

## ГЕНЕРАЦІЯ ВІБРОКОЛИВАНЬ У ПРОЦЕСІ БУРІННЯ СВЕРДЛОВИН

М.Є. Чернова

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел.(03422) 48090,  
e-mail: physics@nuing.edu.ua

На даний час частка активних запасів нафти в балансі більшості нафтових компаній складає близько 45 відсотків і продовжує знижуватися. Частково це пов'язано з переходом основної групи родовищ на заключну стадію розробки. Тому одним з головних напрямків підвищення ефективності видобування нафти є вдосконалення технології нафтовидобування, що забезпечує інтенсифікацію притоків, підвищення продуктивності енерго- та ресурсозбереження у процесі експлуатації нафтових родовищ. Чималу роль тут відіграє відновлення та ремонт малодобітних свердловин, як наслідок супутніх техногенних процесів, що відбуваються в привибійній зоні та стовбурі свердловини.

Коливна механіка – достатньо новий розділ механіки та теорії нелінійних коливань, що інтенсивно розвивається в сучасній науці як в Україні, так і за її межами. Розвиток цього напрямку лежить в основі вібраційно-коливної техніки та технологій. Ще не так давно коливання та вібрація розглядалися з точки зору небажаних явищ, і навіть як шкідливі фактори, що призводили до різного типу руйнувань та аварій. На даний час вібрації та коливання знаходять широке застосування у різноманітних напрямках промисловості.

Поштовхом до розвитку коливної механіки ще у 1951 році стала робота відомого науковця П.Л.Капиці «Динамическая устойчивость маятника при колеблющейся точке подвеса», в якій була розв'язана задача про маятник з віброуючою точкою підвісу: по-суті запропоновано достатньо ефективний спосіб розгляду подібних задач. Виявилось, що за наявності вібрації можливим є стійке вихрове положення маятника. Таке незвично стійке положення завдячує наявності системи сил, зумовлених коливаннями, а саме вібраційних сил.

На даний час коло питань, пов'язаних з розв'язком сучасною вібраційно-коливною механікою, умовно поділяють на чотири типи, а саме:

- вплив коливань і вібрації на довільні механізми;
- задачі теорії синхронізації механічних коливних джерел;
- задачі теорії коливних переміщень;
- проблеми віброреології та створення динамічних матеріалів.

У ході досліджень розглядалося питання впливу обертового руху промивальної рідини на гідродинамічні процеси для підвищення її транспортуючих властивостей, особливо у процесі буріння горизонтальних свердловин. На сьогоднішньому етапі розвитку науки і техніки підвищення ефективності буріння горизонтально-скерованих свердловин відбувається за рахунок вдосконалення гідродинамічних циркуляційних процесів, що попереджають ускладнення, пов'язані з порушенням стійкості стінок свердловини, утворенням застійних зон, сепарацією шлама за значного зниження енергозатрат. Суть роботи полягає у формуванні стійкості обертово-поступального руху промивальної рідини в кільцевому каналі горизонтальної свердловини безпосередньо енергією потоку, а також обґрунтування методів регулювання гідродинамічних параметрів і структури потоку з врахуванням конкретних геолого-технічних умов.

Ключові слова: коливання, вібрація, промивальна рідина, буріння, свердловина.

На сегодняшний день часть активных запасов нефти в балансе большинства нефтяных компаний составляет более 45 процентов и продолжает снижаться. Частично это связано с переходом основной группы месторождений на заключительную стадию разработки. Поэтому одним из главных направлений повышения эффективности добычи нефти является усовершенствование технологии нефтеотдачи, что способствует интенсификации притоков, повышению продуктивности, энерго- и ресурсосбережения в процессе эксплуатации нефтяных месторождений. Не последнюю роль играет восстановление и ремонт малодобитных скважин, как следствие сопутствующих техногенных процессов, происходящих в призабойной зоне и в стволе скважины.

Вибрационная механика – довольно новый раздел механики и теории нелинейных колебаний, которые интенсивно развивает современная наука как в Украине, так и за ее пределами. Развитие этого направления базируется на вибрационно-волновой технике и технологиях.

Еще не так давно колебания и волны рассматривались как нежелательные явления и даже негативные факторы, способствующие возникновению разного типа аварий и разрушений. В настоящее время вибрации и колебания находят широкое применение во всевозможных направлениях промышленности.

Толчком к развитию вибрационной механики стала в 1951 году работа известного ученого П.Л.Капицы «Динамическая устойчивость маятника при колеблющейся точке подвеса», в которой была решена задача о маятнике с вибрирующей точкой подвеса: по сути был предложен достаточно эффективный способ решения таких задач. Оказалось, что при наличии вибрации возможно устойчивое вихревое состояние маятника. Такое необычно стойкое положение возможно благодаря наличию системы сил, обусловленных вибрацией, а именно вибрационных сил.

На современном этапе круг вопросов, связанных с решением современной вибрационно-волновой механикой, условно делят на четыре типа, а именно:

- влияние колебаний и вибраций на всевозможные механизмы;
- задачи теории синхронизации механических волновых источников;
- задачи теории вибрационных перемещений;
- проблемы виброреологии и создание динамических материалов.

*В процессе исследований рассматривался вопрос влияния вращательного движения промывочной жидкости на гидродинамические процессы для повышения ее транспортирующих свойств, особенно при бурении горизонтальных скважин. На современном этапе развития науки и техники повышение эффективности бурения горизонтально-направленных скважин возможно за счет усовершенствования гидродинамических циркулярных процессов, которые предупреждают осложнения, связанные с нарушением устойчивости стенок скважины, образованием застойных зон, сепарацией шлама при значительном снижении энергозатрат.*

*Суть работы состоит в формировании устойчивости вращательно-поступального движения промывочной жидкости в кольцевом канале горизонтальной скважины непосредственно энергией потока, а также обоснование методов регулирования гидродинамических параметров и структуры потока с учетом конкретных геолого-технических условий.*

Ключевые слова: колебания, вибрация, промывочная жидкость, бурение, скважина.

