

- Марцинковский, В. А. Насосы атомных электростанций [Текст] / В. А. Марцинковский, П. Н. Ворона. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 256 с. – Режим доступа: [http://lib.sumdu.edu.ua/library/DocDescription?doc\\_id=568](http://lib.sumdu.edu.ua/library/DocDescription?doc_id=568)
- Тлумиені пульсації в системах гідравлических [Text] // Гідравліка і Пневматика. – 1997. – Vol. 4. – P. 17–18.
- Device for tensioning threaded rods: пат. PCT/FR2007/051478 France: МПК В 23 Р 19/06, WO 2008/00095 А1 [Text] / Monville J.-M., Loiseau V., Faus J., Alegre M. – АК-TIEBOL AGETSKF Hornsgatan 1, S-415 50. – Göteborg № 0605924; applied 30.06.2006; published 03.01.2008. – Available at: <http://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=WO2008000995>
- Устройство для сборки и разборки крепежных деталей фланцевых соединений сосудов давления: пат. 2092303 Рос. Федерация: МПК В25 В 29/02, [Текст] / Геймур А. П. – заявитель патентообладатель Особое конструкторское бюро машиностроения. – № 94008246/28 ; заявл. 10.03.1994 ; опубл. 10.10.1997. – Режим доступа: <http://bankpatentov.ru/node/304535>
- Flange bolt fastening method and fastening auxiliary device: пат. 08-011063 Japan: МПК В23 Р 19/06 [Text] / Yoshida T.; Suwa H. – Hitachi Plant Eng & Constr CoLtd. – № 06-169070; applied 28.06.1994; published 16.01.1996. – Available at: <http://www.sumobrain.com/patents/jp/Flange-bolt-fastening-method-auxiliary/JP3467849.html>
- Apparatus for automatically inserting and removing screw-threaded elements into and from tapped bores: пат. 5330159 USA: МПК G2 С 13/06 [Text] / Siegfried H. – GEA WENUTEC GMBH, GERMANY. – № US 08/005,560; applied 19.01.1993; published 19.07.1994. – Available at: <http://www.google.com/patents/US5330159>
- Коновалов, А. И. Гайковерт нового века [Текст] / А. И. Коновалов // Атомная стратегия. – 2006. – № 22. – С. 33. – Режим доступа: [http://www.proatom.ru/files/as22\\_20\\_40.pdf](http://www.proatom.ru/files/as22_20_40.pdf)
- Пристрій для створення зусилля при герметизації фланцевих роз'ємів корпусів обладнання: пат. 71976 Україна: МПК F16В 1/00 [Текст] / Пащенко В. Д., Пушкар С. Л., Проценко С. В., Чуйко В. П. – заяв. 20.04.2010; опубл. 10.08.2012. – Бюл. №15. – Режим доступу: <http://uapatents.com/6-71976-pristriij-dlya-stvorenniya-zusillya-pri-germetizaci-flancevikh-rozehmiv-korpusiv-obladnannya.html>
- Навроцкий, К. Л. Теория и проектирование гидро- и пневмоприводов [Текст] / К. Л. Навроцкий. – М.: Машиностроение, 1991. – 384 с. – Режим доступа: <http://www.twirpx.com/file/670125/>

*Представлено експериментальні дослідження роботи гідродинамічного пульсатора та визначення інтенсивності ультразвукового поля, яке створюється цим пристроєм, та його вплив на параметри високов'язкої нафти Коханівського родовища.*

*У статті описана вдосконалена конструкція гідродинамічного пульсатора, який застосовується в технологічній схемі при підніманні високов'язких нафт з свердловин на денну поверхню*

*Ключові слова: нафта, пульсатор, коливання, ультразвук, інтенсивність, в'язкість, температура*

*Представлены экспериментальные исследования работы гидродинамического пульсатора и определения интенсивности ультразвукового поля, создаваемого устройством, и его влияние на параметры высоковязкой нефти Кохановского месторождения.*

*В статье описана усовершенствованная конструкция гидродинамического пульсатора, который применяется в технологической схеме при поднимании высоковязких нефтей из скважин на дневную поверхность*

*Ключевые слова: нефть, пульсатор, колебания, ультразвук, интенсивность, вязкость, температура*

