

УДК 628.543.28: 315.777.613

## ЗАКОНОМІРНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ МАГНІТО-УЛЬТРАЗВУКОВОЇ СИСТЕМИ ПІДГОТОВКИ І КОНТРОЛЮ ДЛЯ НАГНІТАННЯ У ПРОДУКТИВНІ ГОРИЗОНТИ

© Терентьев О. М., 2002  
НТУУ "Київський політехнічний інститут"

© Гарком О. В., 2002  
НГВУ "Чернігівнафтогаз", м. Прилуки

© Сняков Ю. Б., 2002  
ПП "Нік - ТСК", м. Київ

*Приведені теоретичні дослідження впливу ультразвукових коливань і електромагнітного поля на утворення відкладів солей у пластовій воді, яка використовується для закачування в нафтоносні пласти з метою підвищення пластового тиску. Показано, що при відповідних параметрах ультразвукових коливань і електромагнітного поля можна досягнути значного зменшення утворення відкладів солей. Описана розроблена магніто-ультразвукова система (МУС), яка впроваджена в НГВУ "Чернігівнафтогаз", а також результати аналізу води до і після обробки її пристроєм МУС.*

Одним з ефективних методів збільшення видобутку нафти є підтримування пластових тисків (ППТ) шляхом нагнітання в них води. Для системи ППТ недоцільно присутність в рідині, що закачується через нагнітаючі свердловини, значної кількості механічних домішок, глобул, нафти, розчинів різних солей, елементів, що утворюють з кислотами нерозчинні з'єднання. Найбільш поширене випадання солей карбонатів кальцію ( $\text{CaCO}_3$ ) і магнію ( $\text{MgCO}_3$ ), а також сульфатів кальцію ( $\text{CaSO}_4$ ) і барію ( $\text{BaSO}_4$ ) з супутніми нафті водами по реакціях [11].

Причиною відкладення солей може служити порушення термодинамічної рівноваги реакцій, хімічні реагенти: поверхнево-активні речовини, деемульгатори тощо. Фактором, який впливає на відкладення солей, є показник рН розчину. Якщо рН розчину більше рівноважного значення для даної рідини, то вуглекислоти недостатньо і  $\text{CaCO}_3$  може випадати в осад. Якщо рН менше рівноважного значення, то вуглекислоти достатньо для підтримання іонів кальцію в розчинному з'єднанні. Активні центри поверхні створюють локальні електричні поля, які спроможні викликати електроадгезію електrolітів і їх краплин.

Проблему утворення осаду на трубопроводах пропонується розв'язати за допомогою використання внутрішньої енергії рідкого середовища. Це досягається безпосереднім впливом керованих потоків ультразвукових, гравітаційних і електромагнітних

джерел на внутрішні електромагнітні зв'язки молекул рідини і домішок, які її забруднюють. Для промислової реалізації створено спосіб підготовки та очистки рідини та магніто-ультразвукову систему (МУС) [1, 2]. Зовнішнім джерелом енергії в МУС є генератор акустичних коливань і блок знакозмінного магнітного поля. Функції внутрішнього джерела енергії виконують кавітаційні бульбашки і електромагнітні поля в рідині, що оброблюється. Таким чином створено фізичний трансформатор частот, якій забезпечує роботу МУС в субрезонансних режимах з середовищем. Обробка потоку ультразвуковими і магнітними енергетичними потоками забезпечує зменшення і подальше запобігання відкладення домішок на стінках технологічних трубопроводів.

Реструктуризація середовища при ультразвуковій кавітації досягається адіабатичним стисненням пустот та утворенням режиму низькотемпературної плазми при схлопуванні кавітаційних бульбашок. Такий режим сприяє руйнуванню макромолекул домішок, які забруднюють рідину. Значення інтенсивності акустичного і електромагнітного поля в середовищі суттєво залежать від його вихідного термодинамічного стану. Якщо система знаходиться у стані, близькому до термодинамічної нестійкості (метастабільний стан), то зовнішній вплив навіть малої інтенсивності спроможній привести її в якісно новий стан. Система переходить у стан нестійкості тоді, коли значення будь-якого характеристичного

параметру (наприклад, тиск, температура) близьке до критичного. Результати впливу визначаються співвідношенням між енергією впливу і енергією, яка необхідна для переходу системи в якісно новий стан. За рахунок теплової флуктуації при схлопуванні кавітаційних бульбашок зростає локальна температура до  $10000\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а локальний тиск розриву молекул середовища досягає  $10\text{ ГПа}$ . В рідкому середовищі кавітаційні явища супроводжуються зменшенням в  $3\dots 5$  разів опору випромінювання порівняно з відповідним значенням при відсутності кавітації [3]. Для відриву від поверхні вже утворених кристалів потрібні інтенсивності коливань більше ( $50\dots 80$ )  $\text{kВт/м}^2$ . Акустичне поле створює біля твердих поверхонь акустичні потоки, які відривають локальні перенасичення рідини і дрібні кристалики з поверхні і виносять їх. Вони змінюють також рН розчину, підвищуючи його кислотність, попереджуючи випадання солей.

