

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПУЛЬСАЦІЙНО-КАВІТАЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ, ЩО ВИНΙΚАЮТЬ ПІД ЧАС РОБОТИ ГІДРОДИНАМІЧНОГО КАВІТАТОРА

Я. Я. Якимечко

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 727143,  
e-mail: JarykJJ@ukr.net

*Представлено експериментальні дослідження роботи гідродинамічного кавітатора та його вплив на параметри нафти Долинського родовища.*

*Дослідження проводилися на базі нафтогазовидобувного управління «Долинанафтогаз» за розробленою програмою і методикою з метою: визначення частоти і амплітуди пульсацій тиску на виході з гідродинамічного пристрою-кавітатора; визначення впливу створюваних пульсацій тиску на процес зниження в'язкості нафти; оцінки динаміки зміни в'язкості нафти при її обробленні гідродинамічним кавітатором.*

*У статті наведено схему дослідної установки, описано порядок проведення експерименту, проаналізовано отримані результати, які свідчать про зміну реологічних показників нафти, що піддавалась впливу кавітаційно-пульсаційних коливань.*

*Внаслідок проведення експериментальних досліджень були отримані такі результати: встановлено виникнення пульсацій тиску і кавітаційних процесів у потоці робочої рідини при її проходженні через гідродинамічний кавітатор; встановлено характер пульсації потоку, який полягає у зменшенні величин тиску на виході з пульсаційної камери з частотою 10-12 Гц. Амплітуда коливань при роботі з комбінованим соплом діаметром 8 мм складала на вході в установку 4,6-7,0 МПа, а на виході 0,21-0,24 МПа, а з комбінованим соплом діаметром 6 мм відповідно 2,1-8,3 МПа і 0,21-0,28 МПа. Виявлено, що зниження в'язкості високов'язкої нафти відбувається з перших секунд роботи гідродинамічного кавітатора, який, створюючи знакозмінні коливання тиску, руйнує механічну структуру високов'язкої нафти, що сприяє збільшенню швидкості її відкачування із свердловин.*

**Ключові слова:** нафта, кавітатор, коливання, тиск, амплітуда, в'язкість.

*Представлены экспериментальные исследования работы гидродинамического кавитатора и его влияния на параметры нефти Долинского месторождения. Исследования проводились на базе нефтегазодобывающего управления «Долинанафтогаз» по разработанной программе и методике с целью: определения частоты и амплитуды пульсаций давления на выходе из гидродинамического устройства-кавитатора, определение влияния создающихся пульсаций давления на процесс снижения вязкости нефти; оценки динамики изменения вязкости нефти при ее обработке гидродинамическим кавитатором.*

*В статье приведена схема опытной установки, описан порядок проведения эксперимента, проанализированы полученные результаты, свидетельствующие об изменении реологических показателей нефти, которая подвергалась воздействию кавитационно-пульсационных колебаний.*

*Вследствие проведения экспериментальных исследований были получены следующие результаты: установлено возникновение пульсаций давления и кавитационных процессов в потоке рабочей жидкости при ее прохождении через гидродинамический кавитатор; установлен характер пульсации потока, который заключается в уменьшении величин давления на выходе из пульсационной камеры с частотой 10-12 Гц. Амплитуда колебаний при работе с комбинированным соплом диаметром 8 мм составляла на входе в установку 4,6-7,0 МПа, а на выходе 0,21-0,24 МПа, а с комбинированным соплом диаметром 6 мм соответственно 2,1-8,3 МПа и 0,21-0,28 МПа. Обнаружено, что снижение вязкости высоковязкой нефти происходит с первых секунд работы гидродинамического кавитатора, который, создавая знакопеременные колебания давления, разрушает механическую структуру высоковязкой нефти способствует увеличению скорости ее откачки из скважин.*

**Ключевые слова:** нефть, кавитатор, колебания, давление, амплитуда, вязкость.

*Experimental study of the hydrodynamic cavitator and its influence on the parameters of oil Dolinskogo field has been performed. The studies were conducted on the basis of Oil and Gas Management "Dolinanafitogaz" on the developed program and methodology in order to: determine the frequency and amplitude of the pressure fluctuations at the output of the hydrodynamic device - cavitator, to determine the influence of pressure fluctuations that are created, the process of reducing the viscosity of crude oil; assess the dynamics of changes in the viscosity of the oil when it is processed by the hydrodynamic cavitator.*

*The article shows a diagram of the experimental setup described in the procedure of the experiment, an analysis of the results was made, showing the change of rheological parameters of oil exposed to the cavitation-pulsating vibrations.*

*As a result of experimental research achievements were as follows: set the emergence of pressure fluctuations and cavitation processes in the flow of the working fluid as it passes through the hydrodynamic cavitator; established the nature of flow pulsations, which is to reduce the pressure values at the outlet of the pulsation chamber with a frequency of 10-12 Hz, and the oscillation amplitude when working with a combined nozzle diameter of 8 mm was at the entrance of 4,6-7,0 MPa, and output 0,21-0,24 MPa, and the combined nozzle with a diameter of 6 mm, respectively 2,1-8,3 MPa and 0,21-0,28 MPa; it was found that the decrease in the viscosity of highly viscous oil comes from the first seconds of the hydrodynamic cavitator that creates alternating pressure fluctuations and destroys the mechanical structure of the high-viscosity oil so helps to increase its rate of pumping from wells.*

**Key words:** oil, cavitator, vibrations, pressure, amplitude, viscosity.

**Вступ.** Проблема пошуку ефективних технологій видобування високов'язкої нафти із свердловин сьогодні є актуальною у всіх нафтовидобувних країнах світу, у тому числі і в Україні. Для удосконалення цих технологій і технічних засобів використовують нові фізичні явища та ефекти. До таких фізичних явищ відноситься і кавітація. Використання кавітаційно-пульсаційної технології для зниження в'язкості важких нафт в свердловинних умовах на родовищах з високов'язкими вуглеводнями може забезпечити істотне збільшення дебіту свердловин та зниження витрат на їх експлуатацію [1]. Тому проблема більш ефективної експлуатації свердловин, що продукують високов'язкі нафти, за умов існування дефіциту енергоносіїв є актуальною і потребує подальшого вивчення.

**Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень та публікацій.** Останнім часом виявлені термодинамічні ефекти, що виникають в пористому середовищі внаслідок дії на нього ультразвуку. До таких відносяться:

- термоакустичний ефект, що виражається у зміні ефективної теплопровідності середовища в акустичному полі;
- явище зміни тиску насичення, а також зміщення точки конденсації вуглеводневих систем в пористому середовищі під дією акустичного поля;
- руйнування гідратних газів під дією тепла і ультразвуку.

Ці та інші ефекти від дії акустичних коливань на високов'язку нафту можуть бути використані з метою інтенсифікації видобування нафти [2]. Вони є ефективними лише тоді, коли інтенсивність коливань достатня і основним в цьому є розробка, випробування і впровадження потужних і довговічних генераторів імпульсного поля. Перспективними в цьому напрямі є гідродинамічні випромінювачі.

Ефективність цих пристроїв часто залежить від комплексу одночасної дії не одного, а декількох факторів, які поодиноці не дають бажаного ефекту [3,4]. Так, ефективність акустичних коливань суттєво підвищується за одночасного температурного впливу і циклічної зміни тиску.

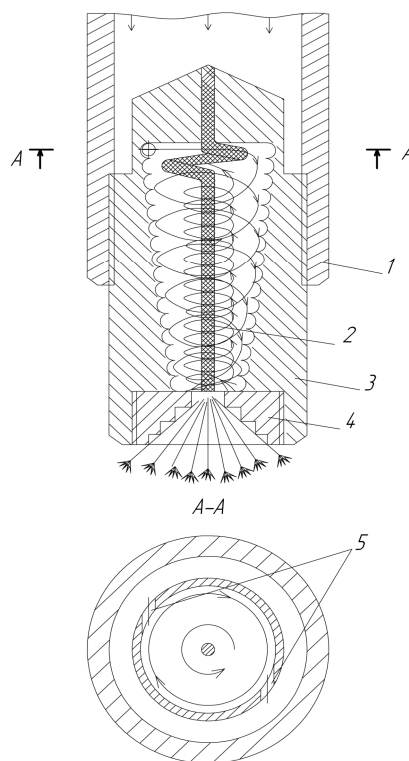
**Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми.** Основні ускладнення під час експлуатації горизонтів з високов'язкими нафтами (ВВН) пов'язані з фізико-хімічними властивостями самих нафт [5]. Під час підняття на поверхню температура нафти знижується, внаслідок чого в'язкість нафт, що містять значну кількість асфальтеносмолопарафінових речовин. Це призводить до відчутних втрат тиску у привибійній зоні пласта, стовбурі свердловини, інтенсивного 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, чого можна

досягти, поєднавши одночасну роботу струминного насоса і гідродинамічного кавітатора.

**Мета роботи** – визначення частоти і амплітуди пульсацій тиску на виході з гідродинамічного пристрою-кавітатора; визначення впливу пульсацій тиску, які створюються, на процес зниження в'язкості нафти з метою інтенсифікації видобування високов'язкої нафти; оцінка динаміки зміни в'язкості нафти при її обробленні гідродинамічним кавітатором.

**Дослідження коливань тиску, які створюються гідродинамічним кавітатором.** Гідродинамічний кавітатор встановлюється на вході у всмоктувальну лінію струминного насоса і, створюючи штучну кавітацію, руйнує механічну структуру високов'язкої нафти, яка всмоктується струминним насосом. Для реалізації цієї технології в Івано-Франківському національному університеті нафти і газу була удосконалена конструкція гідродинамічного кавітатора [6, 7] і проведено дослідження пульсаційно-кавітаційних процесів, що виникають під час роботи такого пристрою. Схема гідродинамічного кавітатора зображена на рис. 1.

Дослідження роботи гідродинамічного кавітатора удосконаленої конструкції та його впливу на нафту було проведено на базі нафтогазовидобувного управління «Долина нафтогаз». Для цього за розробленою програмою і методикою було проведено експериментальні випробування [8, 9]

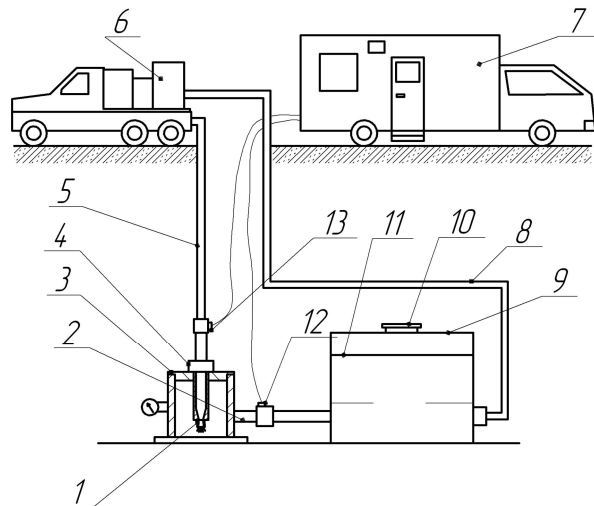


1 – патрубок; 2 – пружинний стрижень; 3 – циліндричний корпус; 4 – ступінчастий дифузор; 5 – тангенціальні вхідні канали

**Рисунок 1 – Схема гідродинамічного кавітатора**

**Висвітлення матеріалів дослідження.**

Виходячи з поставленої мети експериментальних досліджень щодо створення пульсацій тиску в робочій рідині за допомогою гідродинамічного кавітатора, було розроблено і виготовлено стендову експериментальну установку. Дослідження проводилися згідно з нижче наведеною схемою (рис. 2).



