища.

Основні ефекти акустичного поля пов'язані з процесами, які відбуваються в рідинах, тому важливо визначити пружну енергію, що потрапляє в рідину. За наближеним оцінюванням можна вважати, що енергія хвилі в початковий момент часу складається з повної пружної енергії деформації середовища  $W$ , яку визначають за формулою [6]:

$$W = (\sigma_{ij} e_{ij} - k_{п} p \zeta) \frac{1}{2}, \quad (12)$$

де  $\sigma_{ij}$  – тензор напружень;  $e_{ij}$  – тензор деформації скелету;  $k_{п}$  – коефіцієнт пористості;  $p$  – тиск у пористому середовищі;  $\zeta$  – деформація рідини.

Результати аналітичних досліджень засвідчують, що ефективність інтенсифікації припливу вуглеводнів гідродинамічним методом визначається оптимальною пружною енергією рідини, що передається вибійній зоні свердловини. Коли гідродинамічний випромінювач доволі близької розташовується до інтервалу перфорації, у рідині концентрується значна частина пружних коливань, що безпосередньо спрямовується на об'єкт оброблення (продуктивний пласт).

При застосуванні гідродинамічного випромінювача у промислових умовах його опускають у свердловину до вибою або зони перфорації. Між випромінювачем 1 та флюїдонасиченою породою 2 розміщуються кілька шарів з різними пружними властивостями (рис. 2): шари робочої рідини 3 товщиною 2–3 см та сталеві обсадні колони 4 товщиною 1–2 см; цементний камінь 5 товщиною 3–5 см. Така складна система шарів є своєрідним частотним фільтром випромінюваних хвиль. Від товщини шару залежить

акустична прозорість. Так, якщо товщина шару  $b$  набагато менша від довжини хвилі в матеріалі  $b \ll \lambda/4$ , коефіцієнт проникнення пружної енергії через шар змінюється неістотно. Коефіцієнт проникнення  $K$  визначає частку пройденої крізь шар пружної енергії щодо випромінюваної енергії. Важлива інформація міститься в залежності коефіцієнта проникнення  $|K|$  від частоти  $\omega$  порід різних типів (рис. 3) [5].

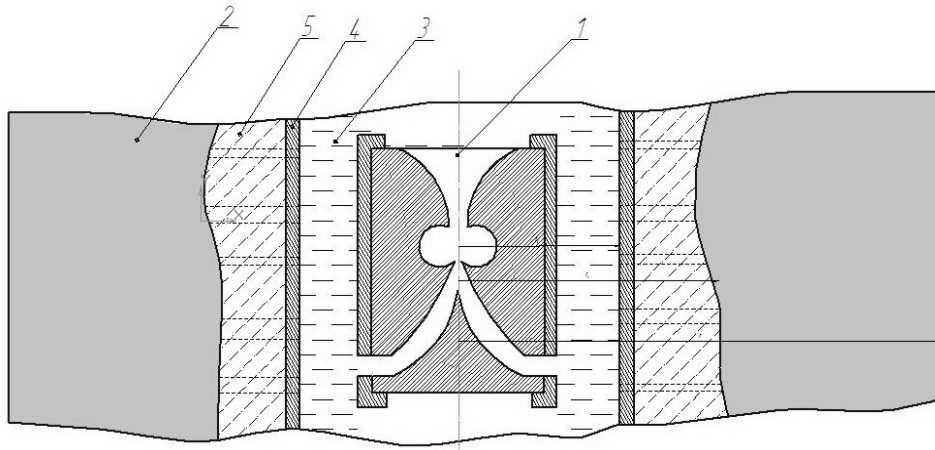


Рис. 2. Схема розташування гідродинамічного випромінювача в свердловині в розрізі

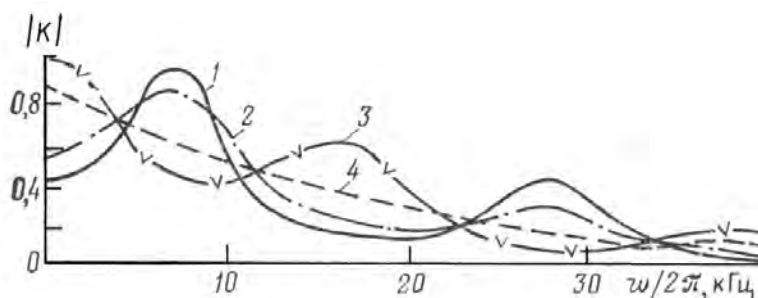


Рис. 3. Залежності коефіцієнта проникнення  $|K|$  акустичного поля від частоти  $\omega$  для різних порід: 1 – вапняку; 2 – пісковика; 3 – глини; 4 – водонасиченого піску

