


Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет міського господарства  
імені О. М. Бекетова  
Навчально-науковий інститут енергетичної, інформаційної та транспортної  
інфраструктури  
Кафедра Нафтогазової інженерії і технологій

**Пояснювальна записка**  
**до кваліфікаційної роботи**  
**освітньо-кваліфікаційного рівня «магістр»**

на тему: *«Очищення насосно-компресорних труб ультразвуком безпосередньо в свердловині»*

**Виконав:** студент 4 курсу групи НІТ2022-2 спеціальності 185 – Нафтогазова інженерія та технології, освітньої програми «Нафтогазова інженерія та технології»

**Рисований Вадим Олександрович**   
(підпис)

**Керівник: доц. Ткаченко Р.Б.** 

**Рецензент доц. Ромашко О.В.** 

(прізвище та ініціали)

м. Харків – 2026 р.

**Харківський національний університет міського господарства ім. О.М. Бекетова**  
**Навчально-науковий інститут енергетичної, інформаційної та транспортної інфраструктури**  
Кафедра: *Нафтогазової інженерії і технологій*  
Освітньо-кваліфікаційний рівень: перший (*бакалаврський*)  
Спеціальність *185 – Нафтогазова інженерія та технології*  
Освітня програма: *«Нафтогазова інженерія та технології»*

**ЗАТВЕРДЖУЮ:**

В.о. зав. кафедрою Нафтогазової  
інженерії і технологій

Ткаченко Р. Б.



« 25 » травня 2026 р.

### **З А В Д А Н Н Я**

**на кваліфікаційну роботу бакалавра Рисованого Вадима Олександровича**

**ема роботи:** «Очищення насосно-компресорних труб ультразвуком безпосередньо в свердловині».

керівник роботи: доц. Ткаченко Р.Б ,

затверджені наказом по університету від « 22 » травня 2026 р. №440-03.

трок подання студентом закінченої роботи 15 червня 2026 р.

Вихідні дані до роботи:

ідомості про умови формування відкладень (парафінів, смол, солей) у колоні НКТ та оцінити недоліки існуючих методів їх видалення;  
лан розрахунків часу ультразвукової обробки та методика розрахунку радіусу ефективної дії кавітації;  
дані щодо впливу ультразвукового обладнання на навколишнє середовище;  
исновки з щодо розробки розділу охорони праці.

міст розрахунково-пояснювальної записки (перелік підлягаючих розробці питань):

Огляд механічних, теплових та хімічних методів обробки

Переваги та обмеження ультразвукового впливу

Аналіз причин неефективності традиційних методів на конкретних типах родовищ

Фізика процесу: кавітація, акустичні потоки та звуковий тиск

Механізм руйнування структури парафінів та солей під дією ультразвуку

Вплив акустичного поля на в'язкісно-температурні характеристики нафти

Визначення оптимальної частоти та інтенсивності випромінювання

Опис послідовності операцій (спуск випромінювача на геофізичному кабелі, робота в статичному режимі або при циркуляції).





Розрахунок часу, необхідного для повного очищення інтервалу відкладень

Охорона праці та техніка безпеки.

ерелік графічного матеріалу (з точним визначенням обов'язкових креслень):

Модель енергопостачання газосховища з використанням ВДЕ.

Консультанти розділів роботи:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Охорона праці і безпека в надзвичайних ситуаціях	проф. Абракітов В.Е.		
Нормоконтроль	доц. Ромашко О.В.		

ата видачі завдання 21 травня 2026 р.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Найменування етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
	Одержання завдання на проектування		
	Аналіз проектних матеріалів і вихідних даних		
	Огляд механічних, теплових та хімічних методів		
	Переваги та обмеження ультразвукового впливу		
	Аналіз причин неефективності традиційних методів на конкретних типах родовищ.		
	Фізика процесу: кавітація, акустичні потоки та звуковий тиск		
	Механізм руйнування структури парафінів та солей під дією ультразвуку.		
	Вплив акустичного поля на в'язкісно-температурні характеристики нафти		
	Визначення оптимальної частоти та інтенсивності випромінювання		
	Опис послідовності операцій (спуск випромінювача на геофізичному кабелі, робота в статичному режимі або при циркуляції).		
	Розрахунок часу, необхідного для повного очищення інтервалу відкладень.		
	Визначення радіусу ефективної дії випромінювача.		
	Підсумок отриманих результатів та рекомендації щодо впровадження технології.		
	Розробка заходів по охороні праці		
	Попередній захист кваліфікаційної роботи		
	Рецензування кваліфікаційної роботи	15.06 – 16.06.2026	
	<b>Здача закінченої кваліфікаційної роботи в ДЕК</b>		

Студент \_\_\_\_\_  \_\_\_\_\_ (ст. Рисований В.О.)

Керівник роботи \_\_\_\_\_  \_\_\_\_\_ (Ткаченко Р.Б.)  
(підпис)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка містить 60 стор., 2 табл., 14 рис.

Ключові слова: ультразвукове очищення, АСПВ (асфальто-смолисті та парафінові відкладення), кавітація в нафтовому середовищі, інтенсифікація видобутку, безпідйомне очищення НКТ, акустичний вплив на ПЗП..

**Тема дослідження** - Очищення насосно-компресорних труб ультразвуком безпосередньо в свердловині.

**Мета дослідження** – Обґрунтування та розробка ефективної технології ультразвукового очищення насосно-компресорних труб від відкладень без їх підйому на поверхню для відновлення продуктивності нафтових свердловин.

**Завдання дослідження** – прийняття рішення щодо раціонального використання ультразвукового обладнання для очищення насосно-компресорних труб у свердловинних умовах.

**Об’єкт дослідження:** Процес формування та видалення асфальто-смолистих і парафінових відкладень (АСПВ) на внутрішніх поверхнях насосно-компресорних труб у свердловині.

**Предмет дослідження:** Технологічні режими та параметри ультразвукового впливу (частота, потужність, час експозиції), що забезпечують ефективне очищення НКТ у свердловинних умовах.

Розроблена технологія дозволяє проводити очищення підземного обладнання без проведення дороговартісних спуско-підймальних операцій (СПО), що знижує собівартість видобутку нафти.

Виконано розділ з охорони праці, розглянуто заходи з протипожежної безпеки, попередження травматизму при роботі на висоті та роботою з електроінструментом.

Вступ.....	6
Аналіз сучасних методів боротьби з відкладеннями в НКТ .....	7
Огляд механічних, теплових та хімічних методів .....	7
Переваги та обмеження ультразвукового впливу .....	9
Теоретичні основи ультразвукового впливу на відкладення .....	14
Явище ультразвукової кавітації .....	14
Акустичні течії та мікропотоки .....	15
Вплив на в'язкість та структуру АСПВ .....	16
Розробка технологічного процесу очищення НКТ .....	16
Вибір та обґрунтування режимів обробки.....	22
Схема проведення технологічної операції .....	29
Вибір технологічного середовища .....	34
4 Розрахункова частина та оцінка ефективності .....	34
Розрахунок часу ультразвукової обробки інтервалу НКТ .....	35
Визначення радіуса ефективної дії кавітації .....	39
Розрахунок економічної вигоди .....	41
Охорона праці при проведенні ультразвукового очищення НКТ .....	41
5.1 Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів .....	43
Вимоги до електробезпеки .....	47
Забезпечення вибухобезпеки .....	47
5.4 Захист від акустичного впливу .....	59
5.4 Безпека при спуско-підймальних операціях .....	59
Висновки.....	60
Список використаних джерел.....	60

## ВСТУП

**Актуальність теми.** На сучасному етапі розвитку нафтогазової галузі більшість родовищ України перебувають на пізній стадії розробки, що характеризується ускладненням умов експлуатації свердловин. Однією з головних проблем, що призводить до стрімкого зниження дебітів та збільшення кількості ремонтних робіт, є інтенсивне утворення асфальто-смолистих та парафінових відкладень (АСПВ), а також солей на стінках насосно-компресорних труб (НКТ).

Традиційні методи боротьби з відкладеннями, такі як механічне шкребкування або термічні та хімічні промивки, мають суттєві недоліки: високу вартість реагентів, ризик пошкодження обладнання та необхідність зупинки видобутку. Крім того, більшість з них потребують залучення бригад капітального ремонту свердловин (КРС) для підйому НКТ на поверхню.

Саме тому розробка та впровадження **бесподійомних технологій**, заснованих на фізичних методах впливу, зокрема **ультразвуковому очищенні**, є надзвичайно актуальним завданням. Використання енергії ультразвукової кавітації дозволяє руйнувати відкладення безпосередньо в свердловині, що значно скорочує витрати часу та коштів, а також є екологічно безпечнішою альтернативою хімічним методам.

**Методи дослідження:** Для вирішення поставлених завдань у роботі використано комплексний підхід, що включає аналіз науково-технічної літератури, теоретичні розрахунки параметрів акустичного поля та моделювання технологічного циклу очищення свердловини.

Важливо, що ультразвук та обладнання за допомогою якого відбувається проце ультразвукового очищення насосно-компресорних труб є абсолютно безпечних для довкілля та не забруднює пласт хімікатами, що є беззаперечною перевагою.

# АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ БОРОТЬБИ З ВІДКЛАДЕННЯМИ В НКТ

## Огляд механічних, теплових та хімічних методів

Основним завданням при експлуатації свердловин є запобігання або видалення відкладень (парафінів, смол, солей), що звужують прохідний переріз труб. На сьогодні у нафтогазовій практиці виділяють три основні групи методів.

### **Механічні методи.**

Це найбільш традиційний спосіб видалення відкладень парафіну та інших забруднень із насосно-компресорних труб, по перше через відносну простоту методу в його реалізації, низької вартості обладнання та не високої кваліфікації робітників, що виконують дану процедуру.

Принциповою складовою методу є використання спеціальних шкребків (дискових, ножових, ланцюгових та інших), які опускаються у свердловину на дроті або штангах і зрізають шар парафіну зі стінок насосно-компресорних труб.

Проте, попри всю простоту методу є достатньо серйозні недоліки до яких треба віднести:

ризик обриву дроту або кріплення та виникнення небезпечної аварійної ситуації («політ» інструменту);

імовірність очищення труб складної конфігурації через попередньо вказаний ризик а також при сильному викривленні стовбура дана процедура унеможлиблюється;

видке повторне утворення відкладень через появу мікроподряпин на стінках труб, які стають центрами кристалізації парафіну в подальшому використанні насосно-компресорних труб за призначенням.

### **Теплові (термічні) методи.**

Дані методи базуються на здатності парафінів плавитися при підвищенні температури безпосередньо на них.

В принцип дії покладено промивка свердловини гарячою нафтою, гарячою водою або використання гострої пари, які й підвищують температуру до того значення, коли парафіни, смоли та інші зайві утворення, що зашкоджують

нормальній роботі насосно-компресорних труб. Також можливе застосування електронагрівачів, що спускаються в зону відкладень, які треба видалити.

Серед переваг даного методу можна назвати достатньо високу швидкість видалення великих масивів асфальтосмолпарафінових відкладень (АСПВ).

Звісно є і недоліки методу, до яких треба віднести:

достатньо високі витрати енергії для нагрівання теплоносія до температури плавлення відкладень на НКТ;

ризик «запарафінювання» нижніх інтервалів або привибійної зони, якщо розплавлений парафін охолоне раніше, ніж буде винесений на поверхню, що найбільш вірогідно при невеликій температурі повітря під час проведення робіт та не достатньо великі температурі теплоносія;

необхідність застосування спеціальної техніки – промислові парові установки, що потребують високої кваліфікації персоналу, задіяного для реалізації очищення НКТ.

#### **Хімічні методи.**

Сутність методу полягає у використанні хімічних сполуки, реагентів, які розчиняють або дезорієнтують молекули відкладень.