*At present time, the portion of active oil reserves in the balance of majority of oil companies is around 45% and continues to decrease. It is partially related to transition of the main group of fields into final stage of their development. Therefore, one of the principal policies in enhancement of oil recovery is improvement of oil recovery technology that would enable flow intensification and increase of effective energy and resource preservation in the process of exploitation of oil fields. Not a small role plays renewal and repair of marginal wells as a consequence of accompanying anthropogenic processes that take place in the bottomhole zone and well.*

*Oscillation mechanics is a relatively new field of mechanics and theory of nonlinear oscillations that is intensively developing in modern science of Ukraine and beyond its borders. Until recently, oscillations and vibrations were considered from the point of view of non-desirable phenomena, and even as harmful factors that would cause destructions and accidents of different types. Nowadays, vibrations and oscillations find a broad application in various branches of industry.*

*Back in 1951, the work of famous scientist P.L.Kapitsa "Dynamic stability of a pendulum with a vibrating point of suspension", that solved the problem of pendulum with a vibrating point of suspension, and, as a matter of fact, proposed the efficient enough way of consideration of the similar problems, gave impulse to the development of oscillation mechanics. It turned out that the stable vortex position of a pendulum is possible under vibrations. Such an unusual stable position is possible at the expense of existence of the system of forces caused by oscillations, namely – vibrational forces.*

*Currently, the circle of issues related to the solution of modern vibrational oscillation mechanics are conditionally divided into four categories, namely:*

- influence of oscillations and vibrations on voluntary mechanisms;
- problems of synchronization theory of mechanical oscillation sources;
- problems of theory of oscillation dislocations;
- problems of vibrational rheology and creation of dynamic materials.

*In the process of research, there was investigated the question of influence of rotary movement of washing fluid on hydrodynamic processes with the purpose of enhancement of its transportation properties, especially in the process of drilling of horizontal wells. At present stage of science and technology development, improvement of effectiveness of drilling of horizontal wells is done at the expense of improvement of hydrodynamic circulation processes that prevent complications related to stability disturbances of well walls, formation of stagnation zones, and separation of sludge with significant reduction of energy costs. The matter of the article is related to the process of formation of stability of rotary-forward motion of washing fluid in the annulus of horizontal well directly by the energy of the flow, and also substantiation of methods of regulation of hydrodynamic parameters and flow structure with consideration of concrete geological and technical conditions.*

Key words: vibrational processes, oscillations, rotary motion, washing fluid, flow, drilling, well, generator

Коливна механіка – достатньо новий розділ механіки та теорії нелінійних коливань, що інтенсивно розвивається в сучасній науці як в Україні, так і за її межами. Це пов'язано з тим, що коливна механіка є основою при розробці вібраційно-коливної техніки та технологій. Нещодавно коливання та вібрація розглядалися як небажані явища і навіть шкідливі фактори, що призводили до різного типу руйнувань та аварій. На даний час вібрації та коливання знаходять широке застосування у різноманітних напрямках промисловості.

Поштовхом до розвитку коливної механіки ще у 1951 році стала робота відомого науковця П.Л.Капіци «Динамическая устойчивость маятника при колеблющейся точке подвеса», в якій була розв'язана задача про маятник з віброуючою точкою підвісу: по-суті запропоновано достатньо ефективний спосіб розгляду подібних задач. Виявилось, що за наявності вібрації є можливим стійке вихрове положення маятника. Таке незвично стійке положення завдячує на-

явності системи сил, зумовлених коливаннями, а саме вібраційних сил.

На даний час коло питань, пов'язаних з розв'язком сучасною вібраційно-коливною механікою, умовно поділяють на чотири типи, а саме:

- вплив коливань і вібрації на довільні механізми;
- задачі теорії синхронізації механічних коливних джерел;
- задачі теорії коливних переміщень;
- проблеми віброреології та створення динамічних матеріалів.

Коливна гідродинаміка гетерогенних систем є самостійним розділом механіки коливань, яка досить інтенсивно розвивається завдяки зусиллям як вітчизняних, так і зарубіжних науковців [1, 2, 3, 4].

Науковий інтерес викликають роботи, де досліджується вібраційна теплова конвекція, що характеризує вплив віброколивних процесів на динаміку неоднорідної за густиною нестискуваної рідини [5, 7]. Поведінка різних фазових

домішок (твердих, краплинних, газових) у рідині, що зазнає впливу вимушених коливань, має певні особливості. Серед цих особливостей можна виділити дві суттєві – процеси вібропереміщень та ефекти локалізації, тобто скероване переміщення домішок (вибуреної породи) під впливом коливань та утворення в певних місцях стовпа рідини їх локальних скупчень.

Теоретичні дослідження свідчать, що динаміка фазових складових (твердих чи газоподібних) в рідині під впливом періодичних чинників залежить від генерованої частоти.

У високочастотному діапазоні, де частота коливань є досить високою, ефекти стискуваності не проявляються, тому розглядаючи осцилюючий рух рідини в'язкими пристінковими шарами Стокса можна нехтувати, а течію вважати потенціальною.

В нафтогазовій промисловості застосовуються в'язкі рідини, тому дослідження впливу коливного процесу на рідини, коли їх стискуваність є несуттєвою, мають практичний інтерес. Велике значення мають дослідження генерації коливань на фазові включення в рідинах в межах помірних ( $\sim 10^2$  Гц) та низьких ( $\sim 1\div 10$  Гц) частот.

Як показали дослідження, тверді домішки в рідині у ході поступального коливного руху під дією сил інерції зазнають коливань, а гідродинамічна взаємодія тіла, яке коливається з рідиною, призводить до виникнення середньої за часом сили, що діє на тіло. Оскільки коливання рідини є ангармонічними – рідина має різну швидкість у різних напрямках (існує градієнт швидкості рідини), – тому тверді частинки рухаються у стовпі рідини вгору.

Явище коливного переміщення тіл може відбуватися в асиметричних системах, і ця асиметрія може бути силовою, кінематичною, структурною, градієнтною, хвильовою та ін. Переміщення тіл є можливим і під впливом симетричних коливань механічної системи. Під дією гармонічних коливань домішки, які володіють більшою густиною, ніж рідина, можуть спливати (ефект Челомея) [6]. Особливий інтерес викликають комбіновані коливання, зокрема поступально-обертові, коли обертова складова спричинює коливання рідини відносно трубного чи позатрубного простору, а інтенсивна поступальна складова – синхронні коливання твердої фракції в рідині, які є за амплітудою значно більші, ніж за наявності лише поступальних вібрацій.

Ефект генерації коливань середніх ( $\sim 10^2\div 10^3$  Гц) частот, що діють на тіло в порожнині з рідиною, яка знаходиться під впливом комбінованих коливань, вперше експериментально виявлені і теоретично описані в роботі [8], де встановлено, що під час коливань на тіло в рідині діє середня сила, спрямована вздовж градієнта кінетичної енергії коливного руху рідини.