Знаходячись в звуковому полі кавітаційні бульбашки пульсують в відповідності з коливаннями тиску звукового поля. Для найбільших амплітуд коливань бульбашки, коли  $P_{\text{ат}} \ll P$  ( $P_{\text{ат}}$  - амплітуда звукового тиску) його резонансна частота може бути визначена з виразу [3]:

$$f = \frac{1}{2\pi R} \cdot \sqrt{\frac{3\gamma}{\rho} \cdot (P + \frac{2\sigma}{R})}, \quad (1)$$

де  $\gamma$  - відношення питомих теплоємностей для газу в бульбашці;  $P$  - атмосферний тиск,  $\sigma$  - поверхневий натяг,  $R$  - радіус бульбашки [10],  $\rho$  - густина пластової води.

При частоті звуку вище резонансної схлопування бульбашки не відбудеться і її рух носить складний характер.

Інтенсивність акустичного поля визначається так:

$$I = 2\pi^2 \cdot \rho \cdot v \cdot f^2 \cdot A^2, \quad (2)$$

де  $v$  - швидкість розповсюдження звуку в рідині [4],  $A$  - амплітуда коливань звуку [5].

За формулою Рейля [6] час схлопування кавітаційної бульбашки  $\tau$  в полі тиску навколишньої рідини  $P_0$ , при радіусі бульбашки  $R_0 \rightarrow 0$  визначається так:

$$\tau = \frac{3}{2} \cdot \frac{\rho}{P_0} \int_{R_0}^R \frac{R_0^{3/2} dR}{(R^3 - R_0^3)^{1/2}}, \quad (3)$$

де  $P_0 = \rho \cdot c^2$  - тиск навколишньої рідини до моменту утворення кумулятивної струминки;  $R$  - початковий радіус кавітаційної бульбашки [7],  $R_0$  - кінцевий радіус кавітаційної бульбашки [7].

Швидкість поширення кумулятивної струминки при схлопуванні кавітаційної бульбашки з врахуванням коефіцієнта кумуляції  $K$  може бути розра-

хована так [7]:

$$V_k = \left[ \frac{2p}{3\rho} \cdot \left( \frac{R^3}{R_0^3} - 1 \right) \right]^{1/2} \cdot k. \quad (4)$$

Енергія кавітаційного пухирця складається з кінетичної енергії  $T$  і потенціальної енергії  $U$  [8]:

$$T = 2\pi\rho R_0^2 R^3 / t^2, \\ U = \frac{4\pi}{3} R^3 \left[ P + \frac{P}{\gamma - 1} \left( \frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma} + \frac{3\sigma}{R} \right], \quad (5)$$

де  $P = P_0 - P_n$  - парціальний тиск газу у кавітаційній бульбашці,  $P_n$  - тиск пари [8],  $\gamma$  - показник політропи, рівний 1 у випадку ізотермічних пульсацій і  $4/3$  - у випадку адіабатичних [8].

На основі (5) та ряду перетворень, що більш детально приведені у [8], енергію схлопування можна представити у такому вигляді:

$$E = \frac{4}{3} \pi \int_0^{R_0} \left[ \left( P_0 + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \left( \frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma} + P_n - \frac{2\sigma}{R} \right] \cdot 3R^2 dR, \quad (6)$$

де  $dR = R - R_0$ .

Потужність, яка розсіюється при схлопуванні кавітаційної бульбашки може бути розрахована так::

$$N = E / \tau. \quad (7)$$

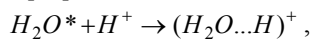
Крім озвучування потоку МУС передбачає також омагнічування пластової води. Зміна властивостей намагніченої води досягається реструктуризацією водневих зв'язків і структури води. Розташування молекул у просторі характеризується утворенням найбільшого числа водневих зв'язків. Таке розташування найближчих одна до одної молекул створює "пучку" структуру води [9]. Зовнішнє магнітне поле викликає ларморову прецесію окремих оболонок, тобто додаткове обертання як суцільного (прецесія) стійкої системи однакових заряджених часток, наприклад електронів атома, що виникають при накладенні на систему однорідного постійного, досить слабкого магнітного поля, напрямком якого і служить віссю обертання; поляризацію електронних хмар; індукуює у молекулах протилежно спрямований магнітний момент, що змінює енергію водневих зв'язків і приводить до їхнього часткового розриву.