1 – гідродинамічний кавітатор; 2 – шток;  
3 – корпус експериментальної установки;  
4 – контргайка; 5 – нагнітальна лінія;  
6 – насосний агрегат; 7 – станція контролю і керування ЕС-22-АСД; 8 – викидна лінія;  
9 – ємність для нафти; 10 – горловина ємності;  
11 – нафта; 12 – контрольний давач тиску на виході з установки; 13 – контрольний давач тиску на вході в установку

**Рисунок 2 – Схема обв'язки стендової експериментальної установки при проведенні досліджень роботи гідродинамічного кавітатора удосконаленої конструкції**

Нафта 11 подається через шток 2 від насосного агрегату 6 типу 4АН-700, проходить через гідродинамічний пристрій-кавітатор 1 і спрямовується у ємність 9. Із ємності нафта прямує у викидну лінію 8 і знову повертається у насос. Тиск на вході і на виході в установку фіксується в автономному режимі через давачі тисків 13, 12 із записом їх показників на комп'ютері станції контролю і керування ЕС-22-АСД 7.

Послідовність проведення операцій була такою:

1. Напомпували в сталеву ємність 1 м<sup>3</sup> підготовленої товарної нафти (ПТН).

2. Провели вимірювання вихідних показників товарної нафти: температури, в'язкості, густини.

3. Обв'язали дослідну установку з насосним агрегатом, ємністю з нафтою і станцією контролю і керування ЕС-22-АСД.

4. Провели прокачування ПТН з тиском 7 МПа на насосному агрегаті упродовж 10 хвилин через дослідну установку і ємність без

встановлення у шток установки гідродинамічного пристрою- кавітатора.

5. Зупинили роботу насоса. Провели вимірювання показників нафти: температури, густини і в'язкості.

6. Встановили у дослідній установці гідродинамічний кавітатор з діаметром комбінованого сопла спочатку 8 мм, а пізніше 6 мм та почали прокачування ПТН упродовж 10 хвилин і фіксували тиск на вході і на виході з установки.

7. Зупинили роботу насоса, відібрали із сталевий ємності пробу ПТН і провели вимірювання показників нафти: температури, в'язкості, густину

Прокачування нафти через дослідну установку з гідродинамічним кавітатором тривало близько однієї години. Кожні 10 хв. зупиняли роботу насоса, відбирали проби нафти і проводили вимірювання її показників: температури, густини і в'язкості.

Усього було відібрано сім проб. Необхідно відзначити, що дослідження проводилися за температури повітря – 6°С, швидкості вітру 8-12 м/с і атмосферних опадах у вигляді снігу.

Вихідні параметри нафти: температура – 14°С; густина  $\rho=849$  кг/м<sup>3</sup>; кінематична в'язкість  $\nu=18,52$  мм<sup>2</sup>/с, статична напруга зсуву через одну і десять хвилин становила СНЗ = 2,0/2,5 дПа.

Необхідно зазначити, що під час прокачування нафти упродовж 10 хвилин без встановлення у шток дослідної установки гідродинамічного кавітатора температура нафти знизилася на 2°С, а густина, кінематична в'язкість і СНЗ (1/10) відповідно збільшились і становили  $\rho=854$  кг/м<sup>3</sup> і  $\nu=28,946 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с і СНЗ = 2,5/3,5 дПа.

Результати проведених експериментальних досліджень зведені до табл. 1.

Пульсацій на виході з установки не спостерігалося (див. рис. 3). Після встановлення гідродинамічного кавітатора у шток установки і відновлення прокачування нафти згідно з наведеною схемою температура нафти почала зростати на 4–5°С кожні 10 хвилин, а густина знизуватися відповідно на 4-8 одиниць і 2-3%. Необхідно зауважити, що після першого прокачування через гідродинамічний кавітатор кінематична в'язкість знизилася більше, ніж на 20 одиниць (в кінцевому результаті кінематична в'язкість зменшилась в 4,16 рази). Статична напруга зсуву через 1 хв. зменшилась на 1,5 дПа, а через 10 хв. – на 2,5 дПа і становила 1,0 дПа і залишалася стабільною до кінця проведення експерименту.

За результатами стендових експериментальних досліджень складено акт, в якому було відмічено, що гідродинамічний кавітатор є безпечним в екологічному відношенні і може бути використаний як засіб для зниження в'язкості нафти у вибійних умовах у складі комплексу обладнання для видобування із свердловин високої в'язкої нафти з вмістом асфальтенів, смол і парафінів.

Таблиця 1 – Результати дослідження впливу роботи гідродинамічного кавітатора на параметри нафти

Тип пристрою	Тиск на вході в установку $P_{вх}$ , МПа	Тиск на виході з установки $P_{вих}$ , МПа	Час нагнітання робочої рідини, хв.	Параметри нафти			
				$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\nu$ , $\times 10^{-6}$ м <sup>2</sup> /с	$t$ , °С	СНЗ, 1/10 хв. дПа
Без гідродинамічного кавітатора	4,0-5,3	0,01	10	854	28,946	12	2,5/3,5
Гідродинамічний кавітатор з діаметром комбінованого сопла 8 мм	4,6-7,0	0,21-0,24	10	846	8,23	16	1,0/1,0
				839	7,65	20	1,0/1,0
Гідродинамічний кавітатор з діаметром комбінованого сопла 6 мм	2,1-8,3	0,21- 0,28	10	835	7,44	25	1,0/1,0
				830	7,23	29	1,0/1,0
				824	6,95	34	1,0/1,0