Проведені теоретичні дослідження стосовно взаємодії твердих тіл під впливом коливних процесів показали, що незалежно від того, чи коливний рух відбувається в рідині, де є тверді

тіла, чи коливний рух відбувається з твердим тілом в рідині, що сама не зазнає коливного процесу, спостерігається гідродинамічна взаємодія тіл [9, 10] в результаті чого за певних параметрів тіла притягалися. Сила притягання швидко спадає зі збільшенням віддалі між тілами, і діє лише на віддаль, співрозмірних з розмірами самих тіл. Встановлено [11], що підняття і підвіс важкого твердого тіла в рідині за допомогою коливань іншого твердого тіла, що знаходиться над ним, не залежить від в'язкості рідини. Такий процес характеризується гістерезисом, тобто прилипання нижнього тіла до верхнього, що коливається, і падіння нижнього тіла відбувається за різних параметрів коливань.

Дослідження поведінки сукупності дрібних часток на віброуючій поверхні проводив свого часу Фарадей. Він досліджував тонкі шари сипкого середовища в газах під дією коливань і ще тоді отримав результати, які проявлялися в переміщенні маси піску і виникненні геометрично упорядкованих структур. В роботах [12, 13] наведено результати дослідження сипких середовищ в рідинах під впливом різних видів коливань. Під час колових поступальних коливань одночасно з виникненням на поверхні сипкого середовища рельєфу у вигляді тримірних гексагональних структур спостерігалася генерація обертання всього шару піску. У випадку обертаних коливань відбувається переміщення сипкого середовища в напрямку до осі коливань. Під час коливання самої порожнини поверхня піску займає похиле положення.

Досліджувалася [14] седиментація сипучого середовища як у вертикальних, так і в похилих каналах, заповнених рідиною, що здійснюють поступальні поздовжні коливання. Цікавим є ефект пакування піску в блоки, між яким знаходиться рідина. Спостерігається вібраційно-коливна стабілізація нижньої межі піщаних блоків, а швидкість седиментації при цьому на порядок нижча, ніж за відсутності коливань.

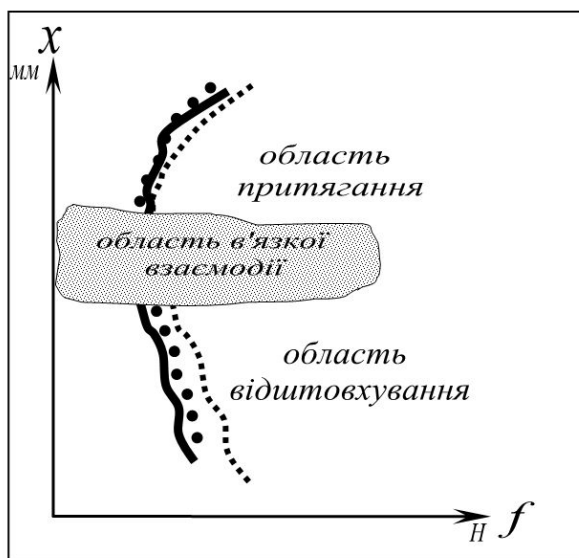
Динаміка сипкого середовища в рідині з позиції впливу коливань, напрям яких є дотичним до межі поділу, показала збудження квазі-стаціонарного просторового періодичного рельєфу на межі поділу середовищ. Як виявилось, формування рельєфу відбувається після переходу сипкого середовища у зріджений стан і пов'язане з проявом нестійкості тангенціальних розривів на межі поділу середовищ, що рухаються одні відносно одних (нестійкість Кельвіна-Гельмгольца) [15]. При цьому поведінка системи «пісок-рідина» є аналогічною до поведінки двох незмішуваних рідин з різною густиною під час горизонтальних коливних процесів. Для опису динаміки такої системи автором [16] вперше було введено коливний аналог числа Фруда:

$$W=2bQ/gL,$$

де  $b$  – амплітуда коливань, м;  
 $Q$  – циклічна частота,  $c^{-1}$ ;  
 $L$  – характерний розмір, м.

Проведено теоретичні дослідження динаміки слабконеоднорідної зваженої твердої фази в рідині під впливом високочастотних коливань, у випадку, коли період коливань, час релаксації швидкості часток і рідкої фази є співрозмірними, відбувається зсув фаз між коливаннями частинок і рідини. Було виявлено, що під час великого міжфазного тертя та частоті  $\sim 10^3$  Гц коливань речовину, що перебуває у зваженому стані, можна описувати в межах однорідної моделі, де враховуються інерційні властивості рідини і часток, що перебувають у зваженому стані та ефект приєднання мас. Стало очевидним, що поряд з монотонним механізмом збудження нестійкості з'являється можливість коливної складової. Як виявилось, інтервал помірних і низьких частот не достатньо досліджені.

У цьому інтервалі частот визначну роль відіграє в'язкість рідини. На віддаль, що відповідають товщині шару Стокса, проявляються сили відштовхування, в той час як на більших віддаль між частинками твердої фракції домінують сили притягання (рис. 1). Дослідження підйимальної сили в широкому інтервалі частот коливань показали, що в низькочастотному діапазоні (1–10 Гц) сили притягання між частинками не проявляються, а сили відштовхування зменшуються з віддаленням частинок за експоненціальним законом.



**Рисунок 1 – Залежність сил притягання та відштовхування від відстані між частинками (різниця між частотами 30 Гц)**

У випадку високих частот ( $10^2 \div 10^3$  Гц) залежність сили взаємодії від віддалі між тілом, що знаходиться в рідині, і стінкою має мінімум, а на межі домінує сила відштовхування, яка швидко спадає з віддаленням. За межею області в'язкої взаємодії проявляється сила вібраційного притягання, яка також спадає з віддаленням. В залежності від діапазону частотних коливань важка фракція вибуреної породи може перебувати у зваженому стані в статичному силовому полі.

Дослідження поведінки твердого тіла в рідині під впливом обертового коливного руху в залежності від частоти показало немонотонну зміну параметра  $Wt$ , що характеризує підйом і падіння тіл в рідині в полі сил тяжіння. Встановлено, що в діапазоні помірних ( $\sim 10^2$ ) і низьких ( $\sim 1 \div 10$  Гц) частот ефект спливання твердих часток вибуреної фракції ускладнюється наявністю сил близької взаємодії зі стінками бурильної колони: стрибкоподібним переходам тіла від однієї межі шару до іншої у випадку підвищення і пониження інтенсивності коливань передують монотонне переміщення частки від межі на віддалі порядку масштабу в'язкого граничного шару Стокса. Таким чином, динаміка твердої фракції вибуреної породи у в'язкій рідині під час обертових коливних рухів бурильної колони визначається двома явищами. Одне з них – це явище левітації важкого тіла у пульсуючому рухомому потоці, який не зв'язаний з наявністю стінок бурильної колони і визначається лише неоднорідністю потоку. Другим є явище близької в'язкої взаємодії зі стінками бурильної колони, яке проявляється на віддаль порядку товщини шару Стокса. Перше явище зі збільшенням в'язкості рідини слабшає, вібраційна підйимальна сила спадає, друге ж зі збільшенням товщини в'язкого шару Стокса підсилюється.