Принципом дії є закачування в насосно-компресорні труби розчинників (ароматичні вуглеводні, бензол, дизельне паливо) або інгібіторів, які запобігають прилипанню парафіну до металу.

Переваги: Висока ефективність при правильному підборі реагенту, можливість дистанційної обробки.

Недоліки:

Висока вартість хімічних речовин.

Токсичність та негативний вплив на навколишнє середовище.

Необхідність лабораторних досліджень для кожної конкретної свердловини, оскільки універсального розчинника не існує.

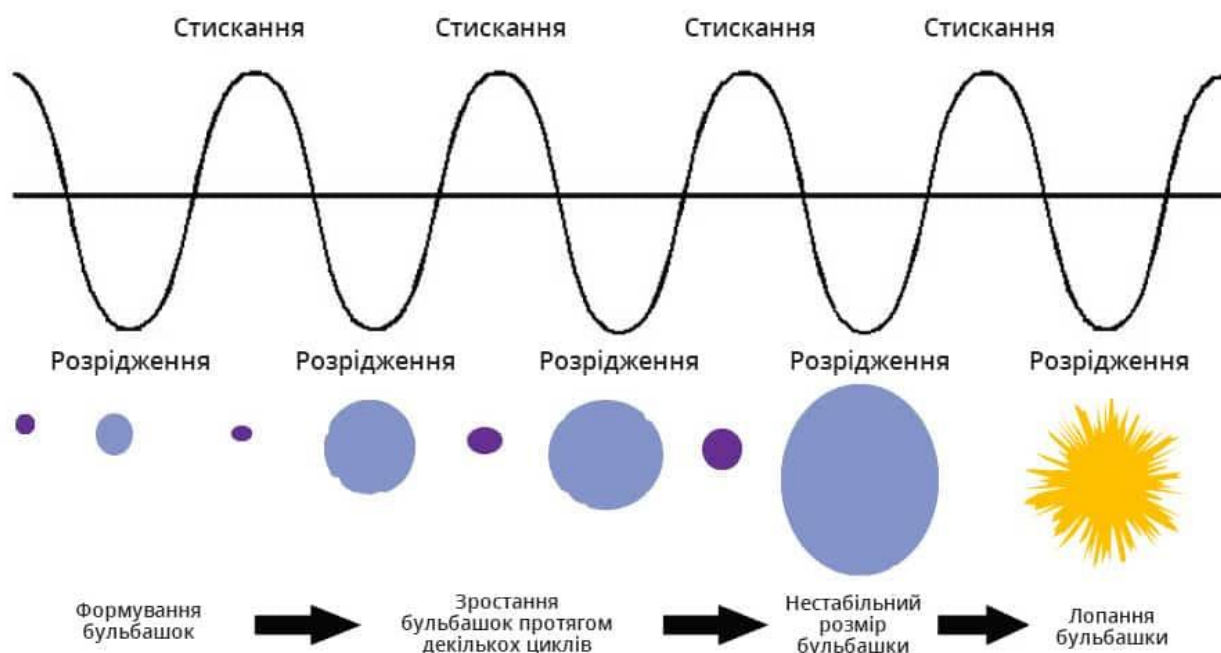
Хоча перелічені методи є освоєними, вони або занадто дорогі (хімія), або енергоємні (тепло), або технологічно ризиковані (механіка). Це обумовлює необхідність впровадження альтернативних фізичних методів, зокрема

**ультразвукового впливу**, який поєднує мобільність механічних методів та ефективність хімічних без їхніх головних недоліків.

## ПЕРЕВАГИ ТА ОБМЕЖЕННЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО МЕТОДУ ОЧИЩЕННЯ

Ультразвуковий (акустичний) метод очищення насосно-компресорних труб належить до фізичних способів інтенсифікації роботи свердловин. Він базується на передачі пружних коливань високої частоти (від 18 до 44 кГц) безпосередньо в зону відкладень забруднення.

### Ультразвукова кавітація



Переваги методу:

**Висока енергоефективність:** Енергія спрямовується безпосередньо на руйнування зв'язків між відкладеннями та стінкою труби, що потребує менше затрат порівняно з прогріванням усієї колони НКТ.

**Безпідйомність:** Очищення проводиться без вилучення підземного обладнання на поверхню, що економить час (не потрібна бригада капітального ремонту свердловини КРС).

**Екологічність:** Метод дозволяє відмовитися від використання токсичних розчинників або значно зменшити їх концентрацію. Точніше кажучи можливе використання методу взагалі без будь яких хімічних реактивів, відповідно і без негативного впливу на довкілля. В разі використання ультразвукової очистки разом із додаванням хімічно активних речовин, їх ефективність збільшується в певних випадках до десяти разів.

**Ефект «полірування»:** Ультразвук не лише руйнує парафінову кірку, а й створює ефект мікроочищення поверхні металу, що уповільнює повторне випадання осадів.

**Синергія:** Можливість поєднання з іншими методами (наприклад, подача розчинника під дією ультразвуку прискорює процес у 5–10 разів).

**Обмеження та недоліки:**

**Радіус дії:** Ефективна зона кавітаційного впливу обмежена (зазвичай від кількох десятків сантиметрів до кількох метрів від випромінювача), що вимагає переміщення приладу вздовж колони НКТ.

**Вплив тиску:** Зі збільшенням гідростатичного тиску в глибоких свердловинах інтенсивність кавітації може знижуватися, що потребує збільшення потужності обладнання.

**Вимоги до енергоживлення:** Необхідність використання спеціального броньованого геофізичного кабелю для передачі потужного сигналу на велику глибину.

**Складність обладнання:** Свердловинний випромінювач повинен працювати в умовах високих температур (до 100-120°C) та агресивного середовища.

Аналіз показав, що попри певні технічні обмеження, ультразвуковий метод є найбільш перспективним для автоматизації процесу очищення та зниження собівартості обслуговування свердловин. Його впровадження дозволяє перейти від ліквідації наслідків (зупинка свердловини через забиті труби) до оперативного контролю стану НКТ.

Ультразвук — це не просто «тряска», а складний фізико-хімічний процес.

## РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВПЛИВУ НА ВІДКЛАДЕННЯ

В основі ультразвукового очищення НКТ лежить використання енергії пружних хвиль високої частоти, які при поширенні в рідкому середовищі (нафта, вода, розчинник) викликають специфічні ефекти.

### 2.1. Явище ультразвукової кавітації

Кавітація — це головний «робочий інструмент» ультразвуку. Це процес утворення, росту та подальшого швидкого схлопування (імплзії) мікроскопічних бульбашок газу або пари в рідині під дією змінної акустичної хвилі.

Механізм дії: У фазі розтягнення хвилі в рідині утворюються розриви (бульбашки). У фазі стиснення ці бульбашки миттєво схлопуються.

Локальні параметри: У момент схлопування бульбашки виникають мікроскопічні зони з екстремальними умовами: тиск до 100-500 МПа та температура до декількох тисяч градусів.

Результат для НКТ: Оскільки бульбашки найлегше утворюються на межі розподілу фаз (стінка труби / парафін), мікрровибухи спрямовані саме на відкладення. Вони буквально «відбивають» шматочки парафіну від металу, подрібнюючи їх до стану емульсії.

Для теоретичного розділу вашої роботи явище ультразвукової кавітації слід описати як основний деструктивний фактор, що руйнує структуру АПВ (асфальтобетонопарафінових відкладень).

Ось структурований опис цього явища:

Фізична природа кавітації

Ультразвукова кавітація — це процес утворення, пульсації та різкого зачинення (схлопування) мікроскопічних каверн (пухирців) у рідині під дією змінних акустичних напружень.

У нафтовому середовищі всередині НКТ процес проходить через три фази:

Фаза розтягування (утворення): У напівперіод розрідження (від'ємний акустичний тиск) у нафті виникають розриви. Центрами їх утворення є «зародки» — мікропухирці газу або дрібні частинки механічних домішок.

Фаза росту: Протягом кількох циклів коливань пухирець поглинає газ, що дифундує з оточуючої нафти, і збільшується в розмірах.

Фаза стиснення (колапс): У напівперіод стиснення пухирець миттєво схлопується. Цей процес відбувається настільки швидко (мікросекунди), що енергія концентрується в надмалому об'ємі.

Основні фактори впливу на парафін

При схлопуванні кавітаційного пухирця виникають екстремальні фізичні умови:

Локальний тиск: У центрі схлопування виникають ударні хвилі з тиском до 100–1000 МПа (тисячі атмосфер). Ці мікроудари буквально «відбивають» шматочки парафіну від стінки НКТ.

Локальна температура: Усередині пухирця температура може сягати 2000–5000 К. Хоча об'єм прогріву мізерний, цього достатньо для термічної деструкції довгих ланцюгів вуглеводнів.

Кумулятивні струмені: Якщо пухирець схлопується поблизу поверхні труби, він перетворюється на спрямований мікрострумінь рідини, що вдаряє в парафін зі швидкістю понад 100 м/с.

Поріг кавітації для нафтогазових середовищ

Для того, щоб процес очищення розпочався, необхідно подолати поріг кавітації — мінімальну інтенсивність ультразвуку, при якій починаються масові вибухи пухирців.

Для дегазованої нафти цей поріг становить приблизно 0,5–1,0 Вт/см<sup>2</sup>.

Для високов'язкої нафти з парафінами поріг зростає до 1,5–2,5 Вт/см<sup>2</sup>.

Саме тому ми раніше розраховували генератор на інтенсивність 4 Вт/см<sup>2</sup> — це забезпечує стійку «розвинену кавітацію», яка гарантовано руйнує відкладення.

#### Роль кавітації в диспергуванні

Важливим наслідком кавітації є диспергування парафіну. Замість того, щоб відпадати великими шматками (які можуть створити пробку вище по трубі), парафін перетворюється на дрібнодисперсну емульсію. У такому стані він легко виноситься потоком свердловинної рідини на поверхню.

Кавітація в нафті протікає менш інтенсивно, ніж у воді (через вищу в'язкість), тому підвищення потужності генератора для нафтогазової галузі є технічно обґрунтованою необхідністю.

#### Вплив глибинного тиску на кавітацію

У свердловинних умовах на процес очищення НКТ впливає зовнішній тиск стовпа рідини ( $P_{hyd}$ ).

#### Зміщення порогу кавітації:

Для того, щоб у нафті утворився кавітаційний пухирець, акустичний тиск

$$P_{ac} > P_{hyd} + P_{str}$$

Де  $P_{str}$  — міцність рідини на розрив.

**Висновок:** Чим глибше знаходиться випромінювач, тим більшу амплітуду (і потужність генератора) потрібно подавати, щоб «розірвати» рідину та створити кавітацію.

#### Енергія схлопування пухирців:

Хоча на глибині важче створити пухирець, його схлопування відбувається набагато інтенсивніше. Зовнішній гідростатичний тиск діє як «пружина», яка сильніше стискає каверну.

На невеликій глибині: кавітація м'яка, багато пухирців, але їхня ударна сила низька.

На великій глибині: кавітаційних пухирців менше, але кожен їхній вибух має колосальну руйнівну силу, що ефективніше для видалення застарілих, твердих парафінів.

Критична глибина:

Існує межа (зазвичай це тиск понад 10–15 МПа, що відповідає глибині 1200–1500 м), при якій кавітація може повністю припинитися, якщо потужність генератора недостатня. Для роботи на більших глибинах у дипломному проекті рекомендується:

Використовувати фокусуючі випромінювачі.

Знижувати частоту до нижньої межі діапазону (18 кГц), оскільки низькочастотна кавітація краще витримує зовнішній тиск.