УДК 622.245.52

DOI: 10.15587/1729-4061.2014.28002

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ГІДРОДИНАМІЧНОГО ПУЛЬСАТОРА ТА ЙОГО ВПЛИВ НА ПАРАМЕТРИ НАФТИ

Я. Я. Якимечко

Кандидат технічних наук, доцент  
Кафедра морських нафтогазових технологій  
Івано-Франківський національний технічний  
університет нафти і газу  
вул. Карпатська, 15,  
м. Івано-Франківськ, Україна, 76019  
E-mail: JarykJJ@ukr.net

### 1. Вступ

Геологічні ресурси високов'язких нафт і природних бітумів перевищують ресурси звичайної нафти. 75 % високов'язких нафт знаходяться на глибинах до 2000 м. Основні ускладнення під час експлуатації горизонтів

з високов'язкими нафтами (ВВН) пов'язані з фізико-хімічними властивостями самих нафт. Збільшення їх в'язкості і зниження температури при підніманні на поверхню та значний вміст асфальтеносмолопарафінових речовин призводить до відсутніх втрат тиску у привибійній зоні пласта, стовбурі свердловини, ін-

тенсивного відкладання густих вуглеводнів на стінках насосно-компресорних труб і, як наслідок, погіршення видобувних можливостей свердловин і збільшення загальних витрат на експлуатацію таких свердловин. Усунення цих недоліків дало б змогу збільшити видобуток високов'язкої нафти на родовищах України. Для цього необхідно вирішити низку задач, які до сьогоднішнього дня практично не вирішені.

Однією із таких задач є удосконалення технології видобування та насосного обладнання для піднімання високов'язкої нафти із свердловин, вирішення якої є досить актуальним на сучасному етапі нафтовилучення. Сьогодні у всіх країнах світу ведеться інтенсивний пошук нових технологій і технічних засобів, які базуються на нових фізичних явищах і ефектах. Зокрема, створення і дослідження роботи пульсуючих пристроїв та визначення впливу гідродинамічних коливань на зниження в'язкості нафти.

## 2. Аналіз літературних даних и постановка проблеми

В Україні видобування високов'язкої нафти здійснюється свердловинним методом. В роботах вчених І. М. Міщенко і О. Ф. Миронова [1] відмічається, що одними з найбільш придатними для видобування ВВН є струминні насоси. В цих насосах відсутні рухомі деталі, у вставному варіанті вони можуть бути замінені без підйому на поверхню насосно-компресорних труб. Єдиною проблемою для струминних насосів є всмоктування ВВН.

Одним із шляхів зменшення негативного впливу високої в'язкості нафти на всмоктування її до вхідної лінії насоса, поєднавши роботу струминного насоса із пульсаційною дією на високов'язку нафту. Це позитивно вплине на роботу насоса при експлуатації пластів з ВВН, які знаходяться на глибинах до 2000 м.

Враховуючи результати проведених стендових випробувань [2], було зроблено висновок про те, що в якості генератора пульсаційних коливань краще використовувати гідродинамічний пульсатор. Такі пристрої мають мінімальні габарити і масу, просту конструкцію, що не містить жодної рухомої деталі, його проточна частина не піддається кавітаційному руйнуванню, легко монтується у струминний апарат.

При проектуванні гідродинамічного пульсатора був проведений аналіз аналогічних вітчизняних та зарубіжних пристроїв, таких як генератор Гартманівського типу, вихрові генератори, гідроакустичні випромінювачі з резонуючими стержнями (пластиною, мембраною), пристрої, спроектовані на основі трубки Вентурі та інші.

Були розглянуті гідроакустичні генератори [3], принцип дії яких ґрунтується на зміні напрямку потоку або на взаємодії двох і більше закручених струменів між собою. Генерація коливань визначається нестійкістю обертового струменя, деформацією периферійного потоку з періодичною пульсацією, а також при зриванні обертового потоку із зрізу вихідного конусу. Струмін рідини подається через тангенціально розташований отвір (або декілька отворів) і приходить в обертовий рух у камері завихрення, виходячи з неї через звужений вихідний отвір, збільшує обертовий рух і зривається з гострої кромки вихідного отвору.

При цьому виникають пульсації вихідного потоку. Для їх підсилення через центральний отвір подається струмін, величину якого можна регулювати. Якщо центральний струмін змістити з ексцентриситетом 0,5–1,5 мм, то інтенсифікується розвиток автоколивального процесу, збільшується амплітуда прецесії пріосьового потоку, підвищується рівень пульсації тиску і швидкості в периферійному вихорі і відповідно росте потужність випромінюваного поля і к.к.д. генератора.

