

УЛЬТРАЗВУКОВА МАГНІТНО-АДСОРБЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ОЧИСТКИ РІДИНИ

О. М. Терентьєв, канд. техн. наук (НТУУ „КПІ”)

Описано спосіб та магнітно-ультразвукову систему підготовки та очистки рідини. Розглянуто процеси використання внутрішньої енергії середовища, яка вивільняється від сукупної дії потоків механічної, електромагнітної та акустичної енергії.

Вступ

За даними ВООЗ понад 100 млн чоловік лише в Європі не мають доступу до якісних водних ресурсів. За прогнозами [1] у 2025 році 2/3 населення планети потерпатиме від нестачі води або її незадовільної якості. Питання підвищення якості води регламентується Законом України від 3 березня 2005 року № 2455-IV “Про загальнодержавну програму “Питна вода України” на 2006–2020 роки” і Директивою ЄС 80/778/ЕС, прийнятою 15.06.1980 р. В Директиві нормуються 66 параметрів якості питної води, розділені на групи.

Відомі на сьогодні методи очищення води і підготовки її до повторного використання є малоефективними, потребують значних енерговитрат і не використовують значний внутрішній потенціал водного середовища.

Фахівцями кафедри електромеханічного обладнання енергоємних виробництв ІЕЕ НТУУ «КПІ» разом з ТОВ «Центр науково-технічних інновацій Української нафтогазової академії» розроблено та впроваджено спосіб і магнітно-ультразвукову систему (МУС) підготовки та очистки рідини [2, 3]. Зміна властивостей рідини досягається реструктуризацією молекулярних зв'язків внутрішніми джерелами – кавітаційними бульбашками та ларморовою прецесією іонів домішок. В системі використовується внутрішня енергія середовища, яка вивільняється від сукупної дії потоків механічної, електромагнітної та акустичної енергії. МУС реалізує фізичну трансформацію зовнішніх низькочастотних імпульсно-хвильових коливань у високочастотні коливання внутрішніх енергетичних джерел, які наближаються до власних частот коливань електромагнітних зв'язків середовища. Зовнішніми джерелами енергії МУС є генератор акустичних коливань (ГАК) та блок знакозмінного магнітного поля (БЗМ), які створюють кавітаційні поля електромагнітних та акустичних хвиль. Суттєвому зниженню вмісту іонів заліза та хлору сприяє наявність у системі блока абсорбційного фільтрування (БАФ) з використанням алюмосилікатів та блока магнітного циклонування домішок (БМЦ) у полі ларморових коливань. Всі ці блоки забезпечують енергетичний вплив на руйнування внутрішніх зв'язків молекул середовища і забруднень. Функції внутрішнього джерела енергії виконують кавітаційні бульбашки, електромагнітні поля та спинові взаємодії іонів домішок в рідині, що рухається.

Таке фізичне навантаження рідинного середовища забезпечує його очищення і запобігає відкладенню домішок на стінках трубопроводів.

Аналіз фізичних процесів очищення рідинних середовищ

Іони домішок, що забруднюють воду, знаходяться у стабілізованому стані і хімічно не активні, тому їх слід активізувати зовнішнім енергетичним впливом. Активні іони вступають у хімічні реакції, утворюють різні хімічні сполуки, змінюють іонну структуру середовища. Реструктуризація середовища забезпечується ультразвуковою кавітацією від блока ГАК. Крім того, ультразвукова кавітація сприяє: руйнуванню глобул забруднюючих домішок у робочому потоці; деполімеризації молекулярних ланцюгів за рахунок того, що довгі молекули однією частиною попадають у вузол, а іншою – у пік коливань і руйнуються; виникненню режиму низькотемпературної плазми (локальний тиск дорівнює 10,0 ГПа, температура – 10000 °С); розкладанню вуглеводневих компонентів промислових стічних вод до CO₂ і H₂O; розкладанню води на водень і гідроксильний радикал; зростанню питомого поверхневого заряду при захопленні кавітаційних бульбашок; підвищенню хімічної активності молекул.