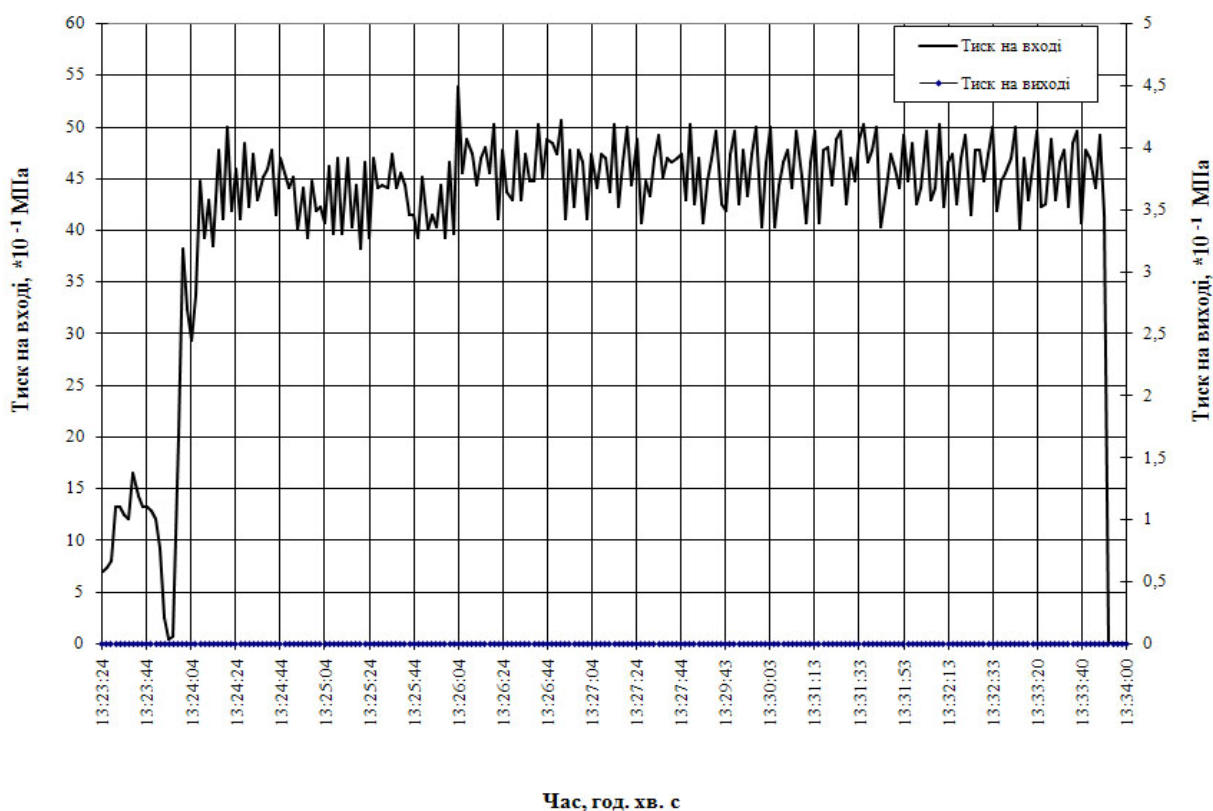


Рисунок 3 – Графічна інтерпретація результатів дослідження роботи установки без гідродинамічного кавітатора при прокачуванні нафти

Частота коливань під час роботи гідродинамічного кавітатора, як видно з рис. 4-5, становила 10-12 Гц. Амплітуда коливань при роботі з комбінованим соплом діаметром 8 мм складала на вході в установку 4,6-7,0 МПа, а на виході - 0,21-0,24 МПа, а з комбінованим соплом діаметром 6 мм відповідно 2,1-8,3 МПа і 0,21-0,28 МПа.

Для порівняння наводимо результати досліджень показників нафти (в'язкість, статична напруга зсуву) після її нагрівання до відповідних температур, які проводилися разом з фахівцями НДПІ ПАТ «Укрнафта» (див. табл. 2).

В результаті проведення стендових випробувань було зафіксовано залежність політропи

нафти від температури (рис. 6). Необхідно відмітити, що найбільш інтенсивна зміна залежності показника політропи нафти від часу її обробки гідродинамічним кавітатором відбувалася у межах температур від 16°С до 34°С. Після 30°С настає поступова стабілізація. Це свідчить про те, що завдяки такій обробці відбувається перехід нафти від стану неньютонівської до неньютонівської рідини [7]. Подальша ж обробка нафти буде малоефективною і недоцільною і призведе до зайвої витрати енергії.

Аналізуючи залежність зростання температури нафти від часу роботи гідродинамічного кавітатора (рис. 7), можна зробити висновок, що ця залежність носить степеневий характер.

Таблиця 2 – Результати дослідження нафти зі свердловин Долинського родовища

№ з/п	Показник	Одиниці вимірювання	№ свердловини		
			833	751	825
1	Температура застигання	°С	21	27	20
2	Густина товарної нафти	кг/м <sup>3</sup>	848	863	849
3	В'язкість кінематична при 25 °С	м <sup>2</sup> /с x 10 <sup>-6</sup>	27,996	-	17,88
	при 29 °С		15,026	36,874	10,448
	при 34 °С		8,193	16,229	7,224
	при 40 °С		7,934	11,562	5,914
4	Статична напруга зсуву через 1/10 хв. при 25 °С	дПа	1,0/1,0	2,0/2,0	1,0/1,0
	при 29 °С		2,0/2,0	2,5/1,0	2,0/2,0
	при 34 °С		1,0/1,0	1,0/1,5	1,0/1,5
	при 40 °С		1,0/1,0	1,0/1,0	1,0/1,0

На рис. 8 відображена залежність густини нафти від часу роботи гідродинамічного кавітатора. Впродовж роботи кавітатора (із зупинками до 5 хв. для відбору проб нафти) густина нафти знизилась з 854 до 824 кг/м<sup>3</sup>.