Формула для розрахунку амплітуди тиску з урахуванням глибини:

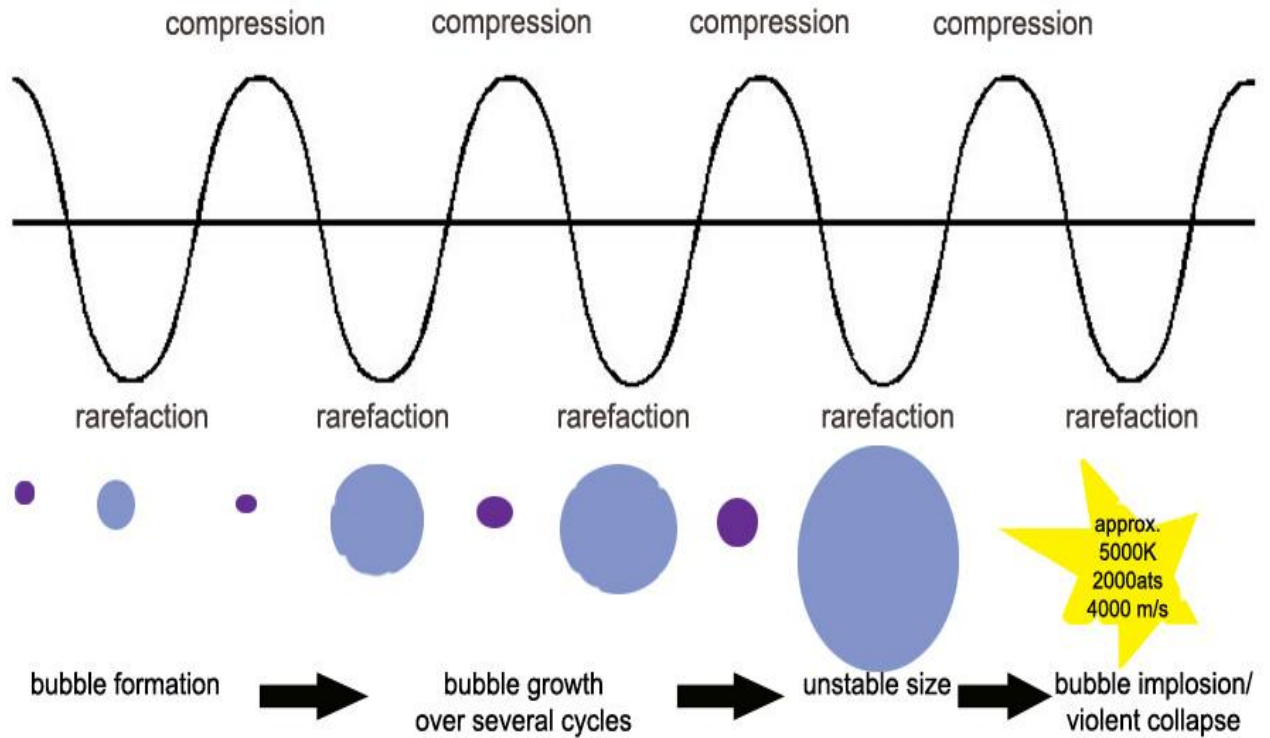
Для успішного очищення амплітуда звукового тиску повинна задовольняти умову:

$$P_m \approx (1,2 \dots 1,5) \cdot P_{hyd}$$

Якщо на глибині встановлення пристрою тиск становить 5 МПа, то випромінювач має створювати амплітуду тиску не менше 6–7,5 МПа.

Для компенсації гідростатичного тиску стовпа рідини в НКТ та забезпечення сталої кавітації, система автоматичного підстроювання частоти (АПЧ) генератора повинна підтримувати максимальну амплітуду струму на п'єзовипромінювачах незалежно від глибини занурення.

## Ultrasonic Cavitation



Hielscher Ultrasonics - [www.hielscher.com](http://www.hielscher.com)

Рис.1 Ультразвукова кавітація створює дуже інтенсивні сили, які сприяють процесам кристалізації та осадження

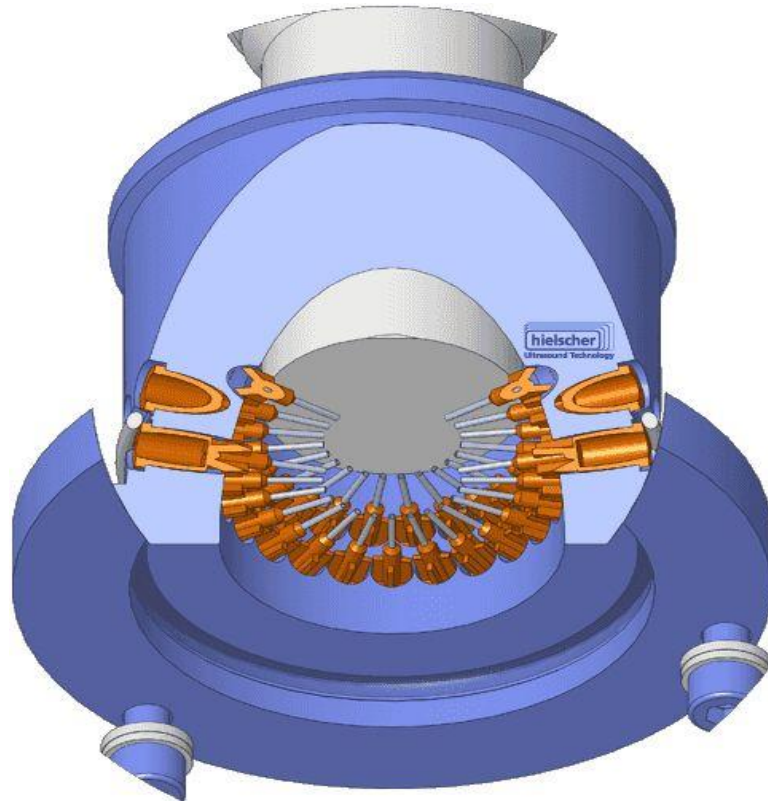


Рис. 2 Багатофазний кавітатор для посилених процесів кристалізації

## 2.2. Акустичні течії та мікропотоки

Окрім кавітації, ультразвук створює інтенсивний рух рідини поблизу випромінювача:

Виникають потужні мікропотоки, які прискорюють доставку свіжої нафти або розчинника до поверхні відкладень.

Це значно пришвидшує процес дифузії, якщо ви використовуєте хімічні реагенти (парафін розчиняється в рази швидше).

Акустичні течії та мікропотоки — це стійкі, спрямовані рухи рідини або газу, що виникають під впливом інтенсивних звукових хвиль. Вони є невіддільною частиною нелінійної акустики та мають важливе значення у фізиці, медицині, стоматології та промисловості.

Акустичні течії (макрорівень): Створюють постійний рух миючого розчину вздовж внутрішньої стінки НКТ. Це допомагає не лише доставляти свіжі порції

хімічних реагентів до місця забруднення, а й фізично «змивати» розм'якшені шари парафіну та іржі.

Мікропотоки (мікрорівень): Виникають поблизу кавітаційних бульбашок. Завдяки високим градієнтам швидкості вони створюють потужні сили зсуву, які відривають частинки забруднень від стінки труби, навіть якщо вони знаходяться у важкодоступних місцях (тріщинах або порах).

При очищенні насосно-компресорних труб (НКТ) від асфальто-смолистих та парафінових відкладень (АСПО), акустичні течії та мікропотоки відіграють роль «динамічної щітки», яка працює на мікрорівні.

Ось як ці фізичні явища допомагають повернути труби в експлуатацію:

Механічна дія на відкладення

Акустичні течії (макрорівень): Створюють постійний рух миючого розчину вздовж внутрішньої стінки НКТ. Це допомагає не лише доставляти свіжі порції хімічних реагентів до місця забруднення, а й фізично «змивати» розм'якшені шари парафіну та іржі.

Мікропотоки (мікрорівень): Виникають поблизу кавітаційних бульбашок. Завдяки високим градієнтам швидкості вони створюють потужні сили зсуву, які відривають частинки забруднень від стінки труби, навіть якщо вони знаходяться у важкодоступних місцях (тріщинах або порах).

Інтенсифікація розчинення

Руйнування прикордонного шару: Біля стінок НКТ зазвичай утворюється нерухомий шар рідини, який уповільнює очищення. Акустичні мікропотоки турбулізують цей шар, різко прискорюючи дифузію реагентів до парафінових відкладень.

Емульгація: Під дією мікропотоків нафтові та смолисті компоненти швидше переходять у стан емульсії, що запобігає їх повторному осадженню на чисту поверхню металу.

Також слід додати до переваг для НКТ

Очищення без розбирання: Ультразвукові технології (наприклад, накладні випромінювачі) дозволяють використовувати ці ефекти для очищення трубопроводів без їх демонтажу або зупинки процесів.

Захист металу: На відміну від механічного скребкування, акустичні течії діють м'яко на сам метал, видаляючи лише сторонні нашарування та іржу

### **2.3. Вплив на в'язкість та структуру АСПВ**

Ультразвукові коливання впливають на нафту на молекулярному рівні:

Руйнування кристалічної решітки: Парафіни мають кристалічну структуру. Ультразвук розбиває великі кристали на дрібні, перетворюючи твердий осад на суспензію, яка легко виноситься потоком рідини на поверхню.

Зниження в'язкості: Під дією акустичного поля в'язкість нафти в зоні обробки тимчасово знижується. Це полегшує запуск свердловини після очищення.

Дегазація: Ультразвук сприяє виділенню розчиненого газу, що створює додатковий турбулентний ефект, який допомагає вимивати залишки бруду.

Ефективність очищення досягається за рахунок поєднання механічного руйнування (кавітація) та фізико-хімічної активації середовища. Це дозволяє видаляти навіть застарілі та тверді відкладення солей та смол, з якими не справляються звичайні промивки.

Ультразвукова обробка асфальтобетонних сумішей (АСПВ) та бітумних в'язучих є ефективним методом інтенсифікації технологічних процесів, що впливає як на реологічні властивості, так і на внутрішню структуру матеріалу.

#### **Вплив на в'язкість**

Ультразвукові коливання викликають значне зниження в'язкості бітуму та сумішей, що обумовлено двома основними факторами:

Механічна деструкція та кавітація: Під дією високочастотних коливань у рідкому середовищі виникають кавітаційні бульбашки. Їх схлопування вивільняє колосальну енергію, яка розриває довгі молекулярні ланцюги та агрегати

асфальтенів. Це призводить до переходу частини важких компонентів у легші фракції, що робить матеріал більш текучим.

Тепловий ефект: Поглинання акустичної енергії супроводжується локальним підвищенням температури. Разом із механічним розрідженням це дозволяє знизити температуру приготування та укладання суміші (технологія "теплих" сумішей), що зменшує енерговитрати та запобігає передчасному старінню бітуму.

Вплив на структуру

Вплив ультразвуку змінює матеріал на мікро- та макрорівнях:

Гомогенізація та диспергування: Ультразвук забезпечує рівномірний розподіл добавок (полімерів, гумової крихти, пластику) у бітумній матриці. Це критично важливо для модифікованих в'язучих, де традиційне змішування часто не дає стабільної однорідності.

Зміна хімічного складу: Дослідження показують, що після обробки в асфальті зменшується вміст важких компонентів і збільшується частка легких. Також ультразвук стимулює утворення вільних радикалів, які можуть вступати в реакцію з полімерними модифікаторами (наприклад, SBS), зміцнюючи зв'язки між ними та бітумом.

Покращення адгезії: За рахунок зниження поверхневого натягу та інтенсивного перемішування на межі фаз, бітум краще змочує мінеральний наповнювач, що підвищує зчеплення та водостійкість майбутнього дорожнього покриття.

Параметри ефективності

Найбільша ефективність спостерігається при частотах близько 20–40 кГц. Оптимальний режим обробки дозволяє не лише покращити початкову рухливість суміші, але й підвищити її колієстійкість та стійкість до втоми після застигання завдяки кращій структурній організації матеріалу.

## РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ОЧИЩЕННЯ НКТ

У цьому розділі ми описуємо послідовність дій на свердловині та технічні параметри, які забезпечать успіх операції.

### 3.1. Вибір та обґрунтування режимів обробки

Для ефективного очищення потрібно правильно підібрати характеристики ультразвукового поля:

Робоча частота: Оптимальним діапазоном для нафтових середовищ є 18–25 кГц. Нижчі частоти забезпечують глибшу кавітацію, що краще руйнує тверді відкладення та солі.

Інтенсивність випромінювання: Має бути вищою за поріг кавітації для нафти (зазвичай від 2 до 5 Вт/см<sup>2</sup>).

Час експозиції: Залежить від товщини шару АСПВ. В середньому швидкість проходження випромінювача вздовж труби становить 0,5–2 метри на хвилину.

Комплект ультразвукового процесору UP400St (Hielscher, Німеччина

№ п/п	Назва	Од.	К-сть
1	Гомогенізатор ультразвуковий UP400St настільний, 400 W, 24 кГц, сенсорний екран, титановий ріг 18 мм (амплітуда 40 мкм), захист від сухого запуску, включає: SD-карта, термодатчик, фіксатор для стенду, мережевий кабель	шт	1
2	Штатив ST1-16 для встановлення ультразвукового генератора UP400St	шт	1
<i>Акcesуари (рекомендовані)</i>			
3	Сонотрод S24d22D, Ø22 мм (S=430 мм <sup>2</sup> ), титановий сплав, L=100 мм, коеф. амплітуд 1:1,18, для V=100-2000 мл (вода)	шт	1
4	Сонотрод S24d14D, Ø 14 мм (S=173 мм <sup>2</sup> ), титановий сплав, довжина 100 мм, коеф. амплітуд 1:2,55, для об'ємів 50-1000 мл (вода)	шт	1
5	Каскатрод S24d22L2D (сонотрод), Ø22 мм (S=400 мм <sup>2</sup> ), титановий сплав, L=204 мм, коеф. амплітуд 1:0,9, для V=100-4000 мл (вода)	шт	1
6	Проточна комірка FC22K, розбірна, з водяною сорочкою, 34 см <sup>3</sup> , тиск до 5 атм, з ущільненням для сонотроду 22 мм, з затиском і патрубками для води	шт	1
7	ST1-Clamp Зажим для штативу ST1-16, для проточної комірки	шт	1

## **Ультразвуковий процесор високої потужності UP400St**

Надпотужний ультразвуковий процесор UP400St розширює лінійку цифрових пристроїв Hielscher до потужності 400 Вт (24 кГц). Новітня розробка німецького виробника, UP400St отримала оновлення інтерфейсу для більшої зручності і відтворюваності. Висока потужність ультразвуку і витривалість роблять цей процесор ідеальним для використання в вибагливих умовах. UP400St, з кольоровим сенсорним екраном для легкого керування, інтегрованими світлодіодами для освітлення зразку, під'єднаним датчиком температури, вбудованою SD-картою для автоматичної реєстрації даних, а також багатьма іншими функціями, переконує користувачів своїми зручністю та надійністю. UP400St ідеально підходить для ефективною та точною ультразвуковою обробки, як великих та середніх дослідних зразків, так і пілотних і дрібно-партійних промислових виробництв.



Рис. 3 Процесор UP400S



Рис. 4 Процесор UP400S

Як наш найпотужніший лабораторний пристрій, UP400St підходить для виконання різноманітних завдань, серед яких гомогенізація, емульсифікація, диспергування, деагломерація та вологе подрібнення (зменшення розміру частинок), руйнування та дезінтеграція клітин, екстракція, дегазація, а також сонохімічні процеси.

Популярним використанням приладу є застосування в процесах рослинної екстракції. Це дає досліднику ряд значних переваг:

- багатократне прискорення процесів екстракції: дозволяє скоротити час процесу з годин до хвилин;
- підвищення виходу цільового продукту за рахунок інтенсифікації процесів масообміну та руйнування матриксу;
- збільшення виходу лабільних речовин за рахунок скорочення часу обробки і інактивації руйнівних ферментів;
- Розробка промислової технології для подальшого масштабування у виробництво.

Такі особливості роблять можливою екстракцію деяких речовин, виділення яких в звичайних умовах є неможливим або неефективним.

Паралельно з цим зменшуються витрати розчинника і енергії на одиницю кінцевого продукту.

З титановими сонотродами діаметром від 2 до 40 мм, пристрій придатний для ультразвукової обробки зразків об'ємом від 5 до 4000 мл. У поєднанні з проточною кюветою, ультразвуком можна обробити від 10-50 і більше літрів сировини на годину.

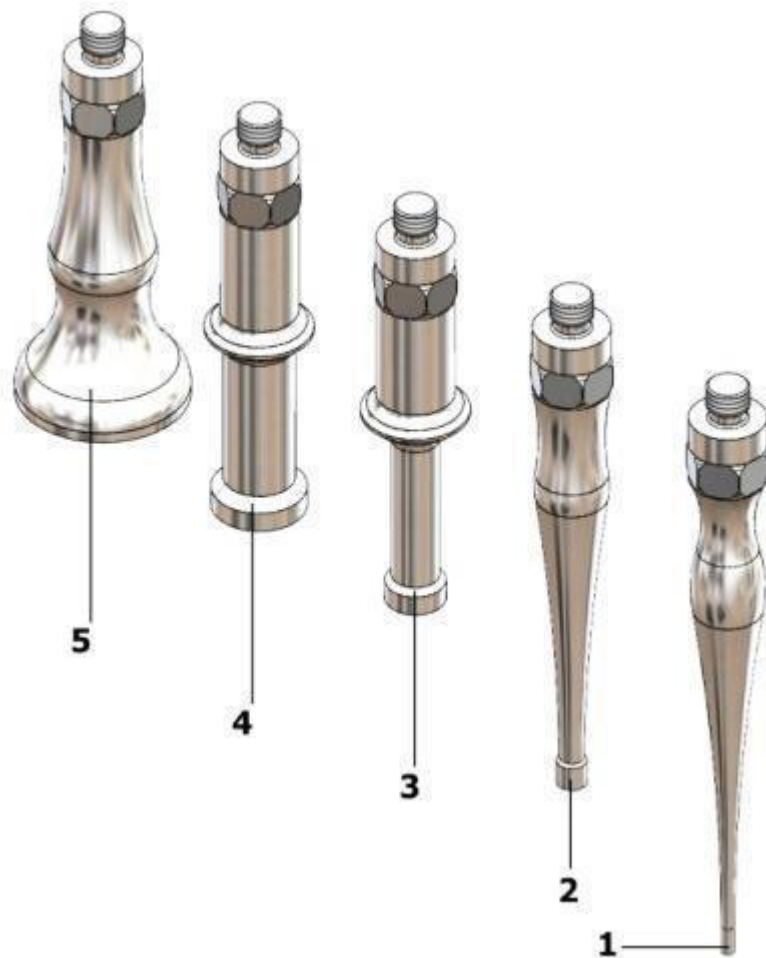


Рис. 5 Титанові сонотроди діаметром від 2 до 40 мм

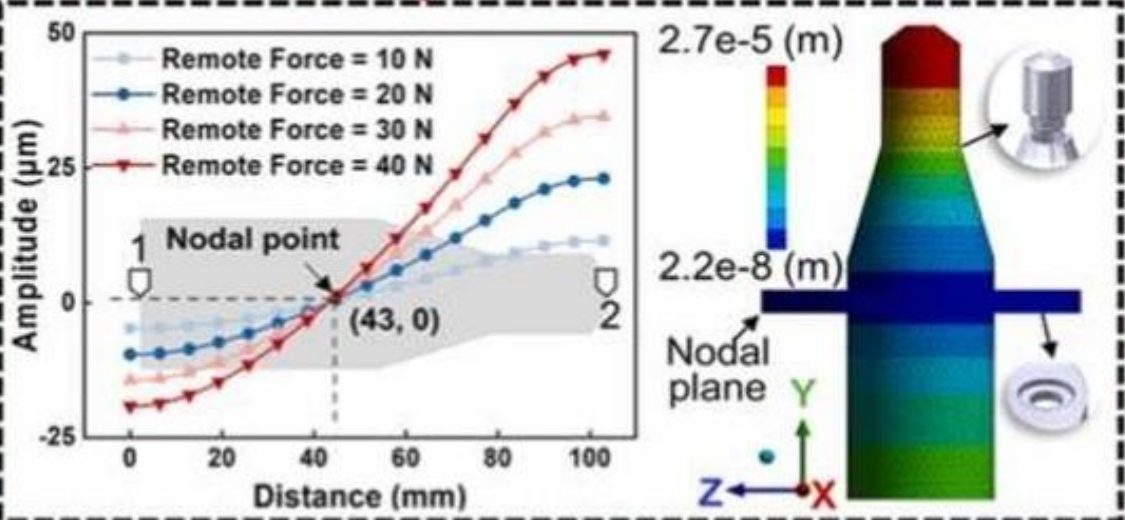
У пробопідготовці UP400St в основному використовується для великих об'ємів. Це найкращий прилад для лабораторної розробки ультразвукових методик, для виробничої оптимізації, а також для виготовлення продукції невеликими партіями. Функції пристрою та різноманітні аксесуари дозволяють застосовувати різні програми та охоплювати дуже широкі конфігурації параметрів.

UP400St приваблює як потужний і надійний ультразвуковий гомогенізатор: він може працювати безперервно, 24 години 7 днів на тиждень, під повним

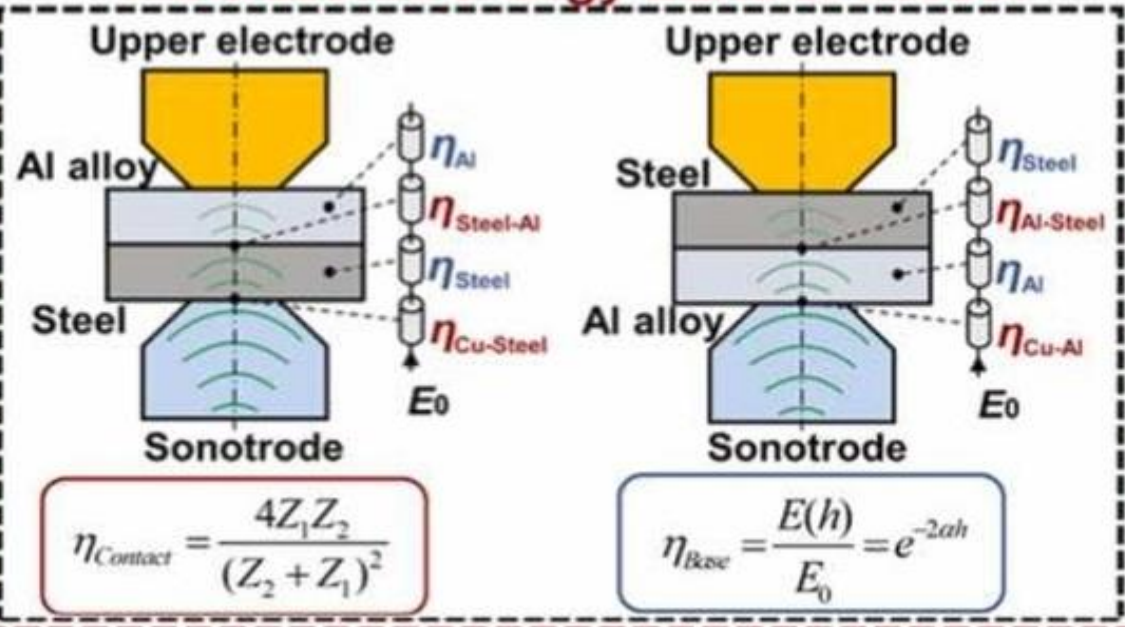
навантаженням і добре підходить для обробки аж до 400 л/год. Як правило, UP400St використовується для ультразвукової обробки об'ємів від 5,0 до 4000 мл.