Оскільки в потоці рідини існує певна гідродинамічна взаємодія між самими частинками вибуреної породи, то ж неабиякий інтерес мають дослідження впливу коливних процесів на цю взаємодію.

Дослідження впливу обертових коливань на близьку гідродинамічну взаємодію часток показали, що в мало в'язких рідинах взаємодія має відштовхувальний характер. Сила відштовхування швидко спадає з відстанню. В діапазоні високих частот коливань під час взаємодії тіл визначну роль відіграє амплітуда швидкості коливань. У в'язких рідинах зі зниженням частоти сили відштовхування слабшають, відбувається суттєва зміна характеру вібраційної взаємодії на відносно малих віддаль, а саме – частинки починають притягатися.

Вивчення характеру динаміки сипкого середовища, яке складається з великої кількості часток, що знаходяться у нестискуваній в'язкій рідині під дією горизонтальних поступальних коливань, продемонструвало, що під впливом дотичних до границі розмежування середовищ коливань, сипка складової суміші переходить в зріджений стан. Рельєф, що при цьому розвивається, має вигляд стабільної системи гребенів, орієнтованих перпендикулярно до осі коливань. Зі зниженням інтенсивності коливань динамічний рельєф зникає, і сипке середовище переходить у квазітвердий стан. Зі зниженням частоти поріг збудження динамічного рельєфу підвищується, а в переходах сипкого середовища у зріджений і квазітвердий стани з'являється гістерезис. Дослідження проводились для різних варіацій розмірів частинок і в'язкості рідин.

Досліджено надкритичну динаміку рельєфу залежно від параметрів коливань та харак-

терних розмірів часток сипкого середовища. Встановлено, що у випадку дрібних часток зміна характерного періоду рельєфу є немонотонною, що пояснюється процесами зрідження сипкого середовища. Виявлено структури з подвоєним просторовим періодом. Можливим є формування стійкої динамічної системи з двовимірних гребенів, розділених чистою рідиною, з практично вертикальними схилами. В експериментальних і теоретичних результатах зріджене сипке середовище і чиста рідина розглядалися як дві рідини, що не змішуються, і на межі поділу сили поверхневого натягу є відсутніми.

Рідина, що рухається затрубним простором у процесі буріння вертикальних, похило-скерованих та горизонтальних свердловин – це струминний турбулентний потік, в різних ділянках якого присутні як вільні, так і пристінкові зсувні шари з когерентними структурами, що розвиваються під дією вібраційно-коливних процесів. В таких структурах наявні: критичні точки з максимальними коефіцієнтами тепломасообміну; різке викривлення ліній течії; в пристінковій частині струмини мають місце локальні нестационарні відриви потоку. Тому дослідження фундаментальних фізичних ефектів та явищ, що їх супроводжують, є актуальним.

У струминних течіях наявні когерентні структури. Це це відносно-масштабні детерміновані вихори в шарах змішування, що характеризуються значним часом життя. Ці структури виникають унаслідок злиття вихорів менших розмірів, що розвиваються в зсувному шарі як результат нестійкості Кельвіна-Гельмгольца. Когерентні структури містять значну частину турбулентної кінетичної енергії потоку і значною мірою визначають інтенсивність процесів перенесення.

Загальновідомо, що зовнішні періодичні збурення потоку впливають на характеристики струмини. Збудження потоку на частоті спрямування когерентних структур, як правило, призводить до їх регуляризації і підсилення. Отже, вплив на потік навіть низькоамплітудних (малоенергетичних) збурень дає змогу впливати на турбулентні характеристики і процеси тепломасообміну в потоці.

Комплексний потенціал руху потоку рідини з інтенсивністю  $\chi$ , центр турбулентності якого перебуває в деякій точці  $Z_0$ , описується рівнянням:

$$\omega = i\chi \ln(z - z_0). \quad (1)$$

Структура, що виникає, в поперечному перерізі навколо труби в затрубному просторі під дією коливальних процесів приведено на рис. 2, де лінії об'єднують миттєві місця вузлів.

Загальне рівняння руху рідини в структурі можна подати у вигляді:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{\partial \Psi(x, y, t)}{\partial y}; \quad \frac{dy}{dt} = -\frac{\partial \Psi(x, y, t)}{\partial x}; \quad (2)$$

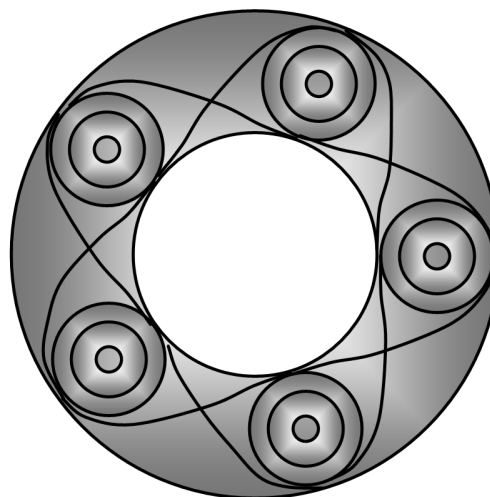


Рисунок 2 – Структурна схема миттєвих місць вузлів

а рівняння, якими описуються лінії течії з врахуванням структури, що виникає за цих умов, має вигляд:

$$\Psi = \frac{\chi}{4\pi} \ln((x \pm 2a)^2 + y^2) + \frac{\chi}{4\pi} \ln(x^2 + y^2) + \frac{\chi}{4\pi} \ln((x \pm 2a)^2 + y^2) - \frac{25\chi}{96\pi} \ln(x^2 + y^2), \quad (3)$$

де  $x$ , та  $y$  – це координати осей в поперечному перерізі потоку рідини;

$a$  – відстань між шарами потоку в радіальному напрямку;

$\chi$  – інтенсивність потоку.

Тоді комплексний потенціал руху рідини такої системи описується рівнянням, що має вигляд:

$$\omega_n = i\chi \ln(z) + i\chi \ln(z \pm a) + \dots + i\chi \ln(z \pm na) \quad (4)$$

В роботах [17, 18] наведено результати досліджень закономірностей розвитку великомасштабних структур в умовах близького розміщення твердих поверхонь, якими в нашому випадку може бути стінка стовбура свердловини, або поверхня бурильної колони. Розглядалася можливість управління потоком за допомогою створення періодичних коливальних впливів на інтенсивність процесів переносу в обмежених струминних течіях, якими є рухомі промивальні рідини в затрубному просторі свердловини.