Виникнення хімічних реакцій у полі ультразвукових хвиль тісно пов'язане з явищем кавітації, яка сприяє утворенню порожнин в рідині з наступним їх лусканням і супроводжується інтенсивними гідравлічними ударами. Кавітаційна порожнина утворюється всередині рідини при умові, що тиск знижується до величини, яка є меншою за межу міцності цієї рідини [4–6].

Також був розглянутий гідродинамічний випромінювач вихрового типу [7], в якому створювались обертові потоки рідини в протилежних напрямках. Для цього використовувались циліндричний корпус і приспособлення для створення обертових потоків рідини, виконане у вигляді циліндричних коаксиально розташованих елементів, які утворюють кільцеві зазори на виході, а зі сторони входу виконані гвинтові канали. Ці гвинтові канали виконані на складних циліндричних елементах і мають протилежний напрямок. Також циліндричні елементи мають конічну форму. Такі пристрої випробувались у лабораторних умовах і хоча отримані хороші результати, потрібно і надалі проводити дослідження і пробувати використовувати їх на практиці.

## 3. Ціль і задачі дослідження

Ціллю дослідження є визначення інтенсивності генеруючого поля, яке створюється гідродинамічним пульсатором та його вплив на зниження в'язкості та збільшення температури високов'язких нафт.

Задачами, що вирішувались для досягнення цієї цілі, були:

- проаналізувавши позитивні та негативні сторони існуючих генераторів, створити удосконалену конструкцію гідродинамічного пульсатора, який би створював інтенсивність поля великого значення;
- розробити схему і виготовити стенд для проведення експериментальних досліджень удосконаленої конструкції гідродинамічного пульсатора.

## 4. Матеріали і методи досліджень роботи гідродинамічного пульсатора

Для удосконалення конструкції гідродинамічного пульсатора використовуємо конусоподібну вихрову камеру з тангенціальними каналами і з внутрішньою поверхнею корпусу, виконаною у вигляді гвинтової поверхні для більшого завихрення потоку рідини. Щоб збільшити інтенсивність генеруючого поля та утворення періодично зривної кавітації з швидким лусканням кавітаційних каверн, було запропоновано дифузор із ступінчастими гострими кромками і кутом розкриття більше  $30^{\circ}$  (рис. 1).

Для зменшення витрат робочої рідини потрібно зменшити діаметр сопла критичної частини. Оскільки ця величина гранична і залежить від очищення робочої рідини (практично використовуються фільтри з діаметрами не більшими як 2,5 мм), то діаметр сопла можна брати не менше 3 мм, бо сопло може засмітитися піском, окалиною і т. п. шламом, який проскочить через фільтр. Тому було запропоновано використовувати дифузор з діаметром сопла критичної частини більше 3 мм, а також пружинний стержень меншого діаметру ніж діаметр сопла, що буде створювати кільцеву щільну з площею поперечного перерізу приблизно рівною критичному. Наявність пружинного стержня ініціює утворення спіралеподібного вихрового шнура, який обертаючись навколо стержня деформує периферійний потік, викликаючи в ньому періодичні пульсації швидкості і тиску, що призводить до збільшення інтенсивності генеруючого поля.