На рис. 9 відображена залежність коефіцієнта кінематичної в'язкості нафти від часу обробки її гідродинамічним кавітатором. Інтенсивне зниження в'язкості високов'язкої нафти відбувається з перших секунд роботи гідродинамічного кавітатора, який створюючи знакозмінні коливання тиску, руйнує механічну структуру нафти, що сприяє підвищенню швидкості її відкачування із свердловин.

На рис. 10 зображена динаміка зміни в'язкості нафт Долинського родовища від температури. Порівнюючи з нафтою, яка була оброблена гідродинамічним кавітатором, стає очевидним, що її в'язкість за фіксованих температур має нижчі показники, в окремих випадках у два рази. Практично нафта, оброблена гідродинамічним кавітатором, за температури 16 °С має таку ж в'язкість, як підігріта до 34 °С нафта Долинського родовища.

На рис. 11 зображено залежність в'язкості обробленої нафти від часу, який минув після проведення експерименту. Через 4-5 годин після обробки досліджуваної нафти гідродинамічним кавітатором її в'язкість знову повільно зростає, що підтверджується дослідженнями Сургучова М.Л., Кузнєцова О.Л., Сімкіна Е.М. та Вахітова Г.Г. [2, 3].

### Висновки

Внаслідок проведення експериментальних досліджень були отримані такі результати:

- встановлено можливість виникнення пульсацій і кавітаційних процесів у потоці робочої рідини при її проходженні через гідродинамічний кавітатор;

- встановлено характер пульсації потоку, який полягає у зменшенні величин тиску на виході з пульсаційної камери з частотою 10-12 Гц. Амплітуда коливань при роботі з комбінованим соплом діаметром 8 мм складала на вході в установку 4,6-7,0 МПа, на виході - 0,21-

0,24 МПа, а з комбінованим соплом діаметром 6 мм відповідно 2,1-8,3 МПа і 0,21-0,28 МПа;

- визначено раціональне використання підведеної енергії для збільшення внутрішньої енергії в'язкої нафти на основі зміни показника політропи пульсаційно-кавітаційного процесу (від 0,1 до 1,3);

- виявлено, що в'язкість нафти знижується з перших секунд роботи гідродинамічного кавітатора, який, створюючи знакозмінні коливання тиску, руйнує механічну структуру високов'язкої нафти, що сприяє збільшенню швидкості її відкачування із свердловин;

- впродовж 4-5 годин після закінчення обробки досліджуваної високов'язкої нафти гідродинамічним кавітатором її в'язкість знову повільно зростає і набуває початкових значень і навіть перевищує їх. Це явище підтверджується дослідженнями Сургучова М.Л., Кузнєцова О.Л. та Сімкіна Е.М.

Проведені дослідження вказують на суттєвий вплив гідродинамічного кавітатора на параметри нафти і на доцільність застосування цього пристрою у технологічній схемі для видобування із свердловин високов'язких нафт. Роботи у цьому напрямку тривають.

### Література

1 Мищенко И. Т. Основные факторы, осложняющие процесс добычи нефти [Текст] / И. Т. Мищенко. // Тр. ин-та – М., МИНГП им. И.М. Губкина, – 1982. – Вып. 165. – С. 5-14.

2 Сургучев М. Л. Гидродинамическое, акустическое, тепловое циклические воздействия на нефтяные пласты [Текст] / М. Л. Сургучев, О. Л. Кузнєцов, Э. М. Симкин. – М.: Недра, 1975. – 185 с.

3 Вахитов Г. Г. Использование физических полей для извлечения нефти из пластов [Текст] / Г. Г. Вахитов, Э. М. Симкин. – М.: Недра, 1985. – 231 с.

4 United States Patent 4,702,315, Int. Cl. E 21B 43/25. Method and apparatus for sonically stimulating oil wells to increase the production thereof / Albert G. Bodine.; appl. № 900,587; filed: Aug. 26, 1986; date of Patent: Oct. 27, 1987.