Експериментальні дослідження стосувалися вивчення околу критичної точки з допомогою подвійних електродифузійних давачів тертя і методу Partikle Image Velocivetry (PIV). Метод PIV базується на законах статистичної фізики, який останнім часом набуває досить широкого застосування. Найчастіше використовують розподіл Гіббса, метод Монте-Карло та ін.

Це дало можливість визначити характеристики зон нестационарних локальних відривів і на основі можливостей керування спектром турбулентних пульсацій з допомогою різних методів активного впливу, дослідити чутли-

вість струмини до зовнішніх періодичних збурень різної частоти і амплітуди. Вперше показано, що низькоамплітудне зовнішнє збурення струмини на частотах в діапазоні максимальної сприйнятливості призводить до зниження величини сили тертя та різкого підвищення рівня пульсацій. Встановлено, що резонансний ріст пульсаційних коливань струмини тісно пов'язаний з когерентною складовою.

Дослідження виявили ефект загасання когерентних структур в рідинах з дрібнодисперсною газовою фазою. Було визначено спектр можливих режимів течії – від автоколивань до стаціонарних зі стійким приєднанням струмин. Досліджено гістерезисні явища під час неперервної зміни граничних умов для витоку струмин в обмежений простір, яким є в нашому випадку затрубний простір свердловини. Виявлено значний вплив ефекту Коанда на закономірності струминних течій в затрубному просторі свердловини.

У ході досліджень розглядався вплив обертового руху промивальної рідини на гідродинамічні процеси для підвищення її транспортуючих властивостей, особливо у процесі буріння горизонтальних свердловин. Авторами [19, 20] показано підвищення ефективності буріння горизонтально-скерованих свердловин за рахунок вдосконалення гідродинамічних циркуляційних процесів, що попереджають ускладнення, пов'язані з порушенням стійкості стінок свердловини, утворенням застійних зон, сепарацією шламів за значного зниження енергозатрат. Зміст роботи полягає у формуванні стійкості обертово-поступального руху промивальної рідини в кільцевому каналі горизонтальної свердловини безпосередньо енергією потоку, а також обґрунтування методів регулювання гідродинамічних параметрів і структури потоку за степеневим законом з врахуванням конкретних геолого-технічних умов.

На даний час частка активних запасів нафти в балансі більшості нафтових компаній складає біля 45 відсотків і продовжує знижуватися. Частково це пов'язано з переходом основної групи родовищ на завершальну стадію розробки. Тому одним з головних напрямків підвищення ефективності видобування нафти є вдосконалення технології нафтовидобування, що забезпечує інтенсифікацію притоків, підвищення продуктивності енерго- та ресурсозбереження у процесі експлуатації нафтових родовищ. Чималу роль відіграє відновлення та ремонт малодебітних свердловин, які стали такими внаслідок супутніх техногенних процесів, що відбуваються в привибійній зоні та стовбурі свердловини.

Вибір методу дії на привибійну зону пласта здійснюється здебільшого емпірично, оскільки експериментальні дослідження завжди пов'язані з великими затратами. Може не завжди вдається здійснити ефективний вибір методу впливу.

Проведення досліджень практики капітальних ремонтів свердловин показали, що серед великої кількості методів обробки свердловини

досить добре себе зарекомендував спосіб м'якого, структурозберігаючого впливу на привибійну зону пласта шляхом дренавання свердловини низькочастотними пульсаціями.

Цей спосіб призводить до розсіяння матеріалу, що колюматує ефективний пустотний простір по об'єму пласта, розблоковує зони, повністю насичені нафтою та пластовою водою. Цей спосіб може ефективно використовуватись сумісно з традиційними технологіями інтенсифікації нафтовіддачі, такими як кислотна обробка, застосування багатофункціональних реагентів та розчинів.

Авторами [21] на основі математичного моделювання гідродинаміки, фільтрації, тепломасообміну, використовуючи системний підхід, доведено можливість аналізу динаміки зміни витрат і тисків у різних частинах системи, що дає можливість визначати умови та розраховувати кінетику масообмінних та фільтраційних процесів у свердловині та пласті, оцінюючи енергетику обробки привибійної зони. Це уможлиблює вибір економічно ефективних режимів під час компоновки привибійного обладнання та пошук нових технічних рішень в пульсаційній технології очищення стовбура свердловини та привибійної зони пласта.

Результати досліджень показали, що перевага надається процесу пульсаційного дренавання з протоком, де одночасно є можливим очищення та винесення забруднень, шламів на денну поверхню. Було також встановлено, що при використанні технології з різким перепадом тиску в 1÷2 МПа, відбувається процес «кипіння» рідини, а утворені при цьому бульбашки, бомбардуючи поверхню обсадної колони, підвищують ефективність відшарування забруднень. В розрахунках динаміки фільтраційного потоку авторами [22] встановлено умови виникнення позитивної депресії у вибої свердловини.

Авторами [23] встановлено, що в умовах високого тиску в ресивері, що перевищує сили тертя в трубах, у схемі з пакером спостерігається чітко виражений частотний режим впродовж усього періоду пульсацій що має вигляд поздовжніх коливань частотою 1 Гц, що є досить ефективним у процесі відшарування адсорбційних відкладів та механічних домішок як у стовбурі свердловини, так і в привибійній зоні пласта. Механізм цього впливу полягає у руйнуванні структури поверхневих граничних шарів та зменшенні зчеплення рідини і твердої фази, що призводить до підвищення проникності та деколюматції привибійної зони.

Аналіз ефективності енергозатрат показав, що найбільш економічним є режим використання пакера, де середня потужність становить 1÷3 кВт, а пульсаційний режим з протоком енергозатратно є нижчим на 30-40%, ніж неперервний.

Гідроімпульсні або пульсаційні методи впливу на свердловину і пласт є сумісними з багатьма способами обробки привибійної зони. Це робить їх універсальними під час розробки та експлуатації низькодебітних свердловин, кількість яких на сьогоднішній час становить бли-

зько 55%. В запропонованому способі стабілізація дебіту та інтенсифікації притоку нафти в свердловині, пов'язана зі зниженням силового навантаження та підтримкою однорідності в пласті.

Математичне моделювання гідродинаміки, фільтрації, тепломасообміну, дозволяє використовуючи системний підхід, аналізувати динаміку зміни витрат і тисків на різних ділянках системи, визначити умови та розрахувати кінетику масообмінних та фільтраційних процесів у свердловині та пласті, оцінити енергозатрати в процесі очищення стовбура свердловини та привибійної зони.