Відповідно до теореми Лармора магнітне поле викликає прецесію орбіти кожного атомного електрона з частотою  $\omega_L$  навколо напрямку поля. Прецесія Лармора обумовлена дією на заряджені частки магнітної частини сили Лоренца й аналогічна прецесії осі вовчка (гіроскопа) під дією сили, що прагне змінити напрямок осі його обертання. У результаті додаткового обертання електронів системи в магнітному полі виникає магнітний момент системи. То-

му на основі прецесії можна пояснити явище діаманетизму, нормальний Зеємана ефект, магнітне обертання площини поляризації.

Дія магнітного поля порушує структуру води. Молекули з розірваними водневими зв'язками заповнюють порожнечі, обумовлюючи тим самим більш щільне упакування молекул води. Порушенням структури і водневих зв'язків молекул води і забезпечуються зміни густини, в'язкості й інших властивостей під впливом магнітного поля [10].

При накладенні зовнішнього магнітного поля на воду електрони з двох пар спарених електронів кисню розпарюються. При цьому молекули води збуджуються і зв'язуються з іонами водню у воді. У результаті утворюються комплекси з водневим зв'язком по реакції [11]:



де  $H_2O^*$  - збуджена молекула води.

Утворення комплексів  $(H_2O \dots H)^+$  веде до зміни фізико-хімічних властивостей намагніченої води. Крім іонів водню, збуджені молекули води можуть зв'язуватися водневими зв'язками і з іншими молекулами води. Однак утворення заряджених комплексів  $(H_2O \dots H)^+$  у воді не є утворення гидроксонію  $H_3O^+$ , де має місце хімічний зв'язок. [9]. Зв'язування іонів водню з водяного розчину солей у комплекси  $(H_2O \dots H)^+$  повинно привести до зменшення електропровідності, зростання  $pH$ , в'язкості і поверхневого натягу розчину. Гідратація іонів розчинених солей зміниться внаслідок відштовхування катіонів від  $(H_2O \dots H)^+$ , що виразиться в зміні теплоти гідратації іонів [12].

Вода, багаторазово перетинаючи поле, хімічно активізується й утворює комплекси  $(H_2O \dots H)^+$ , що:

- відштовхують від себе катіони кальцію, магнію тощо, що приводить до зміни їх розчинності;
- підвищують лужність води, що викликає рясне виділення гідроксиду заліза, алюмінію і магнію.

Лужна вода буде хімічно руйнувати старі відкладення на стінках труб, їхні компоненти не будуть розчинятися у воді, а у вигляді шламу і шматків будуть відокремлюватися від стінок [9].

Відповідно до магнітних властивостей речовини, у всіх тілах, розміщених у магнітному полі, виникає магнітний момент сил  $M$  [13].

$$M = i \cdot S \cdot B \cdot \sin \alpha, \quad (8)$$

де  $i$  – сила струму в контурі,  $S$  – площа контуру,  $B$  – індукція полюси,  $\alpha$  – кут між нормаллю до площини витка і вектором індукції.

Під дією магнітного поля магнітні моменти молекул орієнтуються переважно уздовж поля, вна-

слідок чого речовина намагнічується. Мірою намагнічування речовини є вектор намагнічування  $M_f$ . Вектор намагнічування дорівнює векторній сумі всіх магнітних моментів молекул, укладених в одиниця об'єму речовини  $V$ :

$$M_f = \frac{1}{V} \sum pm = \frac{1}{V} \sum 0.5q \cdot v \cdot R = \frac{1}{V} \sum 0.5q \cdot U \cdot E \cdot R, \quad (9)$$

де  $pm$  – магнітний момент молекули;  $q$  – величина заряду;  $v = U \cdot E$  – лінійна швидкість носіїв заряду;  $U$  – рухливість іонів;  $E$  – напруженість електричного поля усередині провідника;  $R = r \cdot A^{1/3}$  – радіус кругової орбіти, по якій рухається частка [13];  $r=1,2$  – розмір атомного ядра елемента;  $A$  – масове число, сума нейтронів і протонів у ядрі.