Інтенсивність акустичного поля на зовнішній стінці свердловини в породі  $I_{\Pi}$  виражається через інтенсивність, яку створює випромінювач у вільному об'ємі  $I_0$  [4]:

$$I_{\Pi} = I_0 \frac{|K|}{r_2 - r_1} \quad (13)$$

де  $|K|$  – коефіцієнт проникнення акустичного поля,  $r_1$ ,  $r_2$  – відстань від осі генератора відповідно до обсадної колони та цементного каменю

З рис. 2 випливає, що зниження частоти випромінювання призводить до збільшення коефіцієнту проникнення пружної енергії. При потраплянні до породи, акустична хвиля затухатиме через поглинання її породою та розсіюватиметься фронтом за законом

$$I = I_{\Pi} \frac{e^{-\alpha(r-r_2)}}{r - r_2}, \quad (14)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт затухання,  $r$  – відстань, на яку поширюються коливання у пласті, що залежить від типу насиченого флюїду.

Інтенсивність поля  $I$  з відстанню від стінки свердловини  $r$  залежить від типу флюїду, що насичує пласт. Практика показує, що найбільшою мірою інтенсивність залежно від відстані знижується в газонасичених породах. У водо- та нафтонасичених пластах інтенсивність акустичного поля з відстанню знижується приблизно однаково.

Важливим питанням при дослідженні акустичних хвиль є відбиття звуку. Цю величину характеризує такий параметр, як коефіцієнт відбиття звуку. З врахуванням залежності коефіцієнта поглинання звуку від інтенсивності поля  $I$ , густини енергії  $E$  і швидкості звуку  $c$  модуль коефіцієнта відбиття звуку можна записати у вигляді

$$|r_p| = \left[ \frac{\left(1 - \frac{I}{cE}\right)^2}{1 + \frac{I}{cE}} \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (15)$$

Безпосередньо вимірювати величини  $I$ ,  $E$ , які входять у рівняння (15), можна доволі наближено, тому безрозмірну величину  $\frac{I}{cE}$  запишемо як так

$$\frac{I}{cE} = \frac{2 \cos \varphi}{\left( \rho c \frac{v_0}{P_0} + \frac{1}{\rho c} \frac{P_0}{v_0} \right)}, \quad (16)$$

де  $\varphi$  – кут зсуву по фазі між звуковим тиском та коливною швидкістю;  $\rho$  – густина рідини;  $v_0$ ,  $P_0$  – амплітуда коливної швидкості відповідно частинок середовища та звукового (акустичного) тиску.

За залежностями (1)–(16) можна повною мірою оцінити основні параметри впливу гідроакустичної дії (інтенсивність, коефіцієнт відбиття, енергію та ін). Ці формули дають змогу чітко сформулювати критерії підбору конструктивних параметрів пристроїв, які застосовують для гідроакустичного оброблення пласта.

Отримані експериментальні дані свідчать про істотний вплив хвильових процесів на ефективність інтенсифікації припливу вуглеводнів. Разом з тим результати експериментальних досліджень акустичного та гідродинамічного впливу на пласт доволі часто носять суперечливий характер. Зокрема, в одних дослідженнях (Сулеймановим Б. А., Ісмайловим Ш. З., Мірзаджанзаде А. Х., Дибленко В. П., Хмелевим В. Н та ін.) наголошується на позитивному ефекті застосування низько- та височастотних коливань. Згідно з іншими дослідженнями (Кузнецов О. Л., Єфімова С. А., Дж. Чилингар та ін.) не всі твердження потрібно сприймати як істину.