Розрахунками акустичних хвильоводів і регулюванням їх положення у робочому об'ємі створено умови для утворення стоячої хвилі. Уздовж стінки труби поширюються хвильові стиснення і розтягання, завдяки чому утворюються мікропорожнини, які ослаблюють мікрокристалічні зв'язки відкладень. Зруйновані забруднюючі домішки у потоці зосереджуються у вузлах стоячої хвилі. Вони не закріплюються на стінках і не утворюють осередків кристалоутворення. Частинки забруднюючих домішок руйнуються до розмірів, які не можуть бути визначені існуючими методами контролю. Зменшення розмірів кристалів у 3 рази забезпечує роботу трубопроводів практично без утворення накипу. При зменшенні діаметра кавітаційних бульбашок зростає їх питомий поверхневий заряд і виділяються кванти променевої енергії $h\nu$ -фотонів. При цьому з'являється люмінесцентне світіння, а за наявності CO₂ починається фотосинтез. Квантовий стан фотона фіксується трьома параметрами: напрямком поширення, частотою та лінійною поляризацією, тобто напрямком вектора електричного поля, яке з ним пов'язане. Якщо променевий потік лінійно поляризований вздовж напрямку на плівці, який називається оптичною віссю, то плівка його не затримує. У випадку, коли поляризація перпендикулярна цій осі, променевий потік затримується (поглинається) [4]. На рис. 1 оптичну вісь поляризуючої плівки показано штриховкою. Коли фотон лінійно поляризований під деяким кутом з оптичною віссю плівки, то ймовірність його проходження крізь плівку визначається квадратом косинуса цього кута. При куті 45° ймовірність проходження становить 0,5, тобто проходить лише половина фотонів.

Для зміни напрямку поляризації А. Аспект, Ж. Далибар и Ж. Роже з Оптичного інституту Паризького університету запропонували оригінальний перемикач.

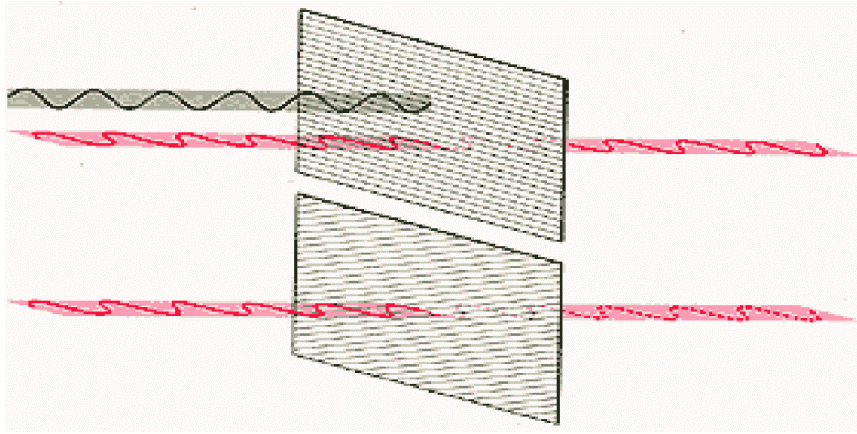


Рис. 1. Вплив поляризації променевого потоку на проходження поляризуючої плівки

Як перемикач напрямку поляризації використовується ємність з водою, у якій ультразвук збуджує стоячі хвилі. Ці хвилі грають роль дифракційної решітки, яка ефективно поглинає або пропускає фотони в залежності від напрямку її осі. Тому через ультразвукову поляризаційну решітку проходила тільки половина квантів енергії і активних частинок. Таким чином, стояча ультразвукова хвиля виконує роль фільтра для іонів домішок у рідині.

Поглинання кванта променевої енергії $h\nu$ молекулою, наприклад, хлору приводить до її збудження. Коли енергія коливань іонів перевищує енергію зв'язку між іонами, відбувається розпадання молекули (фотохімічна дисоціація) [5]. Активні атоми хлору, які утворилися, реагують з молекулами води. Атом водню з розпарованими електронами, у свою чергу, реагує з молекулою хлору. Таким чином, починається ланцюгова реакція. В результаті активні частинки об'єднуються в молекулу, а виділена енергія віддається неактивній частинці. Один квант променевої енергії $h\nu$ приводить до утворення сотень тисяч молекул HCl . А утворені молекули HCl реагують (з виділенням CO_2) з шаром накипу на внутрішніх поверхнях труб і зменшують його. Ланцюгова реакція закінчується або при співударянні активних частинок, або активних частинок зі стінкою.