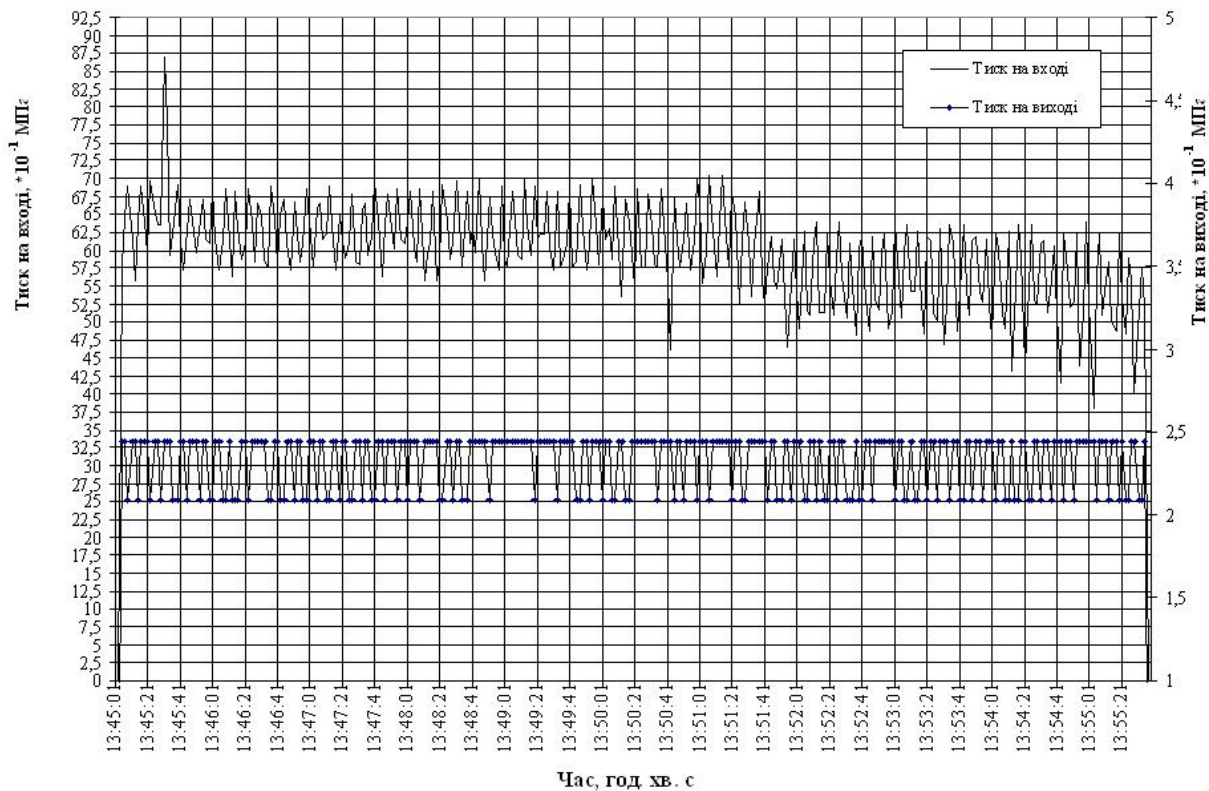


Рисунок 4 – Графічна інтерпретація результатів дослідження гідродинамічного кавітатора з діаметром комбінованого сопла 8 мм при прокачуванні нафти

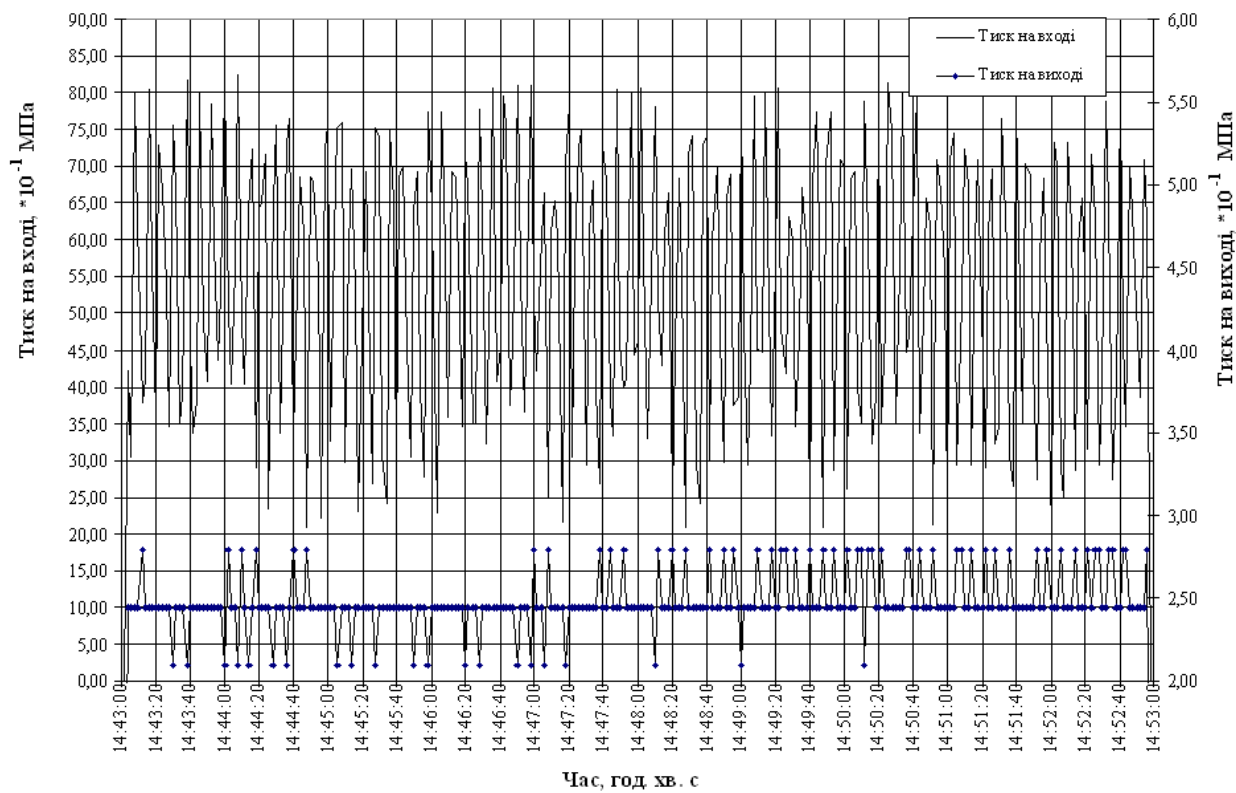


Рисунок 5 – Графічна інтерпретація результатів дослідження гідродинамічного кавітатора з діаметром комбінованого сопла 6 мм при прокачуванні нафти