Зокрема під час розрахунків застосовується функція течії  $\Psi$ , яка визначає поле швидкостей з умови:

$$\Omega = \nabla \times u,$$

тож в радіальному напрямі поперечного перерізу в сферичних координатах маємо:

$$u = \left( 0, \frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial \Psi}{\partial \varphi}, -\frac{\partial \Psi}{\partial \theta} \right),$$

$$\Delta \Psi = -\omega = \frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \sin \theta \frac{\partial \Psi}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{\sin^2 \theta} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial \varphi^2}, \quad (5)$$

де в правій частині застосовано оператор Бельтрамі-Лапласа, а щоб виконувалась теорема Кельвіна, для циркуляції застосовується функція Гріна  $G(\theta, \varphi, \theta', \varphi')$ , тоді оператор Бельтрамі-Лапласа застосовують у вигляді:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \sin \theta \frac{\partial G}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{\sin^2 \theta} \frac{\partial^2 G}{\partial \varphi^2} = \\ & = \delta(\theta, \varphi, \theta', \varphi') - \frac{1}{4\pi}. \end{aligned}$$

Це рівняння задовольняє функція:

$$G(\theta, \varphi, \theta', \varphi') = -\frac{1}{2\pi} \ln \sin \left( \frac{1}{2} \gamma(\theta, \varphi, \theta', \varphi') \right), \quad (6)$$

де  $\gamma(\theta, \varphi, \theta', \varphi')$  - центральний кут між точками з координатами  $(\theta, \varphi)$  і  $(\theta', \varphi')$ .

Із застосуванням функції Гріна та формул тригонометричних перетворень функція течії  $\Psi$ , набуде вигляду:

$$\Psi(\theta, \varphi) = \int_s \omega(\theta', \varphi') \ln(1 - \cos \gamma) \sin \theta' d\theta' d\varphi', \quad (7)$$

де інтегрування ведеться за площею кільця поперечного перерізу.

Далі N-ї кількості збурень рівняння руху записуються у вигляді:

$$\dot{\theta}_i = -\frac{1}{4\pi} \sum_{j=1, i \neq j}^N \Gamma_j \frac{\sin \theta_j \sin(\varphi_i - \varphi_j)}{1 - \cos \gamma_{ij}}, \quad (8)$$

$$\sin \theta_i \dot{\varphi}_i = -\frac{1}{4\pi} \times \quad (9)$$

$$\times \sum_{j=1, i \neq j}^N \Gamma_j \frac{\cos \theta_i \sin \theta_j \cos(\varphi_i - \varphi_j) - \sin \theta_i \cos \theta_j}{1 - \cos \gamma_{ij}},$$

де  $\gamma_{ij} = \gamma(\theta_i, \varphi_i, \theta_j, \varphi_j)$ ;

$\Gamma_j$  – інтенсивність j-го збурення.

У процесі опису гідродинаміки та нестаціонарної фільтрації враховується взаємозв'язок між окремими частинами пульсуючої системи на основі аналізу багатокомпонентної нелінійної системи диференціальних рівнянь.

Аналіз літературних джерел [24] свідчить, що низькочастотні пульсації на два-три порядки прискорюють процеси релаксації механічних напружень, що ліквідує негативні наслідки буріння і прострелів перфорації, сприяє підтриманню пластового тиску та його рівномірності всередині пласта. Цей факт є загальним для всіх пульсаційних гідродинамічних режимів дренавання під час очищення стовбура та привибійної зони свердловини.

Аналіз результатів промислових досліджень на нафтових свердловинах вітчизняних та зарубіжних компаній підтверджує постійну закономірність процесів, що відбуваються під впливом дії пульсаційної обробки, а саме: вихід газу, виділення в'язкої нафтоводяної емульсії та рідини з плівкою нафти, винесення на денну поверхню легких зважених механічних домішок у вигляді солей та окислів.

Автором [25] було досліджено рух твердих включень рідини в неоднорідній стоячій хвилі. Було встановлено, що частинки можуть локалізуватися у гребенях і у вузлах хвилі як на поверхні стінки, так і на певній відстані від неї у вигляді кілець. Встановлено, що в залежності від виду джерела коливань, частоти коливань тверді частинки можуть концентруватися не тільки у поздовжньому напрямку, а й в поперечному. Розглядався і комбінований вплив на суміш як ультразвуку, так і низькочастотних коливань. Результати досліджень показали, що за допомогою низькочастотних коливань можна змусити локальні скупчення рухатися у вертикальному напрямку.

Авторами [26, 27, 28, 29] досліджувався рух твердих і газоподібних включень у рідині, де існують вертикальні коливання – випадкові і гармонічні. Результати досліджень показали, що і випадкові, і гармонічні коливання за певних значень параметрів спричинюють появу коливних сил, які можуть утримувати дисперсні частинки всередині рідини, що характеризується відносними положеннями рівноваги.

Для дослідження стійкості відносних положень рівноваги застосовується критерій сформульований в роботі [30], якщо гамільтоніан у системі координат, яка рухається разом з системою, досягає у положенні рівноваги свого трансверсального мінімуму або максимуму, то таке положення рівноваги є стійким.

Для опису такої системи вдалим є застосування рівнянь Гамільтона з таким гамільтоніаном і канонічними змінними:

$$H = \frac{1}{4\pi} \sum_{i < j} \Gamma_i \Gamma_j \ln \ell_{ij},$$

$$P = \sqrt{|\Gamma_i|} \cos \theta_i, \quad Q = \sqrt{|\Gamma_i|} \varphi_i,$$

$$\dot{P}_i = \frac{\partial H}{\partial Q_i}, \quad \dot{Q}_i = -\frac{\partial H}{\partial P_i}, \quad (10)$$

де  $\ell_{ij}^2 = (X_i - X_j)^2 = 2(1 - \cos \gamma_{ij})$

Дужка Пуассона для цієї гамільтонової системи має вигляд

$$\{f, g\} = \sum_{k=1}^N \frac{1}{\Gamma_k} \left( \frac{\partial f}{\partial \cos \theta_k} \frac{\partial g}{\partial \varphi_k} - \frac{\partial f}{\partial \varphi_k} \frac{\partial g}{\partial \cos \theta_k} \right),$$

$$\{\varphi_i, \cos \theta_j\} = \frac{\delta_{ij}}{\Gamma_i}, \quad (11)$$

де  $\delta_{ij}$  - символ Кронекера.

Окрім гамільтоніана  $H$ , ця система допускає ще три інтеграли руху

$$M_1 = \sum_{i=1}^N \Gamma_i \sin \theta_i \cos \varphi_i = const,$$

$$M_2 = \sum_{i=1}^N \Gamma_i \sin \theta_i \sin \varphi_i = const,$$

$$M_3 = \sum_{i=1}^N \Gamma_i \cos \theta_i = const,$$

що утворюють вектор, який називають моментом збурень.