Неоднорідність металу трубопроводів приводить до утворення гальванічних мікропар, які мають анодні і катодні ділянки. Між гальванічними парами виникають електрохімічні процеси (мікроелектроліз). В розчинах хлоридів під дією мікроелектролізу утворюються гідрооксиди, змінюючи вміст катіонів у воді. Хлоридні іони мають добру розчинність. У присутності великої кількості хлоридів підвищується розчинність малорозчинних з'єднань, таких як карбонат і сульфат кальцію. У природних водах, які мають зазвичай $\text{pH} > 6$, тривалентне залізо майже не буває в іонній формі, а міститься у вигляді колоїду і суспензії. Інтенсивна кавітація при озвучуванні води руйнує колоїдні частинки гідрозакису заліза, попереджуючи утворення колоїдного осаду.

Нобелівський лауреат академік М. М. Семенов у 20-х рр. минулого століття створив теорію розгалужених ланцюгових реакцій (РЛР). При РЛР взаємодія вільного радикалу з молекулою речовини водного середовища

приводить до утворення не одного, а кількох нових активних центрів. Один з них продовжує старий ланцюг, а інші дають початок новим гілкам, тобто ланцюг розгалужується. Основним прикладом РЛР є утворення води з простих речовин при озвучуванні рідини [5]. При електричному розряді або нагріванні від ультразвукової кавітації утворюються активні радикали $\bullet\text{OH}$. Вони легко реагують з молекулою води з утворенням активного $\text{H}\bullet$, який, у свою чергу, реагує з киснем, утворюючи атом кисню. Останній при реагуванні з молекулою водню дає два нових активних центри. Активні іони кисню нейтралізують залишки соляної кислоти від нерозгалуженої ланцюгової реакції в виділенням хлору.

Крім генератора акустичних коливань, система МУС має блок знакозмінного магнітного поля. Завдяки цьому полю в молекулах середовища індукується протилежно спрямований магнітний момент. Він змінює енергію водневих зв'язків і приводить до їх часткового розриву. Зовнішнє знакозмінне магнітне поле викликає: ларморову прецесію – додаткове обертання як суцільного стійкої системи однаково заряджених частинок; поляризацію електронних хмар; синхронізацію коливань електронів у атомах і молекулах. Вода, багаторазово пересікаючи магнітне поле, хімічно активізується і утворює комплекси $(\text{H}_2\text{O}\dots\text{H})^+$, які відштовхують від себе катіони кальцію, магнію тощо. При цьому підсилюється асиметрія електронної щільності молекул, зростає величина ванфлековського парамагнетизму, що забезпечує реструктуризацію водного середовища [6]. Магнітна обробка приводить до зменшення кількості осередків кристалічних утворень і до перетворення ромбоєдричної структури у веретеноподібну, про що свідчить перехід кальциту з омагніченої води в арагоніт, який не утворює накипу. Це пояснюється поляризацією іонів і зміною кульової симетрії на еліптичну. Іони орієнтують навколо себе молекули води (диполі), утворюючи гідратний шар або гідратний ансамбль. Молекули води притягаються до іона. Це викликає локальне збільшення щільності води (локальна мікроскопічна неоднорідність) та позитивну гідратацію іонів. Частина катіонів і аніонів у розчині води знаходиться у зв'язаному стані і не визначається фізико-хімічними методами контролю. Таким чином, БЗМ забезпечує активізацію колоїдно-хімічних процесів; покращує змочування твердих поверхонь; покращує адсорбцію поверхнево-активних речовин, процеси розчинення та іонний обмін; збільшує швидкість розчинення сірчанокислого магнію у 120 разів; збільшує на 90% швидкості злипання завислих частинок; зменшує у 6...12 разів відкладення сульфату кальцію; зменшує гідратацію солей, що приводить до зниження ξ -потенціалу та повної або часткової дегідратації іонів, які стабілізують колоїдні міцели [7].