Робоча рідина через патрубок 1 потрапляє у вхідні тангенціальні отвори 5 в кільцеву конусоподібну камеру завихрення 3, де потік рідини під дією центробіжної сили сильно закручується та ініціює виникнення прецесуючого вихрового ядра, яке скручується по довжині струменю. Рухаючись по стінках кругової конусоподібної камери від перерізу з більшим діаметром до перерізу з меншим діаметром, закручений струмінь збільшує свою швидкість руху. Збільшення швидкості руху означає збільшення кінетичної енергії струменя. За законом збереження енергії зростання кінетичної енергії неминує виклике падіння потенційної енергії, а роль потенційної енергії в потоці робочої рідини виконує тиск. Таким чином, чим меншим буде діаметр, тим вищою в ньому буде швидкість руху закрученого струменю і тим нижче впаде тиск. Як тільки тиск у своєму падінні наблизиться за величиною до тиску насичених парів почнеться бурхливе пароутворення. Тобто, почнеться холодне адиабатне кипіння рідини. Цей процес буде супроводжуватися утворенням бульбашок, в середині яких будуть знаходитися пари рідини. Нижній кінець центрального пружинного стержня 2, перебуваючи під одночасною дією перепадів швидкості закрученого струменя і прецесуючого вихрового ядра, буде здійснювати поперечні коливальні рухи, створюючи ще більше завихрення та інтенсифікуючи утворення парогазових бульбашок або каверн. На виході з камери завихрення при проходженні рідини через ступінчатий дифузор 4, діаметр якого поступово буде збільшуватися і відповідно швидкість руху рідини буде зменшуватися, а тиск відповідно збільшуватиметься. Стінки парових бульбашок, в середині яких тиск буде нижчий за атмосферний, почнуть стрімко рухатися назустріч один одному. Чим більшим буде зовнішній тиск, тим більшим буде сила, яка діє на стінки, тим більшим буде їх прискорення. Незначна частина пари в об'ємі бульбашки буде завжди присутня. Кількість її мала, і тому більшу частину процесу лускання пара не здійснює суттєвого спротиву зближенню стінок бульбашки. І лише в кінці, коли об'єм бульбашки складає відсотки або долі відсотка від її максимального об'єму, їх тиск за величиною наближається до зовнішнього тиску на стінки бульбашки. Але оскільки стінки вже набрали швидкість та інерцію, тому зупинити їх неможливо..

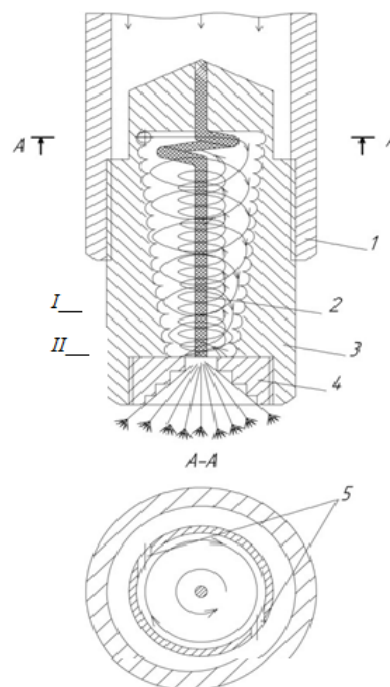


Рис. 1. Схема гідродинамічного пульсатора:  
1 – патрубок; 2 – пружинний стержень; 3 – конусоподібна камера завихрення; 4 – ступінчатий дифузор;  
5 – тангенціальні вхідні канали; I, II – сідчення сопла

У результаті швидкісний напір стінок продовжує стискати бульбашку і вона лускає з виникненням потужних мікропотоків, які подібні до кумулятивних струменів. В цей момент нагрівання рідини буде відбуватися за рахунок енергії, яка звільняється при гальмуванні струменя під час кавітаційних процесів, тобто за рахунок гідравлічного тертя.

Одночасно збільшення тиску призведе до зворотного процесу – конденсації пари. Температура в центрі бульбашки, що луснула, в результаті стиснення буде значно перевищувати температуру робочої рідини. Це перевищення, на думку деяких дослідників, може досягати десятків і навіть сотень градусів.

Для проведення досліджень було спроектовано стенд, який складається з таких основних частин: силового модуля, гідродинамічного пульсатора, камери, де б досліджувалися фізичні поля, первинних датчиків і вторинної вимірювальної апаратури, необхідної для визначення параметрів фізичних полів.

Силовий модуль стенду має насос, який забезпечує витрати, в середньому  $0,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$  при тиску 10 МПа через сопло з площею поперечного перерізу приблизно  $7,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ . Це може би бути насос плунжерного, шибєрного, роторного або шестерневого типу. Також потрібний електродвигун з потужністю до 3 кВт і числом обертів приблизно  $50 \text{ с}^{-1}$  (3 000 об/хв). Електродвигун і насос повинні бути змонтовані на спільній рамі та з'єднані між собою муфтами. Обов'язково повинно бути заземлення. Схема лабораторного стенду зображена на рис. 2, 3.

Гідравлічну частину стенду зроблено з замкнутим циклом, наприклад: робоча рідина з технічної ємності через всмоктувальну лінію потрапляє в насос, звідти в нагнітальну лінію і через витратомір і фільтр подається

ся в гідродинамічний пульсатор, який розташований в камері досліджень, заповненій рідиною, звідки через вихідну лінію відпрацьована рідина повертається в технічну ємність.