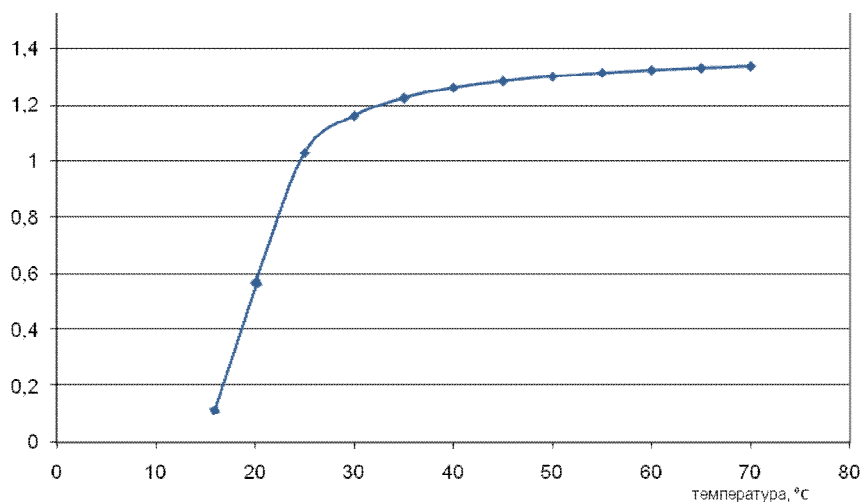


Рисунок 6 – Залежність показника політропи нафти від температури

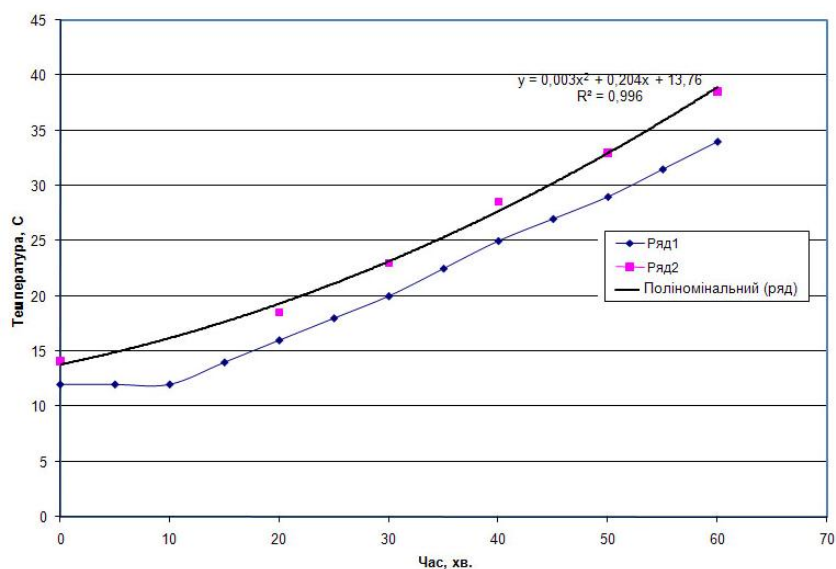


Рисунок 7 – Залежність зростання температури нафти від часу роботи гідродинамічного кавітатора

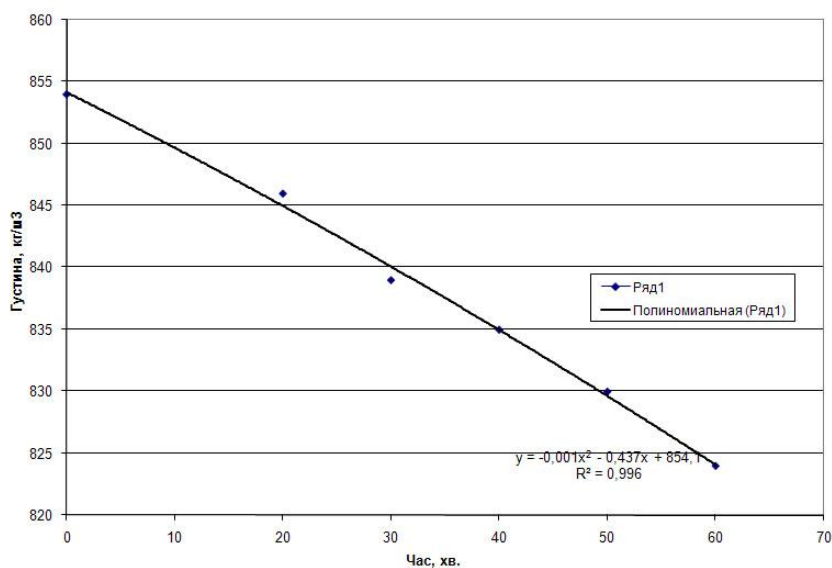


Рисунок 8 – Залежність густини нафти від часу роботи гідродинамічного кавітатора

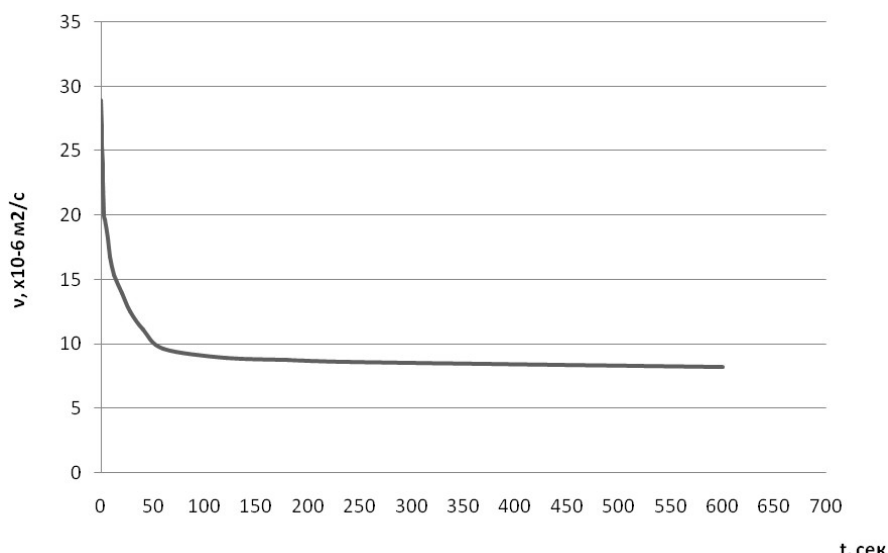


Рисунок 9 – Залежність коефіцієнта кінематичної в'язкості нафти від часу обробки гідродинамічним кавітатором