Завдяки своїй витривалості та здатності працювати 24/7, UP400St можна використовувати для виробництва невеликих партій продукту. Для виробничих процесів ультразвукова обробка в основному використовується в безперервній системі з проточними камерами та сонотродом з ущільненням для реактора проточної камери. У поєднанні з проточною кюветою FC22K матеріал можна обробляти ультразвуком у безперервному проточному режимі, наприклад, зі швидкістю потоку від 20 до 200 мл на хвилину (кінцева продуктивність залежить від методики). В той же час проточна кювета з нержавіючої сталі витримує тиск до 5 бар і оснащена сорочкою охолодження. Завдяки цьому масштабні моделі промислових ультразвукових процесів можуть бути відтворені в найдрібніших деталях.

## ✘ Harmonic response model of sonotrode



## ✘ Ultrasonic energy transfer model



Прилад має автоматичну систему підлаштування частоти, регульовану амплітуду від 20 до 100%, імпульси від 10 до 100%.

Система безпеки захищає від «сухого» вмикання.

Робоча частота гомогенізатора - 24 кГц, ця частота ефективно себе показала в цілому ряді задач, і близька до частот, що використовуються в промислових масштабах.

Прилад може комплектуватись широким спектром аксесуарів для досягнення необхідної мети:

- сонотроди для роботи з відкритими об'ємами діаметром від 2 до 14 мм

- сонотроди, придатні для закритих об'ємів або використання в проточних системах

- унікальний сонотрод, що дозволяє проводити соніфікацію в закритих пробірках типу Еппендорф

- сонотрод-атомайзер

- штативи і столики, що дозволять полегшити тривалу роботу з приладом

- шумозахисна шафа, що зменшить рівень шумового навантаження при тривалій роботі, а також об'єднує всі необхідні тримачі і підставки в єдине готове рішення.



Рис. 3 Каскатрод

Важливою особливістю є надзвичайні можливості для мережевої роботи. UP400St може

бути безпосередньо підключений до локальної мережі, що дозволяє легко і зручно контролювати ультразвукові процеси. В якості DHCP сервера/клієнта, пристрій автоматично отримує IP-адресу, і не потребує встановлення додаткового програмного забезпечення.

Пристроєм можна керувати з використанням будь-якого з популярних браузерів, як напряду з ПК, так і через роутер. В той же час при встановленні SD-картки всі параметри кожного запуску автоматично документуються, в т.ч. тривалість, амплітуда, потужність, загальна і чиста енергія, температура. Файл результатів автоматично зберігається з датою і часом. Все це забезпечує максимальну відтворюваність експерименту.



Рис. 5 Процесор UP400S в неперервному процесі з термостатованою проточною коміркою

### **3.2. Схема проведення технологічної операції**

Технологія реалізується за наступним алгоритмом:

Підготовчі роботи: Зупинка свердловини (якщо очищення не проводиться під час роботи) та шаблонування НКТ для перевірки прохідності.

Спуск обладнання: Ультразвуковий випромінювач (сонотрод) спускається у свердловину на броньованому геофізичному кабелі. На поверхні встановлюється ультразвуковий генератор.

Етап очищення:

Випромінювач опускається до нижньої межі інтервалу відкладень.

Вмикається генератор, і пристрій повільно піднімається вгору.

Важливо: Очищення краще проводити «знизу-вгору», щоб зруйновані частки парафіну виносилися потоком рідини або легше піднімалися вгору при наступному запуску.

Промивка: Після ультразвукової обробки рекомендується провести циркуляційну промивку (можна холодною нафтою), щоб остаточно винести подрібнені частки АСПВ на поверхню.

### **3.3. Вибір технологічного середовища**

Хоча ультразвук працює і в сирій нафті, для максимального ефекту можна використовувати:

Технологічну воду з ПАР (поверхнево-активними речовинами) — вони знижують поверхневий натяг, полегшуючи відрив парафіну.

Легкі розчинники — ультразвук створює емульсію, що дозволяє розчиннику діяти на всю товщину відкладень одночасно.

Обладнання (для опису в цьому розділі):

Вам варто згадати основні вузли установки:

Наземний блок: Ультразвуковий генератор з системою автоматичного підстроювання частоти (АПЧ).

Свердловинний блок: Герметичний корпус, всередині якого розміщені п'єзокерамічні або магнітострикційні перетворювачі та підсилювач амплітуди (бустер).

Схема «Свердловина у розрізі з опущеним випромінювачем».



Рис. 1 Ультразвуковой процессор UIP16000

## РОЗДІЛ 4. РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА ТА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ

### 4.1. Розрахунок часу ультразвукової обробки інтервалу НКТ

Час, необхідний для руйнування шару відкладень, залежить від їхньої товщини та потужності акустичного поля.

Вихідна формула для розрахунку часу (t):

$$t = \frac{V_{\text{відкл}}}{Q_{\text{руйн}}}$$

Де:

- $V_{\text{відкл}}$  — об'єм відкладень на ділянці обробки, м<sup>3</sup>.
- $Q_{\text{руйн}}$  — продуктивність ультразвукового руйнування (залежить від питомої потужності випромінювача), м<sup>3</sup>/год.

Для практичних розрахунків часто використовують швидкість підйому випромінювача (v). Для забезпечення чистої поверхні при потужності випромінювача 2-4 кВт:

$$v \approx \frac{1}{k \cdot \delta}$$

- $\delta$  — товщина шару парафіну (мм).
- $k$  — емпіричний коефіцієнт (для АСПВ середньої твердості  $k \approx 0,5 \dots 1,0$ ).
- *Наприклад:* при товщині парафіну 5 мм швидкість підйому має бути близько 0,2–0,4 м/хв.

## 4.2. Визначення радіуса ефективної дії кавітації

Ультразвук ефективно очищує лише тоді, коли інтенсивність звуку ( $I$ ) вища за поріг кавітації ( $I_{\text{кав}}$ ).

$$I(r) = I_0 \cdot e^{-2\alpha r}$$

Де:

- $I_0$  — інтенсивність на поверхні випромінювача.
- $\alpha$  — коефіцієнт загасання ультразвуку в нафтовому середовищі (залежить від в'язкості).
- $r$  — відстань від випромінювача.

Висновок для НКТ: Оскільки внутрішній діаметр НКТ зазвичай становить 62–82 мм, а випромінювач має діаметр 38–42 мм, відстань до стінки складає всього 10–20 мм. Це ідеально підходить для ультразвуку, оскільки загасання на такій короткій відстані мінімальне.

## 4.3. Розрахунок економічної вигоди (орієнтовно)

Вартість операції ультразвукового очищення ( $C_{\text{уз}}$ ) порівнюється з вартістю капітального ремонту свердловини (КРС) із підйомом труб ( $C_{\text{крс}}$ ).

Економічний ефект ( $E$ ):

$$E = (C_{\text{крс}} + L_{\text{втрати}}) - C_{\text{уз}}$$

$L_{\text{втрати}}$  — збитки від недоотриманої нафти за час простою свердловини під час КРС.

*Результат:* Зазвичай ультразвукове очищення в **3–5 разів дешевше** за традиційний ремонт із підйомом колони.

## Визначення робочих параметрів ультразвуку

Для руйнування відкладень у трубах нафтогазових свердловин зазвичай використовують магнітострикційні перетворювачі з такими базовими характеристиками:

Робоча частота (f): від 18 кГц до 45 кГц.

Амплітуда коливань (A): 20 - 60 мкм.

Інтенсивність УЗ-випромінювання (I): 1 - 5 Вт/см.

2. Розрахунок акустичної потужності (W)

Основна формула розрахунку:

Зв'язок між акустичною потужністю у Ватах (W) та її рівнем у децибелах

$$W = W_0 \cdot 10^{0,1 \cdot L_W}$$

Де:

- **W** – акустична потужність джерела, Вт;
- **W<sub>0</sub>** – порогова (опорна) акустична потужність, що дорівнює **10<sup>-12</sup> Вт**;
- **L<sub>W</sub>** – рівень звукової потужності джерела шуму, дБ (береться з паспорта обладнання – насоса, компресора або двигуна).

Якщо рівень потужності невідомий, але відома інтенсивність звуку або звуковий тиск на певній відстані:

через інтенсивність (I):

$$W = I \cdot S$$

де **S** – площа поверхні, через яку проходить звук (для точкового джерела  $S = 4\pi r^2$ ).

**Через середній рівень звукового тиску (L<sub>p</sub>):**

Спочатку розраховується L<sub>W</sub>:

$$L_W = L_p + 20 \lg(r) + 11$$

(де  $r$  — відстань від джерела), а потім отримана величина підставляється в основну формулу.

Якщо шум від відцентрового насоса становить  $L_W = 105$  дБ:

1.  $W = 10^{-12} \cdot 10^{0,1 \cdot 105}$

2.  $W = 10^{-12} \cdot 10^{10,5} \approx 10^{-12} \cdot 31,6 \cdot 10^9 = 0,0316$  Вт.

Для розрахунку необхідної електричної потужності ультразвукового генератора в нафтогазовій інженерії (наприклад, для очищення свердловин, дегазації нафти або інтенсифікації видобутку) використовується методика, що базується на питомій потужності.

Формула через об'єм середовища

Якщо ультразвук діє на об'єм рідини (нафта, буровий розчин), потужність генератора ( $P_{gen}$ ) розраховується як:

$$P_{gen} = \frac{P_{sp} \cdot V}{\eta}$$

Де:

- $P_{sp}$  — питома акустична потужність (Вт/л або Вт/см<sup>2</sup>). Для нафтогазових середовищ зазвичай становить 2–10 Вт/л для дегазації та до 20–50 Вт/л для руйнування відкладень.
- $V$  — об'єм оброблюваної рідини (л).
- $\eta$  — ККД ультразвукового випромінювача (п'єзокерамічного або магнітострикційного). Зазвичай становить 0.7–0.9.

Розрахунок через інтенсивність (через площу випромінювання):

Якщо використовується занурювальний випромінювач (сонотрод):

$$P_{gen} = \frac{I \cdot S_{rad}}{\eta}$$

Де:

- $I$  — інтенсивність ультразвуку ( $\text{Вт}/\text{см}^2$ ). Для виникнення кавітації в нафті вона має бути не менше  $1.5\text{--}2 \text{ Вт}/\text{см}^2$ .
- $S_{rad}$  — площа випромінювальної поверхні інструменту ( $\text{см}^2$ ).

Для розрахунку потужності ультразвукового генератора для очищення насосно-компресорних труб (НКТ) від асфальтобетонопарафінових відкладень (АПВ) використовується методика, що базується на подоланні сил адгезії парафіну до стінок труби.

Розрахунок необхідної акустичної потужності ( $W_a$ )

Потужність має бути достатньою для створення кавітації у свердловинній рідині, яка руйнує структуру парафіну.

$$W_a = I \cdot S_{rad}$$

- $I$  — інтенсивність ультразвуку. Для руйнування парафінових корків необхідна інтенсивність  $I \approx 2,5 \div 5 \text{ Вт}/\text{см}^2$ .
- $S_{rad}$  — площа випромінювальної поверхні ультразвукового інструмента (випромінювача),  $\text{см}^2$ .

Розрахунок електричної потужності генератора ( $P_{gen}$ )

Генератор повинен забезпечувати акустичну потужність з урахуванням втрат у системі:

$$P_{gen} = \frac{W_a}{\eta_{conv} \cdot \eta_{line}}$$

Де:

- $\eta_{conv}$  — ККД перетворювача (для магнітострикційних — 0,4 ÷ 0,6, для п'єзокерамічних — 0,7 ÷ 0,85).
- $\eta_{line}$  — коефіцієнт втрат у кабелі (важливо для свердловинних умов, зазвичай 0,85 ÷ 0,9 залежно від глибини).