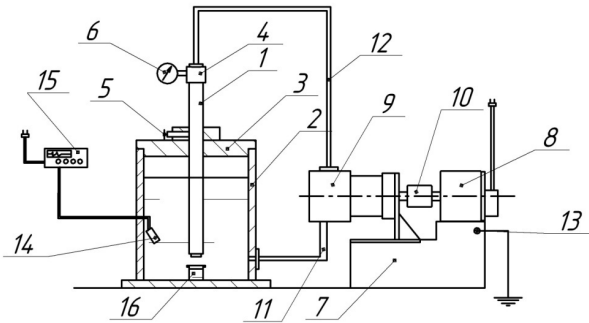


Рис. 2. Схема лабораторного стенду для визначення інтенсивності енергетичного поля, створюваного гідродинамічним пульсатором: 1 – гідродинамічний пульсатор; 2 – металева камера; 3 – кришка камери; 4 – перехідник; 5 – гвинт стопорний; 6 – манометр; 7 – рама; 8 – електродвигун; 9 – поршневий насос; 10 – муфта; 11 – всмоктувальна лінія; 12 – нагнітальна лінія; 13 – клемма заземлення; 14 – магнітострикційний датчик; 15 – осцилограф; 16 – капсула з високов'язкою нафтою

Для камери (технічної ємності), в якій працює пристрій-пульсатор, необхідно розрахувати максимально допустимий тиск за формулою:

$$P_{\max} = k_n P_k, \tag{1}$$

де  $k_n = 1,5$  – коефіцієнт надійності;  $P_k$  – тиск в камері, Па. Напруження, які виникають у камері,  $\sigma_k$  визначаються з формули кільцевих радіальних і осьових напружень:

$$\sigma_k = \sigma_o = \frac{P_{\max} D_{\text{вн}}}{2\delta} \leq [\sigma_p], \tag{2}$$

де  $D_{\text{вн}}$  – внутрішній діаметр камери, м;  $\delta$  – товщина стінки камери, м;  $[\sigma_p]$  – допустимі напруження при розтягу для матеріалу камери, Па.

Дослідження на лабораторному стенді проводяться в два етапи. Перший – це визначення параметрів енергетичного поля, створюваного гідродинамічним пульсатором при різних початкових умовах, тобто при заданих тиску і витраті на вході в гідродинамічний пульсатор та вибір оптимальних режимів роботи пульсатора. Другий етап – це вивчення впливу енергетичних полів, створюваних гідродинамічним пульсатором, на зниження в'язкості та збільшення температури асфальтеносмолопарафінової нафти при роботі пульсатора на оптимальних режимах.

Для визначення синергічної дії енергетичного поля, створюваного гідродинамічним пульсатором, потрібно окремо визначити дію енергетичного поля, а потім як побічних, теплового поля і явища кавітації. Для цих цілей потрібно мати первинні датчики (вимірювальні перетворювачі) – пристрої, які сприймають вимірюваний параметр і перетворюють його у вихідний сигнал

(як правило електричний), зручний для передачі по лініях зв'язку на вторинні прилади для подальшого перетворення, реєстрації і обробки, щоб отримати результат у формі вимірної фізичної величини в функції часу.



Рис. 3. Фотографія лабораторного стенду для дослідження роботи гідродинамічного пульсатора

Інтенсивність ультразвукового поля може бути обчислена за формулою

$$I = 2\pi \cdot A_0^2 f^2 \rho \cdot c, \tag{3}$$

де  $A_0$  – амплітуда зміщень, м;  $f$  – частота коливань,  $s^{-1}$ ;  $\rho$  – густина середовища,  $kg/m^3$ ;  $c$  – швидкість звуку в цьому середовищі, м/с.

Густина середовища і швидкість звуку в ньому можна взяти табличними або обчислити за відомими формулами.

Також інтенсивність поля, створюваного гідродинамічним пульсатором, можна визначити через добуток побічних величин, користуючись формулою

$$I = \frac{PQ}{S}, \tag{4}$$

де  $P$  – тиск у соплі, Па;  $Q$  – витрати рідини через сопло,  $m^3/s$ ;  $S$  – площа поперечного перерізу сопла,  $m^2$ .