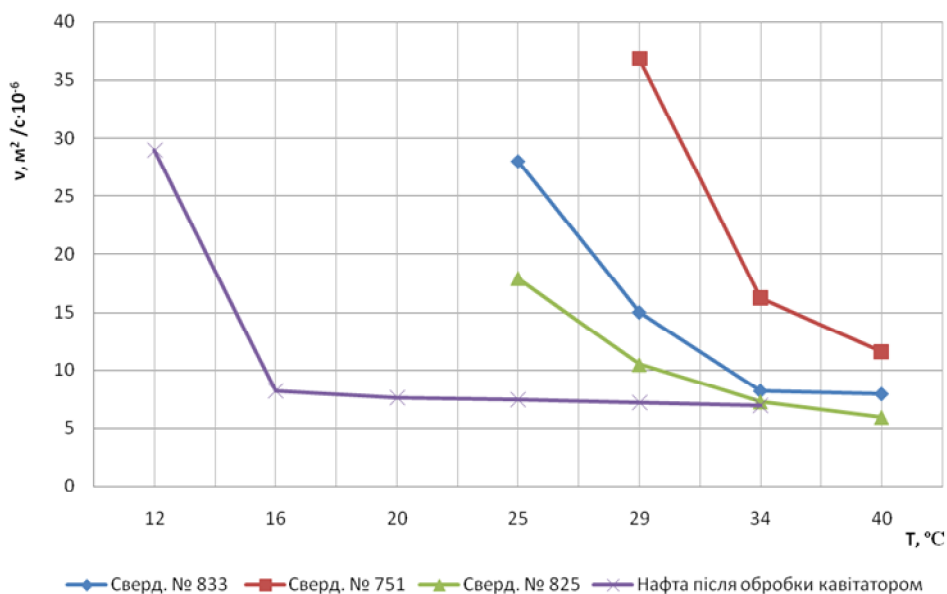


Рисунок 10 – Динаміка зміни в'язкості нафти Долинського родовища при нагріванні

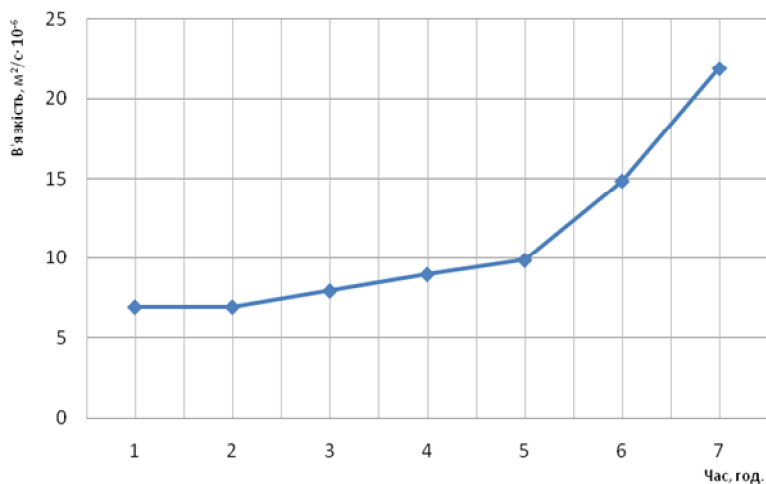


Рисунок 11 – Залежність в'язкості нафти від часу після проведення її обробки гідродинамічним кавітатором



5 Федоткин И. М. Исследование кавитации в технологических процессах [Текст] / И. М. Федоткин, А. Ф. Немчин. – К.: Вища школа, 1984. – 175 с.

6 Патент 36439А Україна, МКП В06В1/20. Гідродинамічний кавітатор / Р.С. Яремійчук, Т.Р. Шандровський, Я. Я. Якимечко; заявники і патентовласники: Р.С. Яремійчук, Т.Р. Шандровський, Я.Я. Якимечко. - № 99126895; заявл. 17.12.1999; опубл. 16.04.2001, Бюл. № 3.

7 Патент 57331 Україна, МПК F04F 5/00 E21B 37/00. Спосіб роботи насосно-ежекторної свердловинної струминної установки з гідродинамічним пульсатором для видобування високов'язких нафт/ Р.С. Яремійчук, Я.Я. Якимечко, Т.Р. Шандровський; заявники і патентовласники Р.С. Яремійчук, Я.Я. Якимечко, Т.Р. Шандровський. - № u2010 08424; заявл. 05.07.2010; опубл. 25.02.2011. Бюл. № 4.

8 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.

9 Якимечко Я. Я. Вплив пульсацій тиску, створених гідродинамічним кавітатором, на параметри нафти / Я. Я. Якимечко, Я. М. Фем'як., С. О. Овецький, І. Я. Яремко // Тези допов. і повідомл. міжнар. наук.-техн. конф. «Нафтогазова енергетика – 2011», м. Івано-Франківськ, 10-14 жовтня 2011 р. – Івано-Франківськ.: вид-во ІФНТУНГ, 2011. – С. 48.

*Стаття надійшла до редакційної колегії  
30.09.14*

*Рекомендована до друку  
професором Кондратом Р.М.  
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)  
д-ром техн. наук Хомінцем З.Д.  
(ТзОВ «ЕМПІ-Сервіс», м. Івано-Франківськ)*