Катіони ущільнюють водний розчин, зменшують число локальних розріджень. Аніони розпушують структуру водного розчину. При дії магнітного поля до 35 кА/м ущільнююча дія катіонів Ca^{2+} , Mg^{2+} перевищує розпушуючу дію аніонів Cl^- . При напруженості 40 кА/м збільшується вплив аніона Cl^- , який перевищує ущільнюючу дію катіону Ca^{2+} . Тоді кількість локальних розряджень найбільша [8].

Нова технологія передбачає магнітне циклонування домішок у полі ларморових коливань. Це дозволяє за рахунок керування кутом нахилу вектора магнітного спіну заряджених частинок створити магнітну пастку. На ділянці шляху дії магнітного поля, що повільно змінюється, частинка рухається по гвинтовій траєкторії. Це обумовлено сумою двох рухів по колу і вздовж силової лінії. Коло, по якому рухається заряджена частинка, називається ларморовим [9]. В залежності від зміни напруженості магнітного поля вздовж траєкторії руху зарядженої частинки відбувається зміна радіусів витків гвинтової лінії. На цьому принципі й базується дія магнітної пастки. На рис. 2 зображено систему, в якій намагніченість магнітного поля збільшується вздовж силових ліній в обидва боки від середньої області. Коли вектор швидкості частинок, які підходять до області з більшою напруженістю поля, утворює з напрямком силових ліній кут, більший за $10...15^\circ$, частинки відбиваються від цієї області і опиняються замкненими всередині магнітної системи.

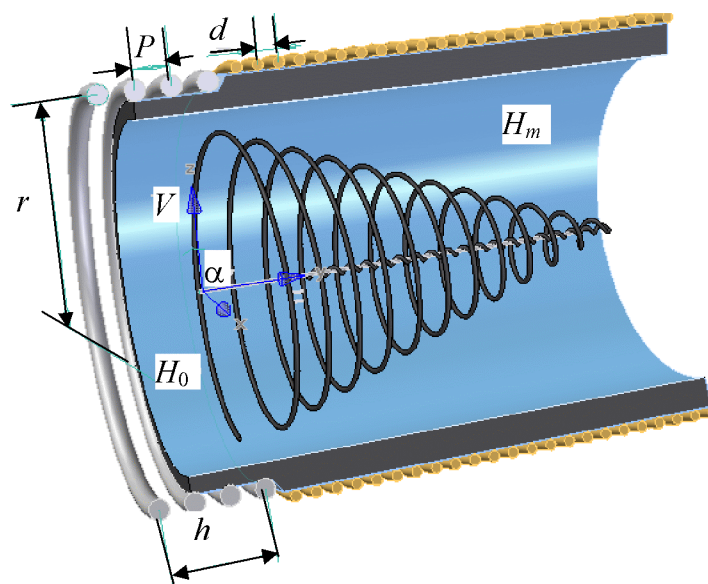


Рис. 2. Принцип роботи магнітної пастки системи МУС

У пропонуваній технології очищення рідин використовується також адсорбційне фільтрування. При адсорбційному фільтруванні з використанням алюмосилікатів зменшується вміст іонів домішок. Згідно з сучасними уявленнями найбільшу затримуючу здатність має зернисте завантаження з природного цеоліту. Його корисним компонентом є клиноптілоліт $(\text{NaK})_4\text{CaAl}_8, \text{Si}_{30}\text{O}_{12}, 24\text{H}_2\text{O}$ [10]. Природний цеоліт має добрі адсорбційні властивості (пористість до 46%, водопоглинання до 99), а також необхідну механічну міцність. Під час випробувань струшуванням у бутель-машині протягом 24 годин знос не перевищив 6,5%.

Блок адсорбційного фільтрування системи МУС має таке конструктивне рішення. Корпус фільтра (балон) заповнений фільтруючим середовищем –

клинотілолітом. У верхній частині балона закріплено автомат, який змінює напрямок потоків води для здійснення процесів фільтрації або регенерації. Автомат керує таймером і витратоміром, що дає змогу забезпечувати оптимальний час кожного циклу. Під час фільтрації водний потік проходить крізь фільтруюче середовище і очищується від іонів домішок. При зменшенні ефективності адсорбції БАФ переключасться на цикл зворотного промивання і реагентної обробки фільтра розчином марганцю для відновлення хімічної активності фільтруючого середовища.