Значить для вимірювання цих величин потрібно мати на стенді манометри або датчики тиску і витратомір.

Порівнюючи отримані результати, обчислені за формулами (3) і (4), можна із більшою достовірністю говорити про інтенсивність енергетичного поля, створюваного гідродинамічним пульсатором, і легше визначити оптимальні режими його роботи.

Щоб визначити теплове поле, потрібно вимірювати різницю температур на вході в гідродинамічний пульсатор і на виході з нього. Для цього можна використати скляні рідинні термометри (спиртові або ртутні), електрорезистивні термометри типу ТПК з рухомим контактом, також термоелектричні перетворювачі або як їх ще називають термопари типу ТМК (мідь-копель)

або типу ТХК (хром-копель). Але при визначенні цих параметрів потрібно враховувати час і об'єм рідини, який нагрівався за даний період часу.

Швидкість поширення ультразвуку в матеріальному середовищі визначається такими його характеристиками, як пружність і густина. Але при підвищенні деякого граничного для даного середовища значення інтенсивності ультразвуку і при переході від поширення коливань малої амплітуди до коливань кінцевої амплітуди в полі ультразвукових коливань все більшу роль починають відігравати нелінійні ефекти. Порушення принципу суперпозиції хвильового процесу призводить до виникнення нових фізичних явищ – тиску випромінювання, акустичних потоків і найважливішого прояву дії потужного ультразвуку на рідину – акустичної кавітації.

Під час кавітації в рідині виникають і ростуть парогазові бульбашки, які нелінійно пульсують і лускаються з утворенням ударних хвиль і кумулятивних струменів. Поширення потужного ультразвуку кінцевої амплітуди в рідині з розвитком кавітаційних явищ супроводжується перебігом ряду фізико-хімічних процесів, які мають велике практичне значення – дегазації, емульгування, коагуляції, диспергування та ін.

Так як уже відомо, що утворення кавітації залежить і від в'язкості рідини, в якій розповсюджуються коливання, то бажано було б провести дослідження, використовуючи в якості робочої рідини легку малов'язку нафту. Тому що для видобування високов'язких нафт уже використовують легку нафту як розчинник. А вивчивши дію гідродинамічного пульсатора, в якому як робочу рідину використовувати мало в'язку нафту при оптимальних режимах роботи, можна добитися значного зниження в'язкості важких асфальтеносмолопарфінових нафт.

Дослідження проводились на лабораторному стенді, який складається з металевої камери (технічної ємності) для досліджень фізичних полів, створюваних за допомогою гідродинамічного пульсатора; гідравлічна частина стенду була зроблена із замкнутим циклом – робоча рідина подавалась з технічної ємності через насос на гідродинамічний пульсатор і в металеву камеру, звідки через вихідну лінію рідина поверталась в технічну ємність. Для вимірювання температури використовувались скляні спиртові термометри. В якості піддослідної нафти використовували високов'язку нафту з Коханівського родовища.

Для визначення тиску в соплі використали рівняння Бернуллі [8] для двох поперечних січень 1 і 2, проведених в усталеному потоці реальної рідини

$$P_1 + \alpha_1 \frac{\rho \cdot v_{cp1}^2}{2} + \rho \cdot g \cdot z_1 = P_2 + \alpha_2 \frac{\rho \cdot v_{cp2}^2}{2} + \rho g z_2 + \Delta p_{12}, \quad (5)$$

де  $P$  – статичний тиск, Па;  $v_{cp}$  – середня швидкість в даному січенні, рівна відношенню секундної об'ємної витрати до площі січення, м/с;  $\rho$  – густина робочої рідини, кг/м<sup>3</sup>;  $z$  – висота січення струменю над умовним рівнем, м;  $\alpha$  – поправочний коефіцієнт на нерівномірність розповсюдження швидкості по січенню 1 і 2;  $\Delta p_{12}$  – втрата тиску між січеннями 1 і 2, зв'язана з роботою сил тертя.

### 5. Результати досліджень інтенсивності ультразвукового поля, створюваного гідродинамічним пульсатором

На лабораторному стенді було проведено ряд дослідів для визначення інтенсивності ультразвукового поля (рис. 2). Результати випробувань зведено в табл. 1.