Вищезазначені величини  $H, M_1, M_2, M_3$  дають три незалежних інволютивних інтеграли:

$$\{H, M_3\} = 0,$$

$$\{H, M_1^2 + M_2^2\} = 0,$$

$$\{M_3, M_1^2 + M_2^2\} = 0.$$

Положення рівноваги або відносної рівноваги у системі, яка в нашому випадку спричинює утримування частинки в середині рідини описується також рівняннями у векторній формі типу:

$$\dot{X}_i = \sum_{k=1, k \neq i}^N \frac{\Gamma_k}{2\pi} \frac{X_k \times X_i}{(X_i - X_k)^2} + \Omega e_z \times X_i,$$

$$\dot{X}_j = \sum_{k=1, k \neq j}^N \frac{\Gamma_k}{2\pi} \frac{X_k \times X_j}{(X_j - X_k)^2} + \Omega e_z \times X_j,$$

а після математичних перетворень для  $\ell_{ij}^2 = (X_i - X_j)^2$  отримаємо:

$$\frac{d\ell_{ij}^2}{dt} = \sum_{k=1, k \neq i, k \neq j}^N \Gamma_k \frac{V_{ijk}}{\pi} \left( \frac{1}{\ell_{ik}^2} - \frac{1}{\ell_{jk}^2} \right), \quad (12)$$

де  $V_{ijk} = X_i \times X_j \times X_k$ .

Положення рівноваги наявне у випадку, коли  $\frac{d\ell_{ij}^2}{dt} = 0$ . Тоді рівняння записується у матричній формі, а їх розв'язок дає можливість визначити матриці, в ядрах яких існує наперед заданий вектор  $\Gamma$ . Після цього визначається, які зі знайдених матриць містять структуру, задану співвідношенням рівноваги. З іншого боку при заданій матриці можна відшукати обмежену

кількість інтенсивностей  $\Gamma$  для даного потоку з врахуванням усіх його реологічних параметрів, при яких система (12) знаходиться у рівновазі, тоді задача зводиться до опису ядра лінійного оператора, заданого матрицею. Так знаходяться симетричні положення рівноваги для дисперсних частинок у потоці промивальної рідини під впливом коливних сил.

Наведені вище теоретичні, експериментальні дослідження та математичні розрахунки з вибором певних математичних моделей дають можливість розрахувати параметри рідини (тиск, швидкість), конструктивні характеристики пристроїв, які б могли забезпечити наявність коливних процесів певної частоти, амплітуди, енергії для створення впливу на вибір свердловини, зменшуючи тим самим енергозатрати та підвищуючи швидкість буріння похило-скерованих і горизонтальних свердловин.

Опираючись на результати розрахунків та досвід проведених експериментальних і промислових досліджень, нами розроблено серію генераторів гідродинамічних імпульсів А.с №58561 опубл. 26.04.2011, А.с №63181 опубл. 26.09.2011, А.с №63187 опубл. 26.08.11, для впливу коливних процесів на підвищення ефективності буріння похило-скерованих і горизонтальних свердловин.

В залежності від розподілу осьової швидкості на вході в генератор, процесу формування ступеневого закону закручення потоку та фізико-реологічних властивостей промивальної рідини задається стійкий обертово-поступальний рух течії в кільцевому каналі труби. Володіючи певними властивостями, потік має сприятливі умови для регулювання значеннями диференціального тиску що залежить від конкретних геолого-технічних умов.

Стійкий обертово-поступальний рух течії потоку досягається за певних значень числа Фруда ( $Fr$ ), які є різними для рідин з різними реологічними властивостями. При цьому для числа Рейнольдса ( $Re$ ) ньютонівська рідина повинна мати значення вдвічі більше, ніж неньютонівська; і між ними існує функціональний зв'язок за параболічним законом.

Обертово-поступальна течія потоку в кільцевому горизонтальному каналі на вході зазнає розподілу осьової швидкості, а на виході створюються умови, при яких колова складова швидкості є більшою від осьової за ступеневим розподілом. При цьому інерційні сили перевищують сили в'язкості. Як керуючий параметр використовується питомий циркуляційний розхід промивальної рідини.

В комплексі з компоновкою низу бурильної колони гідродинамічні генератори забезпечують підвищення швидкості проведення бурових робіт (скорочення часу буріння на 25-40%), більш якісне очищення стовбура свердловини як в похило-скерованих, так і в горизонтальних свердловинах за рахунок фізичних хвильових процесів, які забезпечують тривале перебування твердої фракції у зваженому стані та її спрямований рух у напрямку винесення на денну поверхню. Водночас унеможливується процес



залипання дрібної фракції на обсадних колонах. Важливим є також і те, що використання розроблених нами пристроїв за певних технологічних параметрів забезпечує утворення кольматційного шару малої товщини.

Використання розроблених нами гідродинамічних пристроїв дає можливість керувати технологічними процесами буріння похило-скерованих і горизонтальних свердловин вибійними двигунами і оптимізувати процес буріння в конкретних геологічних умовах.

### ВИСНОВКИ:

1. Наперед розраховуючи діапазон коливань, які генеруються на вибої свердловини з допомогою пристроїв що розміщуються в компоновці низу бурильної колони, та враховуючи реологічні властивості промивальної рідини для даних геолого-технологічних умов, які можна змінювати під впливом тих таки генерованих коливних процесів, вдається:

- забезпечити підвищення ефективності очищення свердловини від вибуреної породи за рахунок тих фізичних процесів і явищ, які виникають під дією коливань в рідині, незалежно від глибини свердловини;

- зменшити товщину кольматційного шару стовбура свердловини;

- забезпечити відсутність прилипання найдрібніших часток вибуреної породи по поверхні тіла бурильної колони;

- суттєво знизити ймовірність прихоплення бурильної колони у процесі буріння вертикальних, похило-скерованих і горизонтальних свердловин, запобігаючи виникненню застійних зон.

2. З урахуванням перелічених можливостей інтервал зменшення часу та енергозатрат на будівництво нових та відновлення заводнених чи малодобітних нафтогазових свердловин становить до 30-40% від звичайного.

3. Емпіричний підбір параметрів пристроїв, які стають джерелом коливних процесів у свердловині, є неможливим.

### Література

1 Блехман И.И. Вибрация изменяет законы механики / И.И. Блехман. – М.: Наука, 1971. – 894 с.

2 Ганиев Р.Ф., Динамика частиц при воздействии вибраций / Р.Ф. Ганиев, Л.Е. Украинский. – Киев: Наукова думка, 1975. – 168 с.