Промислова апробація магнітно-ультразвукової системи очистки рідини

Результати розроблення та впровадження МУС ухвалено на науково-технічних радах ВАТ «Укрнафта» 05.02.2002 р., НГВУ «Чернігівнафтогаз» 22.08.2001 р., НГВУ «Охтирканафтогаз» 15.02.2001 р.

З квітня 2001 р. до квітня 2005 р. МУС продуктивністю 1000 м³/добу проходила промислові випробування на третьому нафтовидобувному промислі НГВУ „Чернігівнафтогаз” (рис. 3).



Рис. 3. Магнітно-ультразвукова система підготовки та очищення води для нагнітання в продуктивні горизонти продуктивністю до 1000 м³/добу: 1 – блок знакозмінного магнітного поля; 2 – генератор акустичних коливань

Вміст у воді іонів хлору, кальцію, магнію після її обробки МУС знизився вдвічі. Зменшення кількості іонів заліза, завислих речовин, механічних домішок, нафтопродуктів, вільного СО₂ досягало 40%. Після введення МУС в експлуатацію шар забруднень на внутрішніх поверхнях трубопроводів зменшився з 4 см до 1,5 мм. Це свідчить про те, що система здатна очищувати і запобігати появі відкладень на внутрішніх поверхнях трубопроводів. Крім того, зменшилась корозія трубопроводів завдяки зменшенню кількості осередків кристалоутворення.

Більш продуктивний, до 3000 м³/добу, зразок МУС (рис. 4) підготовлено до впровадження в умовах НГВУ „Охтирканафтогаз”.

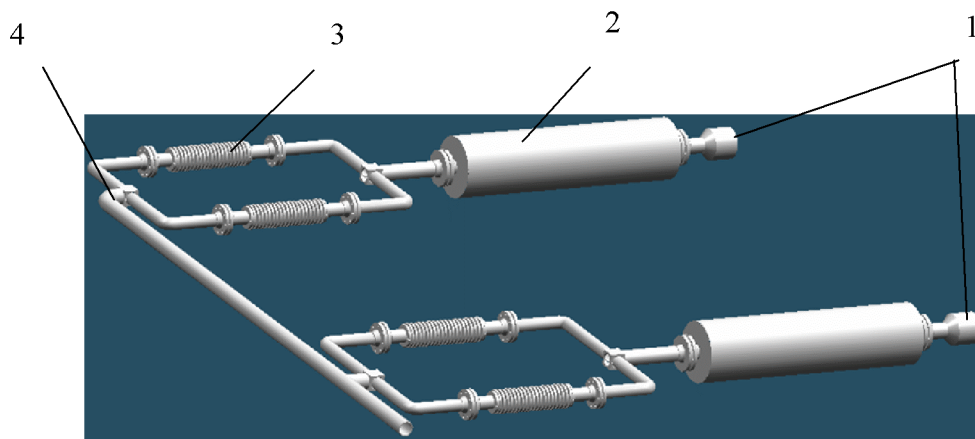


Рис. 4. Магнітно-ультразвукова система очистки промислових стічних вод продуктивністю до 3000 м³/добу; 1 – вхідний трубопровід; 2 – генератор акустичних коливань; 3 – магнітна система; 4 – вихідний трубопровід

Розроблено МУС продуктивністю до 3000 м³/год (рис. 5) для зменшення шару накипу і подальшого попередження його утворення на внутрішніх поверхнях трубок теплообмінних агрегатів для використання в умовах Качанівського нафтопереробного заводу, НГВУ „Охтирканафтогаз”.