Перевірка за питомою потужністю на одиницю довжини

Для ефективного очищення НКТ на практиці орієнтуються на питому потужність відносно діаметра труби. Для стандартної труби НКТ-73 середня необхідна електрична потужність генератора становить 1,5 – 2,5 кВт.

### **Розрахунок параметрів ультразвукового генератора для очищення НКТ-73**

Вихідні дані:

Тип труби: НКТ-73 (внутрішній діаметр  $d = 62$  мм).

Тип випромінювача: П'єзокерамічний (ПКВ).

Робоча частота:  $f = 20$  кГц (середнє значення діапазону).

Коефіцієнт запасу:  $K_{res} = 1,2$ .

Необхідна інтенсивність для руйнування парафіну:  $I = 4$  Вт/см<sup>2</sup> (середнє значення для АПВ).

### **Розрахунок площі випромінювання ( $S_{rad}$ )**

Припустимо, що використовується циліндричний випромінювач, який опускається всередину НКТ. Площа торцевої (робочої) поверхні випромінювача діаметром  $D = 50$  мм (що вільно проходить у НКТ-73):

$$S_{rad} = \frac{\pi \cdot D^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 5,0^2}{4} \approx 19,6 \text{ см}^2$$

Визначення необхідної акустичної потужності ( $W_a$ )

Це потужність, яку випромінювач має віддати безпосередньо в середовище (нафту/парафін):

$$W_a = I \cdot S_{rad} = 4 \cdot 19,6 = 78,4 \text{ Вт}$$

*Примітка: Для кільцевих випромінювачів або систем, що охоплюють трубу зовні, площа буде значно більшою, а потужність сягатиме 1000–1500 Вт.*

### **Розрахунок електричної потужності генератора ( $P_{gen}$ )**

Враховуємо ККД п'єзокерамічного перетворювача (0,8) та втрати в кабелі

$$P_{gen} = \frac{W_a \cdot K_{res}}{\eta_{conv} \cdot \eta_{line}}$$

$$P_{gen} = \frac{78,4 \cdot 1,2}{0,8 \cdot 0,9} = \frac{94,08}{0,72} \approx 130,6 \text{ Вт}$$

### **Підбір обладнання за сумарною потужністю**

Для ефективної обробки протяжних ділянок НКТ зазвичай використовують блок із декількох ПКВ-випромінювачів (наприклад, 8–10 штук), з'єднаних послідовно. В такому разі загальна потужність генератора складе:

$$P_{total} = P_{gen} \cdot n = 130,6 \cdot 10 \approx 1,3 \text{ кВт}$$

**Висновок:** Для очищення НКТ-73 від парафінових відкладень рекомендується використовувати ультразвуковий генератор з вихідною електричною потужністю не менше 1,5 кВт, що працює в діапазоні частот 18–22 кГц.

## **Розрахунок часу ультразвукового очищення НКТ**

Додаткові вихідні дані:

$\delta$  — товщина шару парафіну (прийmemo для розрахунку середня значення 5 мм або 0,5 см).

$v_{er}$  — швидкість ультразвукової ерозії парафіну. Для частоти 20 кГц та інтенсивності 4 Вт/см<sup>2</sup> у нафтовому середовищі вона становить приблизно 0,2 – 0,5 мм/хв.

$K_{str}$  — коефіцієнт структури парафіну (для щільних старих відкладень

### **Формула розрахунку часу (t):**

Час, необхідний для повного руйнування шару відкладень на певній ділянці:

$$t = \frac{\delta \cdot K_{str}}{v_{er}}$$

Припустимо, ми маємо шар парафіну 5 мм ( $K_{str} = 1,2$ ):

$$t = \frac{5 \cdot 1,2}{0,3} = \frac{6}{0,3} = 20 \text{ хвилин}$$

### **Розрахунок швидкості переміщення випромінювача ( $V_{move}$ ):**

Якщо ви очищуєте трубу методом протягування випромінювача на кабелі, швидкість його руху повинна бути:

$$V_{move} = \frac{L_{act}}{t}$$

Де  $L_{act}$  — довжина зони активної кавітації випромінювача (приблизно 10–15 см).

$$V_{move} = \frac{15 \text{ см}}{20 \text{ хв}} = 0,75 \text{ см/хв} \approx 0,45 \text{ м/год}$$

Слід зазначити, що при роботі ультразвукового обладнання виділяється тепло, яке додатково підігріває нафту, знижуючи її в'язкість і прискорюючи процес очищення в 1,5–2 рази.

Для запобігання перегріву ПКВ-перетворювачів доцільно використовувати імпульсний режим (наприклад, 2 сек робота / 1 сек пауза)

### **Розрахунок амплітуди коливань робочого торця (A)**

Для руйнування твердих парафінів амплітуда має бути вищою за порогову.

Формула:

$$A = \frac{1}{2\pi f} \cdot \sqrt{\frac{2I}{\rho c}}$$

Де:

- $f$  — частота (20 000 Гц).
- $I$  — інтенсивність (40 000 Вт/м<sup>2</sup>, що відповідає 4 Вт/см<sup>2</sup>).
- $\rho$  — щільність нафти (~850 кг/м<sup>3</sup>).
- $c$  — швидкість звуку в нафті (~1300 м/с).

Тоді розрахунок матиме вигляд:

$$A = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 20000} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 40000}{850 \cdot 1300}} \approx 7,96 \cdot 10^{-6} \cdot \sqrt{0,0724} \approx 2,1 \cdot 10^{-6} \text{ м} = \mathbf{2,1 \text{ м}}$$

*Висновок: Отримана амплітуда в 2,1 мкм є достатньою для підтримки сталої кавітації в рідині.*

### **Розрахунок теплової енергії, що виділяється (Q)**

Близько 70-80% акустичної енергії в обмеженому просторі НКТ перетворюється на тепло, що корисно для розплавлення парафіну.

Формула:

$$Q = 0,8 \cdot W_a \cdot t$$

Де:

- $W_a$  — акустична потужність (~80 Вт на один випромінювач).
- $t$  — час роботи (1200 сек або 20 хв).

Тоді розрахунок матиме вигляд:

$$Q = 0,8 \cdot 80 \cdot 1200 = 76800 \text{ Дж} = \mathbf{76,8 \text{ кДж}}$$

Цієї енергії достатньо, щоб локально підняти температуру нафти в зоні випромінювача на 5–10°C, що значно полегшує відрив парафінових пробок.

### **Розрахунок довжини хвилі ультразвуку в середовищі ( $\lambda$ )**

Це важливо для визначення кроку встановлення випромінювачів у свердловинному снаряді.

Формула:

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

Тоді розрахунок матиме вигляд:

$$\lambda = \frac{1300 \text{ м/с}}{20000 \text{ Гц}} = 0,065 \text{ м} = \mathbf{6,5 \text{ см}}$$

Практичне значення: Для того, щоб хвилі не «гасили» одна одну (інтерференція), відстань між центрами ПКВ-елементів має бути кратною  $\lambda/2$  (тобто приблизно 3,25 см).

Використання ПКВ (п'єзокераміки) замість магнітострикторів дозволяє зменшити масу генератора на 30% та уникнути потреби у примусовому водяному охолодженні, що критично для свердловинних умов.

## **Характеристика п'єзокерамічного матеріалу ЦТС-19 (PZT-4)**

Для виготовлення активних елементів випромінювача обрано п'єзоелектричну кераміку складу ЦТС-19 (цирконат-титанат свинцю), яка належить до групи сегнетожорстких матеріалів. Вона спеціально розроблена для роботи в режимах випромінювання високої потужності.

Основні фізико-механічні та електричні параметри:

п'єзомодуль  $d_{33}$ :  $300\text{--}350 \times 10^{-12}$  Кл/Н (визначає інтенсивність деформації під дією напруги).

діелектрична проникність  $\epsilon/\epsilon_0$ :  $1600 \pm 200$ .

температура Кюрі ( $T_C$ ):  $+290 \dots +300^\circ\text{C}$ .

Висока температура Кюрі дозволяє пристрою працювати в глибоких свердловинах з пластовою температурою до  $80 \dots 100^\circ\text{C}$  без ризику розполяризації.

Швидкість звуку в кераміці ( $C_{el}$ ):  $\pm 3300$  м/с.

Коефіцієнт електромеханічного зв'язку ( $k_p$ ):  $0,50 \dots 0,55$  (показує ефективність перетворення електричної енергії в механічні коливання).

**Переваги використання саме ЦТС-19 (цирконат-титанат свинцю) для очищення НКТ:**

Висока механічна добротність: забезпечує стабільну амплітуду при зустрічному опорі нафтового середовища та парафінових пробок.

Низькі діелектричні втрати ( $\text{tg } \delta \leq 0,02$ ): мінімізує саморозігрів самого випромінювача, що подовжує термін його безперервної роботи в закритому просторі НКТ.

Стійкість до старіння: параметри кераміки залишаються стабільними протягом 5000–8000 годин експлуатації.

У свердловинному снаряді п'єзоелементи зазвичай виконуються у формі кілець (шайб), зібраних у пакет (так званий «пакет Ланжевена»).

Це дозволяє:

досягти резонансної частоти 20 кГц при компактних габаритах.

використовувати центральний сталевий штифт для стискання пакету, що підвищує його механічну міцність при ударах об стінки НКТ.

Цирконат-титанат свинця (ЦТС) — твёрдый раствор титаната свинца и цирконата свинца с общей формулой  $Pb(Zr_xTi_{1-x})O_3$ .

Титан и цирконий ввиду схожести их химических свойств могут замещать друг друга в кристаллической решётке ЦТС, при таком замещении изменяются свойства. Наиболее полезными с точки зрения сегнетоэлектрических свойств являются твёрдые растворы по составу близкие к так называемой морфотропной границе, около  $x = 0,52$ . Также модификация свойств возможна за счет замещения в твёрдом растворе атомов свинца атомами стронция и бария.

## **РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ ПРИ ПРОВЕДЕННІ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ОЧИЩЕННЯ НКТ**

Цей розділ передбачає комплекс заходів для забезпечення безпеки персоналу та безаварійної роботи обладнання.

Законодавство України з охорони праці складається з конституційних гарантій прав громадян у цій сфері, Кодексу законів про працю України, спеціального Закону України «Про охорону праці», низки інших законів, пов'язаних з охороною життя і здоров'я громадян в процесі їх трудової діяльності, державних міжгалузевих, галузевих та інших нормативних актів, яким надано чинність правових норм, обов'язкових для виконання.

У Конституції України, прийнятій на сесії Верховної Ради 28 червня 1995 р. у ст. 3 стверджується: «Людина, її життя і здоров'я, честь і гідність, недоторканність і безпека визнаються в Україні найвищою соціальною цінністю».

В інших статтях проголошені права громадян на:

- належні, безпечні і здорові умови праці (ст. 43);

- соціальний захист, забезпечення їх у разі повної, часткової або тимчасової втрати годувальника (ст. 46);
- на охорону здоров'я, медичну допомогу та медичне страхування (ст. 49);
- на безпечне для життя і здоров'я довкілля та відшкодування завданої порушенням цього права шкоди (ст. 50).

Одним із основних законів України, що встановлює вимоги до охорони праці в процесі трудової діяльності, регулює відносини між роботодавцем підприємства і працівником з питань безпеки, гігієни праці та виробничого середовища, а також встановлює єдиний порядок організації охорони праці в державі є Закон України «Про охорону праці».

У цьому Законі визначені основні принципи державної політики в галузі охорони праці, серед яких зазначимо:

- пріоритет життя і здоров'я працівників;
- повна відповідальність роботодавця за створення безпечних і нешкідливих умов праці;
- соціальний захист працівників, які потерпіли від нещасних випадків на виробництві і професійних захворювань;
- встановлення єдиних нормативів з охорони праці для всіх форм власності і видів їх діяльності;
- здійснення навчання населення, професійної підготовки і підвищення кваліфікації працівників з питань охорони праці;
- використання економічних методів управління охороною праці тощо;
- забезпечення координації діяльності державних органів, установ, організацій та об'єднань громадян, що вирішують різні проблеми охорони здоров'я, гігієни та безпеки праці.