В окремих випадках під дією гідроакустичних коливань вдається суттєво збільшити приплив флюїду або підвищити приймальність нагнітальних свердловин. В інших випадках ефекту акустичного та гідродинамічного впливу не спостерігається. Це зумовлено тим, що не повною мірою з'ясовано механізми явищ, що супроводжують поширення хвиль у насичених середовищах. Параметри впливу (частота, амплітуда, інтенсивність та ін.) визначають експериментально. З огляду на зазначені суперечності постає важливе питання, яке потребує теоретичного та експериментального дослідження: механізмів поширення різних хвиль по пласту та обґрунтування оптимального розв'язання поставлених проблем.

Розроблено стенд для дослідження залежностей між параметрами впливу на ПЗП. При цьому враховували набутий досвід [7] промислових випробувань гідродинамічного випромінювача акустичних коливань у процесі інтенсифікації свердловини Бухтівець-20 Битків-Бабчинського родовища. На основі аналізу результатів промислових випробувань гідродинамічного випромінювача акустичних імпульсів змінили геометричні параметри генератора і відповідно створили удосконалену конструкцію генератора, яка захищена патентом [2].

Таким чином, аналізуючи ефективність застосування зазначеної технології інтенсифікації зауважимо:

- найперспективнішим напрямом інтенсифікації припливу вуглеводнів є комплексне застосування гідродинамічного, фізико-хімічного та теплового впливу;

- ефективність використання гідродинамічних генераторів акустичних коливань визначається типом випромінювача, місцем його встановлення та режимом роботи;
- для гідроакустичного оброблення привибійної зони пласта найдоцільніше застосовувати генератори вихрового типу без рухомих елементів, оскільки вони забезпечують високу надійність та довговічність;
- результати випробування на виробництві гідродинамічного генератора акустичних коливань підтвердили ефективність використання цього типу випромінювачів;
- на основі експериментальних досліджень впливу геометричних параметрів генератора запропоновано вдосконалену конструкцію.

*Приведены результаты теоретических исследований процессов возникновения и распространения гидродинамических и акустических колебаний во флюидонасыщенных пластах. Освещены вопросы эффективного использования гидроакустического воздействия на призабойную зону в целях интенсификации притока углеводородов. Выявлены противоречия существующих экспериментальных и промышленных испытаний и предложены новые подходы к реализации процессов углеводородоизвлечения.*

**Ключевые слова:** генератор, скважина, пласт, разработка, гидроакустика, устройство.

*The article presents the results of theoretical investigations connected with the processes of formation and distribution of hydrodynamic and acoustic variations in fluid-saturated layers. It represents the issue connected with an efficient use of hydroacoustic impact on bottomhole zone in order to intensify hydrocarbon inflow. Inconsistency in existing experimental and industrial tests and revealed and new approaches for hydrocarbon extraction are suggested.*

**Key words:** generator, well, reservoir, development, hydroacoustics, device.

#### Література

1. Бойко В. С. Розробка та експлуатація нафтових родовищ. – К.: Реал-Принт, 2004. – 695 с.
2. Пат. України № 63187 Е21В 28/00. Генератор гідроакустичних імпульсів / Б. О. Чернов, М. Є. Чернова, М. М. Западнюк, та ін.; заявник Б. О. Чернов. – № u201105983; Заявл. 13.05.2011; Опубл. 26.09.2011; Бюл. №18.
3. Марьянчик В. И., Минеев А. В. Анализ гидродинамического воздействия на призабойную зону нефтеносного пласта // Engineering & Technologies 2. J. of Siberian Federal University. – 2010. – С. 154–158.
4. Повышение продуктивности и реанимация скважин с применением виброволнового воздействия / В. П. Дыбленко, Р. Н. Камалов, Р. Я. Шариффулин, И. А. Туфанов. – М.: Недра, 2000. – 381 с.
5. Кузнецов О. Л., Ефимова С. А. Применение ультразвука в нефтяной промышленности. – М.: Недра, 1983. – 192 с.
6. Кузнецов О. Л., Симкин Э. М., Чилингар Дж. Физические основы вибрационного и акустического воздействия на нефтегазовые пласты. – М.: Мир, 2001. – 260 с.
7. Дослідження геологічних і експлуатаційних характеристик Битків-Бабчинського родовища та застосування сучасних методів інтенсифікації / Чернов Б. О., Западнюк М. М., Чернова М. Є., Ільків І. М. // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2011. – № 3. – С. 85–89.

*Надійшла 07.06.12*