3 Ганиев Р.Ф. Колебательные явления в многофазных средах и их использование в технологии / Р.Ф. Ганиев. – Киев: Техника, 1980. – 142 с.

4 Кубенко В.Д., Динамика тел в жидкости при вибрации / В.Д. Кубенко, В.М. Кузьма, Г.Н. Пучка. – Киев: Наукова думка, 1989. – 156 с.

5 Гуляев В.И. Прикладные задачи теории нелинейных колебаний механических систем / В.И. Гуляев, В.А. Баженов, С.Л. Попов. – М.: Высшая школа, 1989. – 378 с.

6 Челомей В.Н. Парадоксы в механике, вызываемые вибрациями / В.Н. Челомей // Докл. АН СССР. – 1983. – Т 270 № 1. – С.62-88.

7 Черепанов А.А. Влияние вибраций на гидродинамические системы: резонансы и осредненные системы / А.А.Черепанов. – Пермь: ПГУ, 2000. – 379 с.

8 Иванова А.А. Динамика твердого тела в жидкости при вращательных колебаниях последней / А.А. Иванова, В.Г. Козлов // Изв. РАН. МЖГ. Вибрационная механика. – 2001. – №5. – С.35-47.

9 Любимов Д.В. Поведение взвешенного в жидкости тела в поле торсионных вибраций / Д.В. Любимов // Вибрационная гидродинамика 2001. – №3. – С.97-109.

10 Иванова А.А. Взаимодействие вибрирующей и неподвижной сфер в жидкости / А.А. Иванова, В.Г. Козлов // Вибрационная механика. – 1998. – №2. – С.44-56.

11 Зорин С.В. Экспериментальное исследование течения жидкости вблизи источника осцилляций / С.В. Зорин, Г.Ф. Путин. – Пермь: ИПУ, 1999. – 129 с.

12 Иванова А.А., Граница раздела песок-жидкость при вибрационно-колеблющемся воздействии / А.А. Иванова, В.Г. Козлов // Изв. РАН МЖГ. – 2001. – №1. – С. 120-138.

13 Сергеева Н.М. Неустойчивость границы раздела песок-жидкость при вертикальных вибро-колеблющихся воздействиях на систему / Н.М. Сергеева, О.И. Тихомиров. – Уфа: УГНИУ Изв. АН. – 2000. – № 3. – С. 29-47.

14 Wunenburger R., Periodic order induced by horizontal vibrations in a two-dimensional assembly of heavy beads in water / R. Wunenburger, V. Carrier, Y. Garrabos // Physics of Fluids. - 2002. - V. 14. №7.1. - P. 2350-2369.

15 Кирсанова М.Т., Динамика границ раздела гетерогенных систем при воздействии гидроакустических и гидродинамических колебаний / М.Т. Кирсанова, Н.О. Елисеев. – М.: Техника, 1999. – 210 с.

16 Любимов Д.В. Поведение систем жидкость-взвесь в вибрационном поле / Д.В. Любимов, Т.П. Любимова // Изв. РАН МЖГ. – 1999. – №8. – С. 155-170.

17 Брильский Е.К. Гидродинамическая структура и когерентность турбулентных потоков. Методы исследования и диагностики / Е.К. Брильский. – Новосибирск: ИТ СО РАН, 2000. – 450 с.

18 Миркевичан Ж.Н. Структура и динамика ограниченных струйных течений в поле вибрационных сил / Ж.Н. Миркевичан. – Грозный: Изв. АН СССР. – 1983. – Т.5. – С.245-290.

19 Феллер В.В. Предупреждение осложнений в процессе проводки и повышение продуктивности горизонтально-направленных скважин / В.В. Феллер // В сб. докладов международной конференции «Повышение качества строительства скважин». – Уфа, 2005. – Т.4. – С. 99-119.

20 Слюсарев Н.И. Повышение эффективности технологии бурения горизонтальных скважин / Н.И. Слюсарев, Р.А. Ибраев,

В.В. Феллер.: Материалы VII Международной конференции [Новые идеи в науках о Земле] – Москва, 2005. – Т 3. – С. 78-96.

21 Измухамбетов Б.С. Повреждение продуктивных пластов в процессе проводки скважины, методы предупреждения и устранения / Б.С. Измухамбетов, Ф.А. Агзамов, Т.О. Акбулатов, Р.М. Сакаев. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2004. – 213 с.

22 Кузнецов О.Л. Физические основы вибрационного и акустического воздействия на нефтегазовые пласты / О.Л. Кузнецов, Э.М. Симкин, Дж. Челингар. – М.: Мир, 2001. – 260 с.

23 Родионов И.М. Интенсификация добычи нефти на месторождениях ОАО «ЛУКОЙЛ» / И.Т.Родионов // Нефтеотдача. – 2002. – №5. – С 54-66.

24 Максutow Р.А. Технология и техника для повышения производительности скважин и нефтеотдачи пластов / Р.А. Максutow. – М.: Всесоюзный нефтегазовый научно-исследовательский институт, 1991. – 191 с.

25 Структуросберегающая технология импульсного дренирования нефтяных пластов. / [А.И. Гурьянов, Р.Х. Фассахов, И.К. Файзуллин и др.] // Нефтяное хозяйство. – 2004. – № 11. – С. 12-23.

26 Ганиев Р.Ф. О движении частиц в неоднородной стоячей волне / Р.Ф. Ганиев, Г.Н. Пучка. – Пермь: ИПМ, 1975. – Т. 11. – Вып. 3. – 311 с.

27 Гранат Н.Л. Движение твердого тела в пульсирующем потоке вязкой жидкости / Н.Л. Гранат // Механика и машиностроение. – 1960. – №1. – С. 70-78.

28 Аfenченко В.О. Динамика дислокаций в пространственно периодических структурах / В.О. Аfenченко, А.Б. Езерский, Д.А. Ермошин // Известия РАН (серия физическая). – 1996. – Т. 60. – №12. – С. 146-156.

29 Аfenченко В.О. Динамика дислокаций в пространственно-периодических структурах / В.О. Аfenченко, А.Б. Езерский, Д.А. Ермошин: Труды V Всероссийской школы семинара ["Волновые явления в неоднородных средах"]. – Москва, 1996. – С.39-40.

30 Мелешко В.В. Динамика вихревых структур под воздействием колебаний в системе / В.В. Мелешко, М.Д. Константинов. – Киев: Наукова думка, 1983. – 283 с.

*Стаття надійшла до редакційної колегії  
05.09.12*

*Рекомендована до друку професором  
Я.С. Коцкуличем*