Закон визначає:

- гарантії прав громадян на охорону праці при укладенні трудового договору, під час роботи, права на пільги і компенсації за важкі та шкідливі умови праці;

- порядок відшкодування шкоди працівникам, у разі ушкодження їх здоров'я, пов'язаного з виконанням трудових обов'язків;
- особливості застосування праці жінок, неповнолітніх та осіб з інвалідністю.

Згідно із Законом, зокрема, умови трудового договору не можуть містити положень, які не відповідають законодавчим та іншим нормативним актам про охорону праці, що діють в Україні. При укладенні трудового договору громадянин має бути проінформований роботодавцем під розписку про умови праці на підприємстві, наявність на робочому місці, де він буде працювати, небезпечних і шкідливих виробничих чинників, можливі наслідки їх впливу на здоров'я та його права на пільги і компенсації за роботу в таких умовах відповідно до законодавства і колективного договору. Працівник має право відмовитися від дорученої роботи, якщо створилася виробнича ситуація, небезпечна для його життя чи здоров'я або для людей, які його оточують, і навколишнього природного середовища. Працівник має право розірвати трудовий договір за власним бажанням, якщо роботодавець не виконує законодавство про охорону праці, умови колективного договору з цих питань. У цьому випадку працівникові виплачується вихідна допомога у розмірі, передбаченому колективним договором, але не менше тримісячного заробітку. Закон «Про охорону праці» визначає також організацію та стимулювання охорони праці на виробництві, нормотворчу діяльність у сфері охорони праці, компетенцію, повноваження і права органів державного управління, нагляду і громадського контролю за охороною праці, відповідальність працівників за порушення законодавства про охорону праці.

Складовою частиною законодавства про охорону праці є Кодекс законів про працю України (КЗпПУ), який регулює трудові відносини в цілому.

Зокрема, згідно зі ст. 29 Кодексу до початку роботи за укладеним трудовим договором роботодавець або уповноважений ним орган зобов'язаний:

- 1) роз'яснити працівникові його права і обов'язки та проінформувати під розписку про умови праці;

2) ознайомити працівника з правилами внутрішнього трудового розпорядку та колективним договором;

3) визначити працівнику робоче місце, забезпечити його необхідними для роботи засобами;

4) проінструктувати працівника з техніки безпеки, виробничої санітарії, гігієни праці і протипожежної охорони.

Що стосується нормування праці, то в ст. 88 Кодексу визначені нормальні умови праці, за яких повинні розроблятися норми виробітку (норми часу) та норми обслуговування.

Нормальними умовами праці вважаються:

1) справний стан машин, верстатів і пристроїв;

2) належна якість матеріалів та інструментів, необхідних для виконання роботи, і їх вчасне подання;

3) вчасне постачання виробництва електроенергією, газом та іншими джерелами енергоживлення;

4) своєчасне забезпечення технічною документацією;

5) здорові та безпечні умови праці.

У КЗпПУ (ст. 13) та в Законі України «Про колективні договори і угоди» (ст. 7) визначається, що в змісті колективного договору повинні бути зобов'язання сторін щодо:

– встановлення гарантій, компенсацій, пільг;

– режиму роботи, тривалості робочого часу і відпочинку;

– умов і охорони праці.

Підприємство зобов'язане видати працівникам засоби індивідуального захисту, а працівники, в свою чергу, мають використовувати їх під час роботи.

Усі засоби вимірювальної техніки електричних величин необхідно повірити, калібрувати або проводити їх метрологічну атестацію в установленому порядку. Необхідно застосовувати засоби вимірювальної техніки, внесені до державного реєстру засобів вимірювальної техніки України, або ті, що пройшли метрологічну атестацію.

Вони мають задовольняти таким основним вимогам:

– клас точності щитових вимірювальних приладів безперервного вимірювання має бути не гірше 1,5 (допускається застосовувати щитові вимірювальні прилади класу точності 2,5, якщо за їх допомогою не здійснюють безперервний контроль технологічного режиму роботи устаткування), вимірювальних приладів – не гірше 0,5;

– межі вимірювання приладів необхідно вибирати з урахуванням можливих найбільших відхилень вимірюваних величин від номінальних значень;

– прилади, що мають електроживлення тільки від зовнішнього незалежного джерела (без вбудованого в прилад додаткового незалежного джерела) необхідно обладнувати сигналізацією про зникнення цього електроживлення.

Для запобігання ураженню електричним струмом у нормальному режимі (за відсутності пошкодження) слід застосовувати окремо або в поєднанні такі заходи захисту:

- основна ізоляція струмовідних частин;
- огорожі та оболонки ;
- бар'єри;
- розміщення поза зоною досяжності;
- обмеження сили струму дотику в усталеному режимі та електричного заряду.

Для запобігання ураженню електричним струмом у разі пошкодження ізоляції слід виконувати окремо або в поєднанні такі заходи захисту:

- захисне заземлення;
- автоматичне вимикання живлення;
- зрівнювання потенціалів;
- обладнання класу II або з рівноцінною ізоляцією;
- захисне електричне відокремлення;
- ізолювальні (непровідні) приміщення, зони, площадки;
- вирівнювання потенціалів.

Заходи захисту в разі непрямого дотику слід виконувати в усіх випадках, якщо номінальна напруга перевищує 50 В змінного і 120 В постійного струму. У приміщеннях з підвищеною небезпекою, в особливо небезпечних і в зовнішніх установках виконання заходів захисту від ураження електричним струмом у разі непрямого дотику може знадобитися і за нижчих напруг, наприклад: 25 В змінного і 60 В постійного струму або 12 В змінного і 30 В постійного струму – за наявності вимог відповідних глав ПУЕ та інших нормативних документів. [32]

Заходи захисту від ураження електричним струмом повинні бути достатніми і реалізованими під час виготовлення електрообладнання або в процесі монтажу електроустановки чи в обох випадках. Два чи більше вжитих заходів захисту в електроустановці не повинні призводити до зниження ефективності кожного з них.

Одних з визначених небезпечних чинників є ризик падіння при роботі на висоті. Для мінімізації ймовірного нещасного випадку працівника, що виконують згаданий вище тип робіт, необхідно надати засоби індивідуального захисту.

Засоби індивідуального захисту від падіння з висоти забезпечуються системою ременів для кріплення їх до тіла споживача і системою кріплення до надійної опори. У передбачуваних умовах експлуатації такі засоби індивідуального захисту обмежують шлях вертикального падіння працівника таким чином, щоб запобігти його зіткненню з перешкодами. Гальмівне зусилля, що виникає при цьому, не повинно завдавати тілесних ушкоджень працівнику або виводити з ладу засоби індивідуального захисту.

Перед початком роботи на висоті необхідно переконатися в міцності опор, до яких буде закріплюватися стропом запобіжного пояса працівник (працівники), та елементів верхолазного спорядження. Вони повинні надійно витримувати зусилля, яке може виникнути при падінні людей.

Після закінчення роботи, а також перед зберіганням засоби захисту необхідно очистити від бруду, просушити, протерти металеві деталі, а деталі зі шкіри - змастити жиром, розташувати їх в місцях збереження.

Засоби захисту слід зберігати і перевозити з дотриманням умов, що забезпечують виконання вимог виробників. Вони повинні бути захищені від механічних пошкоджень, зволоження, забруднення, впливу мастил, бензину, кислот, лугів та розчинників, а також від прямої дії сонячних променів і тепловипромінювання пристроїв, що виділяють тепло.

В підрозділах підприємств, які застосовують засоби захисту, необхідно вести Журнал обліку та зберігання засобів захисту.

У разі виявлення непридатних для застосування засобів захисту, їх вилучають з експлуатації. [33]

Відстані між обладнанням та від обладнання до стін будівлі мають визначатися під час проектування відповідно до вимог нормативно-правових актів.

Обладнання повинно бути розташовано таким чином, щоб була можливість зручно та безпечно його обслуговувати. Відстань від обладнання до стіни будівлі повинна становити не менше ніж 1 м, а ширина робочого проходу - не менше ніж 0,75 м.

Робочі місця повинні утримуватись у чистоті, небезпечні речовини та відходи - видалятися.

Робочі місця, об'єкти, джерела протипожежного водопостачання та місця розташування первинних засобів пожежогасіння, проїзди та підходи до них, проходи і переходи в темний час доби повинні бути освітлені. На території майданчиків свердловин (у тому числі на факельних амбарах) встановлення стаціонарних світильників не обов'язково. Для освітлення цих майданчиків дозволяється використовувати переносні чи пересувні освітлювальні засоби та устаткування.

У виробничих приміщеннях, крім робочого освітлення, повинно бути аварійне.

Світильники робочого та аварійного освітлення повинні живитися від незалежних джерел. Замість пристрою стаціонарного аварійного освітлення допускається застосування ручних світильників з акумуляторами.

Заміри рівня освітленості необхідно проводити перед уведенням об'єкта в експлуатацію, а також після реконструкції приміщень, систем освітлення.

Об'єкти, для обслуговування яких потрібний підйом працівника на висоту до 0,75 м, необхідно обладнати сходами, а на висоту понад 0,75 м - сходами з поручнями.

Засоби зв'язку, попередження, аварійної сигналізації і контролю стану повітряного середовища повинні бути справними і постійно готовими до дії, їх справність повинна перевірятись не рідше ніж один раз на місяць.

Сигнал тривоги, що подається системою аварійної сигналізації, повинен бути добре чутним у всіх місцях, де можуть перебувати працівники.

Захист від блискавки нафтогазопромислових об'єктів повинен здійснюватися відповідно до вимог частин 1-4 ДСТУ EN 62305:2012 «Захист від блискавки», затвердженого наказом Міністерства економічного розвитку і торгівлі України від 28 травня 2012 року № 640.

Електрообладнання (машини, апарати, пристрої), електричні світильники, засоби блокування, телефонні апарати і сигнальні пристрої до них, що встановлюються у вибухонебезпечних зонах класів 0, 1, 2, повинні мати відповідний рівень вибухозахисту, а вид вибухозахисту повинен відповідати категорії і групі вибухонебезпечної суміші.

Забороняється встановлення у вибухонебезпечних зонах класів 0, 1, 2 вибухозахищеного електрообладнання, яке не має маркування за вибухозахистом, виготовлене неспеціалізованими підприємствами або відремонтоване зі зміною вузлів і деталей, які забезпечують вибухозахист, без сертифіката на відповідність.

Забороняється експлуатація електрообладнання в разі несправності засобів вибухозахисту, блокування, порушення схем керування і захисту. [35]

## **5.1. Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів**

При використанні ультразвукових установок на свердловині діють такі фактори:

Електрична небезпека: Використання напруги високої частоти (до 1000В і вище на виході генератора) та ризик ураження струмом через пошкодження кабелю.

Вибухо- та пожежонебезпека: Робота з електроприладами безпосередньо біля гирла нафтової свердловини (наявність супутнього газу та парів нафти).

Акустичний вплив: Безпосередня дія високочастотних коливань на організм оператора (хоча ультразвук у свердловині ізольований, наземний генератор може створювати шум).

Механічна небезпека: Робота з вантажопідіймальними механізмами (лебідки геофізичних автолабораторій) при спуску випромінювача.

## **5.2. Вимоги до електробезпеки**

Оскільки генератор виробляє струм високої частоти, необхідно:

Забезпечити надійне заземлення корпусу генератора та автолабораторії до контуру заземлення свердловини.