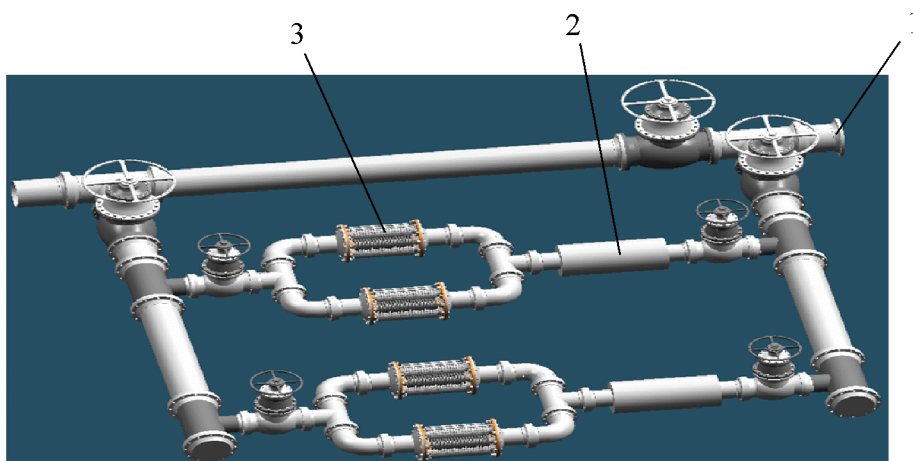


Рис. 5. Магнітно-ультразвукова система очистки рідини продуктивністю 3000 м³/год: 1 – вхідний трубопровід; 2 – блок генераторів акустичних коливань; 3 – блок знакозмінного магнітного поля

Використання МУС у комунальному тепlopостачанні дозволяє не тільки очищувати рідину, але й зменшувати утворення накипу на внутрішніх поверхнях трубок теплообмінника Т2-50 СГ. Від широких фракцій легких вуглеводнів, які проходять через теплообмінник з температурою 130 °С, воді з температурою 30 °С передається 102712 ккал/год. Наявність 2 мм накипу зменшує кількість тепла, яке передається через трубку, до 25830 ккал/год. Втрати тепла становлять 76882 ккал/год. На отримання 860 ккал/год витрачають 1,0 кВт. Для компенсації втрат тепла внаслідок шару накипу товщиною 2 мм на внутрішніх поверхнях трубок теплообмінника необхідно додатково витратити 89,40 кВт/год, що становить $0,21 \times 89,40 = 18,77$ грн/год.

Таким чином, економія, отримана завдяки запобіганню утворення накипу при використанні МУС у теплообмінниках Т2-50 становить 114027,75 грн/рік.

Магнітно-ультразвукова система очистки може успішно використовуватись у газо- та нафтовидобувній промисловості, житлово-комунальній сфері та в інших галузях, де необхідна очистка рідинних середовищ від забруднюючих домішок.

1. *Фернандес К.* Доклад на форумі ЮНЕСКО по устойчивому развитию. – Йоханесбург, сентябрь 2002. – Газета «Сегодня» от 2.09.2002 г. «Скоро начнутся войны за воду»

2. *Пат. 48863 України*, МПК С 02 F 1/36. Спосіб підготовки та очистки рідини. – № 2002010807; Заявл. 31.01.2002; Опубл. 15.08.2002, Бюл № 8. – 3 с.

3. *Пат. 60971 А України*, МПК С 02 F 1/36. Спосіб реструктуризації рідини / О. М. Терентьев, С. В. Бульбас, В. А. Шевченко, В. П. Гармаш, І. О. Терентьев (Україна); Заявл 04.09.2003; Опубл. 15.10.2003, Бюл. № 10.

4. *Шимони А.* Реальность квантового мира // В Мире науки, № 3. – 1988. – С. 22.

5. *Глинка Н. Л.* Общая химия. Л.: Химия, 1982. – 728 с.

6. *Колокольцев С. Н.* Реплика к затянувшемуся спору // Химия и жизнь. – № 4. – 1989. – С. 25–32.

7. *Кульский Л. А., Душкин С. С.* Магнитное поле в процессе вибрационной обработки. – К.: Наук. думка, 1987. – 112 с.

8. *Душкин С. С., Сырова В. А.* Влияние магнитной активации сернокислого алюминия на эффективность осветления воды // Наука и техника в городском хозяйстве. – К.: Будівельник, 1981. – С. 14–18.

9. *Арцимович А. А., Лукьянов С. Ю.* Движение заряженных частиц в электрическом и магнитном полях. – 2-е изд. – М.: Наука, 1978. – 224 с.

10. *Родионов В. Н.* Техника защиты охраны среды. – М.: Химия, 1989. – 512 с.