Прискорено рухаючись заряджені частки випромінюють електромагнітні хвилі. Елемент струму  $i \cdot \Delta l$ , що змінюється по гармонійному закону  $i = I_0 \cdot \sin \omega t$ , створює на відстані  $r$  від нього, багато більшій довжині хвилі випромінювання  $\lambda$  і довжини елемента  $\Delta l$ , електромагнітне поле з напруженістю електричного поля  $E_v$  і напруженістю магнітного поля  $H_v$  [13]:

$$E_v = -0.5 \cdot \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \cdot I_0 \frac{\Delta l}{\lambda \cdot r} \sin \nu \cdot \sin(\omega t - kr), \quad (10)$$

$$H_v = -0.5 \cdot I_0 \frac{\Delta l}{\lambda \cdot r} \sin \nu \cdot \sin(\omega t - kr), \quad (11)$$

де  $\mu_0$  – магнітна проникність вакууму;  $\varepsilon_0$  – абсолютна діелектрична проникність;  $\nu$  – кут між прямою, що з'єднує елемент струму  $i \cdot \Delta l$  із крапкою спостереження і напрямком провідника;  $k=2\pi/\lambda$  – хвильове число.

З (11) випливає, що

$$2H_v = I_0 \frac{\Delta l}{\lambda \cdot r} \sin \nu \cdot \sin(\omega t - kr). \quad (12)$$

З врахуванням (12) вираз (10) буде таким:

$$E_v = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \cdot 2 \cdot H_v = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \cdot H_v. \quad (13)$$

Підставимо (13) в (1.9) і отримаємо:

$$pm = 0.5 \cdot q \cdot U \cdot \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \cdot H_v \cdot r \cdot A^{1/3}. \quad (14)$$

Дослідний зразок системи МУС з квітня 2001 року проходить випробування на третьому нафтодобувальному промислі НГВУ "Чернігівнафтогаз". В результаті сумісне використання акустичних та електромагнітних потоків енергії забезпечило руйнування старих відкладень на внутрішніх поверхнях трубопроводів з 4 см до 1,5 см після 6 місяців експлуатації МУС. Результати незалежного аналізу проб рідини до і після обробки МУС проведені фахівцями ГПУ "Полтавагазвидобування" приведені в табл. 2.

Таблиця 2 - Результати аналізу води до і після обробки в МУС

Вміст іонів, мг/л	Хлор,	Кальцій	$\frac{Fe^{+2}}{Fe^{+3}}$	Вільний CO <sub>2</sub>	Нафтопродукти	Мех. домішки	Завислі речовини
До МУС	251075	21534	97,7	431,2	4	66	156
Після МУС	138294	11523	94,4	202,4	3	47	148

Густина води до і після обробки МУС відповідно 1,163 і 1,157 г/см<sup>3</sup> при рН 5,0.

1. Гаркот В. С., Гаркот О. В., Терентьев О. М., Сияков Ю. Б. Технология подготовки жидких сред в системе поддержания пластового давления нефтяных месторождений // Газ и нефть. Энергетический бюллетень. - № 4 (64), 2001. - С. 38-39. 2. Пат. 48863. Україна, МКВ C02F 1/36. Спосіб підготовки та очистки рідини - № 2002010807; Заявл. 31.01.2002. Видано 15.08.2002. Бюл. № 8 - 3 с. 3. Кузнецов О. Л. Применение ультразвука в нефтяной промышленности. - М.: Недра, 1983. - 193 с.

4. Бражнев Н. И. Ультразвуковые методы. - М.: Энергия, 1965. - 269 с.. 5. Агранат Б. А., Бронин Ф. А. Определение максимального радиуса кавитационной полости в звуковом поле. Акустический журнал. - М.: Машиностроение, 1969. - 31 с. 6. Терентьев А. Г. Математические вопросы кавитации. Учебн. пос - Чебоксары: ЧГУ, 1981. - 131 с. 7. Федоткин И. М, Гулий И. С. Кавитация. Ч.1. - К.: Полиграфкнига, 1997. - 840 с. 8. Акуличев В. А. Кавитация в криогенных и кипящих жидкостях. - М.: Наука, 1978. - 279 с. 9. Стукалов П. С., Васильев Е. В., Глебов Н. А. Магнитная обработка воды. - Л.: Судостроение, 1969. - 192 с. 10. Минц Д. М. Теоретические основы технологии очистки воды. - М.: Высшая школа, 1979. - 223 с. 11. Глинка Н.Л. Общая химия. - Л.: Химия, 1986. - 704 с. 12. Ильинский Ю. А. Взаимодействие электромагнитного излучения с веществом. - К.: Наукова думка, 1989. - 262 с. 13. Кошкин Н. И., Ширкевич М. Г. Справочник по элементарной физике. - М.: Наука, 1975. - 255 с. 14. Пятин Ю. М. Постоянные магниты. Справочник. - М.: Энергия, 1980. - 485 с. 15. Енохович А. С. Краткий справочник по физике. М.: Высшая школа, 1976. - 288 с.