# ЕЛЕКТРОБЕЗПЕКА

## ОСОБЛИВОСТІ УРАЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИМ СТРУМОМ

Електробезпека - це система організаційних, технічних заходів і засобів, які забезпечують захист людей від шкідливого і небезпечного впливу електричного струму, електричної дуги, електромагнітного поля і статичної електрики.

### ОСНОВНІ ВИПАДКИ УРАЖЕННЯ СТРУМОМ



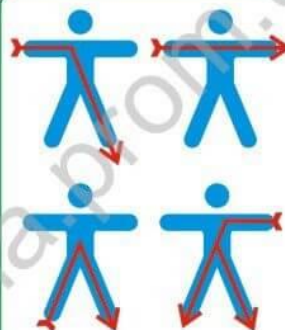
Випадковий дотик до струмопровідних частин устаткування.

Помилкова подача напруги під час ремонту чи огляду електроустановок через неузгоджені дії працюючих.

Дотик до металевих частин устаткування, що опинилося під напругою в аварійній ситуації (пошкодження чи пробій ізоляції).



## ВПЛИВ ЕЛЕКТРИЧНОГО СТРУМУ НА ОРГАНІЗМ ЛЮДИНИ



Ступінь ураження залежить від:

- сили струму, що проходить через тіло людини;
- тривалості його дії;
- шляху проходження через тіло;
- індивідуальних особливостей організму людини;
- стану приміщення, в якому експлуатується електроустановка;
- площі контакту людини з струмопровідними частинами.

Неоднакова сила струму порізноmu впливає на організм людини.

Визначають такі порогові значення струму:

- пороговий відчутний струм;
- пороговий невідпускаючий струм;
- пороговий фібриляційний струм.

## ОСНОВНІ ПРИЧИНИ ЕЛЕКТРОТРАВМАТИЗМУ

- допуск до роботи осіб, які не мають кваліфікаційної групи з електробезпеки;
- допуск до роботи осіб, які не знають приміщень і зовнішніх установок за ступенем небезпеки ураження електрострумом;
- робота на електроустановках і електронструментом без заземлення, занулення, без перевірки опору ізоляції в мережах споживачів електроструму;
- робота без знання напруги, без засобів колективного та індивідуального захистів;
- робота без наряду-допуску;
- нерегулярне навчання та переатестація персоналу, який обслуговує електромережі та електроустановки;
- допуск до роботи осіб без медичного огляду;
- початок роботи без попередньої перевірки відсутності напруги, розширення зони робочого місця.

## ЕЛЕКТРОТРАВМА ТА ПЕРША ДОПОМОГА ПОТЕРПІЛОМУ



Електротравма - це травма, викликана впливом електричного струму та електричної дуги. Загальні прояви електротравми виникають від дії струму на нервову систему. В момент проходження електричного струму спостерігається судинне скорочення скелетних м'язів, що ускладнює будь-які дії потерпілого, якщо навіть він залишається в свідомості. Якщо постравадний тримає дріт руками, його пальці сильно стиснуться, так що вистягти дріт з його рук стає неможливим. Місцеві прояви електротравми нагадують температурні опіки. Для зняття напруги потерпілого від проводу до 100 В користуються сухою палицею, дошки або іншим сухим діелектричним предметом.



Використовувати лише сертифікований броньований кабель (КГ-3 або аналоги) з перевіреною ізоляцією.

Перед початком робіт проводити замір опору ізоляції всієї системи.

### 5.3. Забезпечення вибухобезпеки

Свердловинний випромінювач повинен мати вибухозахищене виконання (герметичний корпус, розрахований на високий тиск).

Наземний генератор має бути розташований на безпечній відстані від гирла свердловини (не менше 10-25 метрів, залежно від категорії свердловини).

Забороняється проводити роботи при виявленні витоків нафти або газу через арматуру.

## 5.4. Захист від акустичного впливу

Хоча основна енергія ультразвуку зосереджена в свердловині, персонал повинен:

Використовувати засоби індивідуального захисту (ЗІЗ) — протишумні навушники або беруші, якщо рівень шуму від роботи наземного обладнання перевищує 80 дБ.

Обмежувати час перебування оператора в безпосередній близькості до працюючого генератора.



## 5.5. Безпека при спуско-підймальних операціях (СПО)

Перед спуском приладу необхідно перевірити стан лебідки та цілісність кабелю.

Контролювати натяг кабелю за допомогою датчика ваги (системи ІВЕ-50 або аналогів), щоб уникнути обриву приладу при «прихопленні» в трубах.

Резюме до розділу:

Дотримання регламентованих заходів з охорони праці дозволяє мінімізувати ризики виробничого **травматизму** та забезпечити збереження дороговартісного обладнання під час проведення очисних робіт.

# СВ 6 основних правил безпечної роботи на підйомнику

**Пройдіть підготовку, ознайомлення та авторизацію перед використанням будь-яких підйомників**

**Переконайтеся, що умови ґрунту відповідають вимогам конкретного підйомника**

**Не перевищуйте безпечне робоче навантаження та максимальну кількість людей**

**Під час роботи на підйомнику прикріпіть ремінь до призначеної точки кріплення**

**Дотримуйтеся безпечної відстані до перешкод над головою**

**Тримайте тверду опору під час роботи на підйомнику**



The infographic consists of six pairs of illustrations, each pair representing a safety rule. Each pair includes a 'wrong' example (marked with a red 'X') and a 'right' example (marked with a green checkmark). The rules are: 1. Preparation and authorization: The 'wrong' example shows a worker on a lift without a checklist, while the 'right' example shows a worker with a checklist and a 'certified' badge. 2. Ground conditions: The 'wrong' example shows a lift on uneven ground, while the 'right' example shows it on a flat surface. 3. Load and capacity: The 'wrong' example shows two workers on a lift with a 300 kg load, while the 'right' example shows one worker on a lift with a 250 kg load. 4. Safety harness: The 'wrong' example shows a worker without a harness, while the 'right' example shows a worker with a harness attached to a designated anchor point. 5. Clearance: The 'wrong' example shows a worker too close to an overhead obstacle, while the 'right' example shows a safe distance. 6. Handholds: The 'wrong' example shows a worker leaning over the side of the lift, while the 'right' example shows a worker holding onto the side rail.

## ВИСНОВКИ

У бакалаврській роботі було проведено комплексне обґрунтування та розробку технології ультразвукового очищення насосно-компресорних труб (НКТ) від асфальто-смолистих та парафінових відкладень. За результатами проведеного дослідження зроблено наступні висновки:

Проаналізовано сучасні методи боротьби з відкладеннями, що підтвердило обмеженість традиційних підходів. Механічні методи є ризикованими, а теплові та хімічні — високовартісними та енергоємними. Встановлено, що безпідйомне очищення із застосуванням фізичних полів є найбільш перспективним напрямком розвитку сервісу свердловин.

Вивчено теоретичні засади ультразвукового впливу, де ключовим фактором руйнування відкладень визначено явище акустичної кавітації. Доведено, що мікрровибухи кавітаційних бульбашок ефективно руйнують адгезійний зв'язок між парафіном та металевою стінкою НКТ, перетворюючи твердий осад на дрібнодисперсну суспензію.

Обґрунтовано технологічні параметри процесу: встановлено, що для умов нафтових свердловин оптимальною є частота 18–25 кГц при питомій потужності випромінювання не менше 2 Вт/см<sup>2</sup>. Визначено, що швидкість переміщення випромінювача в інтервалі відкладень повинна становити 0,2–0,5 м/хв залежно від їх товщини.

Розроблено технологічну послідовність операції, яка дозволяє проводити очищення без залучення бригад капітального ремонту свердловин. Описано схему спуску випромінювача на геофізичному кабелі та алгоритм його роботи в режимі реального часу.

Розраховано економічну ефективність, яка показала, що впровадження ультразвукової технології дозволяє знизити витрати на обслуговування свердловини у 3–4 рази порівняно з методами, що потребують підйому колони НКТ, а також мінімізувати збитки від простою свердловини.

Запропоновано пропозицію обладнання яке може здійснювати дану процедуру очищення насосно-компресорних труб від забруднення за допомогою ультразвуку. Також поза меж кваліфікаційної роботи вже сформовано комерційну пропозицію щодо впровадження лабораторного обладнання ультразвукових установок для очищення в навчальний процес для студентів університету Бекетова

Визначено заходи з охорони праці, що забезпечують безпечне проведення робіт в умовах вибухонебезпечного середовища та використання електрообладнання високої напруги.

Мета роботи досягнута, а запропонована технологія рекомендована до впровадження на родовищах із інтенсивним утворенням АСПВ для стабілізації видобутку нафти.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

а

Бугай Ю.М., Глоба В.М., Нагорний В.П., Венгерцев Ю.О. Спорудження нафтобаз і газонафтоосховищ: Підручник для студентів вищих навчальних закладів. – К.: «ВПОЛ», 2000, 606 с.:іл.234, табл.93, бібл. 23.

п

АТАЛОГ КРИТИЧНО ВАЖЛИВИХ ТЕХНОЛОГІЙ для енергетичного сектору України, ред. травень 2025

Greenhouse gas protocol Scope 2 Guidance World Resources Institute

Основы охраны труда: підручник / В.І. Голінько; М-во освіти і науки України; Нац. універс. ун-т. – 2-ге вид. – Д.: НГУ, 2014. – 271 с.

Про затвердження Правил охорони праці під час виконання робіт на висоті URL:

Про затвердження Правил охорони п... | від 27.03.2007 № 62

Про затвердження Правил безпеки в нафтогазодобувній промисловості Наказ;

М

УКОН УКРАЇНИ Про об'єкти підвищеної небезпеки

Білецький В. С. Основи нафтогазової справи / В. С. Білецький, П. В. Вітязь, С. А. Матвієнко. – Львів: Новий Світ-2000, 2019. – 430 с.

Бойко В. С. Технологія видобутку нафти: підручник / В. С. Бойко. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2011. – 827 с.

Борловський В. М. Технологія видобування нафти: навчальний посібник / В. М. Борловський, В. С. Білецький, В. Г. Некрасов. – Полтава: ПолтНТУ, ФОП Халіков Р. Х., 2019. – 312 с.

Михайлов М. В. Експлуатація нафтових і газових свердловин: навчальний посібник / М. В. Михайлов. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2012. – 360 с.

Возгонюк В. В. Боротьба з ускладненнями при видобуванні нафти і газу / В. В. Возгонюк. – К.: Знання, 2006. – 280 с.

Дорошенко Я. В. Дослідження процесів формування асфальто-смолистих і парафінових відкладень у нафтогазовому обладнанні / Я. В. Дорошенко //

р

р

б

Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. – 2016. – № 1 (40). – С. 54–62.

еляк В. В. Удосконалення акустичних технологій очищення вибійної зони та підземного обладнання свердловин / В. В. Пеляк, Ю. С. Лазар // Нафтова і газова промисловість. – 2014. – № 3. – С. 28–31.

ришаненко В. П. Проблеми та перспективи застосування ультразвукових методів у нафтогазовій галузі / В. П. Гришаненко // Енергозбереження та енергоефективність. – 2018. – № 2. – С. 12–17.

ондрат О. Р. Методи інтенсифікації видобутку нафти на пізній стадії розробки родовищ / О. Р. Кондрат. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2005. – 240 с.

атент на корисну модель № 118432 UA. Пристрій для ультразвукової обробки свердловин / [Авторний колектив]. – Опубл. 10.08.2017, Бюл. № 15.

атент на корисну модель № 142055 UA. Спосіб очищення насосно-компресорних труб від парафінових відкладень / [Авторний колектив]. – Опубл. 25.05.2020, Бюл. № 10.

ПАОП 11.1-1.01-08. Правила безпеки у нафтогазовидобувній промисловості України. – К.: Держгірпромнагляд, 2008. – 214 с.

одекс цивільного захисту України від 02.10.2012 № 5403-VI (редакція від 2023 р.).