Таблиця 1

Результати лабораторних досліджень інтенсивності ультразвукового поля, створюваного гідродинамічним пульсатором

Площа поперечного перерізу сопла, м <sup>2</sup> ·10 <sup>-6</sup>	Тиск в нагнітальній лінії, Па ·10 <sup>6</sup>	Об'єм рідини з сопла пульсатора, м <sup>3</sup> ·10 <sup>-3</sup>	Час, за який витікає даний об'єм рідини, с	Інтенсивність ультразвукового поля, Вт/м <sup>2</sup> ·10 <sup>3</sup>
7,06	0,118	0,62	9	1,153
		0,67	10	1,120
		0,74	11	1,121
		0,69	10	1,153
		0,68	10	1,136
7,06	2,06	1,3	7	54,18
		1,6	9	51,64
		1,28	6	62,45
		1,38	7	57,49
4,15	6,81	0,86	6	234,26
		0,99	6	270,36
		0,96	6	262,87
		0,98	6	266,95

Високов'язка нафта Коханівського родовища помічалася в контейнер і після цього піддавалася обробці гідроакустичним полем, створеним пульсатором. Внаслідок чого в'язкість нафти з 147 мПа·с знизилась до 18 мПа·с. В той самий час температура обробленої нафти підвищилась з 15 °С до 58 °С за півгодини.

Інтенсивність ультразвукового поля визначається [8] за формулою

$$I = P \cdot v, \quad (6)$$

де  $P$  – тиск в нагнітальній лінії, Па;  $v$  – швидкість витікання рідини з сопла, м/с;

$$v = \frac{Q}{S}, \quad (7)$$

де  $Q$  – витрати рідини через сопло пульсатора, м<sup>3</sup>/с;  $S$  – площа поперечного перерізу сопла, м<sup>2</sup>;

$$Q = \frac{V}{t}, \quad (8)$$

де  $V$  – об'єм рідини, яка витікає із сопла кавітатора, м<sup>3</sup>;  $t$  – час, за який витікає даний об'єм рідини, с.

### 6. Обговорення результатів лабораторних випробувань інтенсивності ультразвукового поля, створюваного гідродинамічним пульсатором

Лабораторними дослідженнями гідродинамічного пульсатора було встановлено характер витікання робочої рідини з пристрою. Потік, потрапляючи через тангенціальні отвори в камеру закручування, набуває

відцентрового прискорення і, витікаючи з великою швидкістю через сопло пульсатора, створює гідроакустичне поле [9].

Оптимальний режим роботи гідродинамічного пульсатора (табл. 1) виникає при площі поперечного перерізу сопла  $4,15 \text{ м}^2 \cdot 10^{-6}$ , тиску в нагнітальній лінії  $6,81 \text{ МПа}$  та інтенсивності ультразвукового поля  $234,26\text{--}266,95 \text{ Вт/м}^2 \cdot 10^3$ . Тобто при меншому діаметрі сопла створюється більше значення інтенсивності поля.

В'язкість Коханівської нафти після оброблення гідроакустичним полем у порівнянні з початковим значенням з  $147 \text{ мПа}\cdot\text{с}$  по завершенні досліджень знизилась до  $18 \text{ мПа}\cdot\text{с}$ .

В той же час температура нафти за час проведення дослідів збільшилась: початкове значення було  $15^\circ\text{C}$ , а по завершенні досліджень воно становило  $58^\circ\text{C}$ . Це свідчить про те, що частина енергії гідроакустичного поля трансформується у тепло. Під час роботи гідродинамічного пульсатора виникають швидкоплинні градієнти тиску і проходить руйнування механічної структури високов'язкої і відбувається перехід неньютонівської рідини в ньютонівську, що підтверджується результатами експериментів, які наведені у роботах [10–17].

## 7. Висновки

На основі проведених експериментальних досліджень встановлено можливість виникнення пульсацій і коливань тиску у потоці робочої рідини при її проходженні через гідродинамічний пульсатор.

За допомогою спроектованого і виготовленого стенду вдалося визначити інтенсивність гідроакустичного поля, величина якого є достатньою для зниження в'язкості високов'язкої нафти (з  $147 \text{ мПа}\cdot\text{с}$  до  $18 \text{ мПа}\cdot\text{с}$ ), що дозволяє без проблем всмоктувати нафту у забірну лінію струминних насосів.

Найбільш значущим ефектом від роботи гідродинамічного пульсатора є перехід неньютонівської нафти в ньютонівську за рахунок руйнування механічної структури нафти, що призводить до збільшення температури нафти.

Сукупність цих факторів робить можливим застосування гідродинамічного пульсатора в технологічній схемі для піднімання високов'язких нафт із свердловин на денну поверхню шляхом зростання швидкості відкачування високов'язкої нафти на денну поверхню.

## Література

1. Федоткин, И. М. Исследование кавитации в технологических процессах [Текст] / И. М. Федоткин, А. Ф. Немчин. – К.: Вища школа, 1984. – 175 с.
2. Якимечко, Я. Я. Стендові випробування гідродинамічного пристрою-пульсатора та його вплив на параметри товарної нафти [Текст] / Я. Я. Якимечко // Нафтова і газова промисловість. – 2009. – № 5-6. – С. 29–30.
3. Фридман, В. М. Ультразвуковая химическая аппаратура [Текст] / В. М. Фридман. – М.: Машиностроение, 1967. – 300 с.
4. Фем'як, Я. М. Підвищення ефективності руйнування гірських порід [Текст] / Я. М. Фем'як, Р. С. Яремійчук, Я. Я. Якимечко // Нафтова і газова промисловість. – 2001. – №2. – С. 16-17.
5. Френкель, Я. И. Кинетическая теория жидкостей [Текст] / Я. И. Френкель. – М.- Л.: Издательство АН СССР, 1959. – 359 с.
6. Яремійчук, Р. С. Руйнування гірських порід при кавітаційному бурінні свердловин [Текст] / Р. С. Яремійчук, Я. М. Фем'як, Я. Я. Якимечко // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – Івано-Франківськ: ІФДТУНГ, 2000. – Вип. 36, Т. 2. – С. 33-37.
7. Агранат, Б. А. Ультразвуковая технология [Текст] / Б. А. Агранат. – М.: Металлургия, 1974. – 505 с.
8. Сургучов, М. Л. Гидродинамическое, акустическое, тепловое циклические воздействия на нефтяные пласты [Текст] / М. Л. Сургучов, О. Л. Кузнецов, Э. М. Симкин. – М.: Недра, 1975. – 185 с.
9. Антонов, А. Н. Пульсации давления при струйных и отрывных течениях [Текст] / А. Н. Антонов, В. М. Купцов, В. В. Комаров. – М.: Машиностроение, 1990. – 272 с.
10. Шандровський, Т. Р. До проблеми створення насосів для піднімання із свердловин високов'язких нафт [Текст] / Т. Р. Шандровський, Я. Я. Якимечко // Нафтова і газова промисловість. – 1999. – № 2. – С. 41-44.
11. Вахитов, Г. Г. Использование физических полей для извлечения нефти из пластов [Текст] / Г. Г. Вахитов, Э. М. Симкин. – М.: Недра, 1985. – 231 с.
12. Симкин, Э. М. Виброволновые и вибросейсмические методы воздействия на нефтяные пласты [Текст] / Э. М. Симкин, Г. П. Лопухов // Нефтепромысловое дело: обзор. информ. – М., 1985. – Вып. 15. – 32 с.
13. Taleyarkhan, R. P. Evidence for nuclear emissions during acoustic cavitation [Text] / R. P. Taleyarkhan, C. D. West, J. S. Cho, R. T. Lahey (jr), R. I. Nigmatulin, R. C. Block // Science. – 2002. – P. 1868–1873. doi:10.1126/science.1067589.
14. Сиротюк, М. Г. Экспериментальные исследования ультразвуковой кавитации [Текст] / М. Г. Сиротюк; под общ. ред. В. Я. Розенберга // Мощные ультразвуковые поля. – М.: Наука, 1968. – С. 167-220.
15. Симкин, Э. М. Влияние акустического поля на реологические свойства нефтей [Текст] : Тр. ин-та / Э. М. Симкин, Л. В. Соколов. – М., ВНИИЯГ, 1981. – С. 60-63.
16. Сургучев, М. Л. Вторичные и третичные методы увеличения нефтеотдачи пластов [Текст] / М. Л. Сургучев. – М.: Недра, 1985. – 308 с.
17. Ефимова, С. А. Регулирование эффективной теплопроводности коллекторов в акустическом поле [Текст] / С. А. Ефимова, М. Л. Сургучев и др. // Нефтяное хозяйство. – 1975. – № 4. – С. 52-55.