

Перкун І. В., кандидат технічних наук, доцент,
докторант Івано-Франківського національного
технічного університету нафти і газу
ORCID: 0000-0002-6523-1606

ГІДРОІМПУЛЬСНА ПЕРФОРАЦІЯ НАФТОГАЗОВИХ СВЕРДЛОВИН СТРУМЕНЕМ РОЗЧИНУ ПОЛІМЕРУ

Аналізується існуючий метод інтенсифікації – гідропіскоструминна перфорація. Попри свою ефективність у створенні надійного гідродинамічного зв'язку між пластом і свердловиною, цей метод має суттєві недоліки. Головними з них є інтенсивне гідроабразивне зношування насосно-компресорного обладнання та арматури, що призводить до погіршення якості перфораційних каналів через ерозію сопел, а також висока ресурсо- та енергоємність процесу. Як перспективну та більш досконалу альтернативу пропонується використання високошвидкісного струменя розчину полімеру (поліетиленоксиду). Ключова інноваційна ідея роботи полягає у застосуванні не стаціонарного (безперервного), а імпульсного режиму подачі водополімерного струменя. Головна гіпотеза дослідження стверджує, що такий підхід, завдяки унікальним реофізичним властивостям полімерів, дозволяє суттєво підвищити руйнівну здатність струменя. Теоретичне обґрунтування та серія експериментів повністю підтвердили цю гіпотезу. Дослідження поведінки розчинів полімерів в умовах коливальної течії, що моделює роботу перфоратора, виявили існування критичної частоти пульсацій. Встановлено, що максимальна ефективність руйнування досягається, коли частота імпульсів відповідає максимуму дисипативної функції. У цьому режимі найбільша частина енергії потоку безповоротно розсіюється і перетворюється на роботу руйнування. Експерименти з перфорації моделі перешкоди (сталь, бетон, гірська порода) наочно продемонстрували, що імпульсний струмінь створює значно глибші канали, ніж стаціонарний, за однакових вихідних тисків. Базуючись на отриманих теоретичних і експериментальних результатах розроблено конструкцію нового пристрою – гідроімпульсного перфоратора. Його новизна полягає у використанні обертового ротора з V-подібними пазами, який приводиться в рух вбудованою гідравлічною турбіною. Обертаючись, ротор механічно перериває потік робочої рідини, що надходить до соплових насадок, генеруючи потужні гідродинамічні імпульси. Важливою особливістю конструкції є можливість осьового зміщення ротора, що дозволяє точно налаштовувати форму, тривалість та частоту імпульсів для досягнення максимального руйнівного ефекту залежно від властивостей породи, що руйнується. Таким чином, робота доводить, що перехід до імпульсного режиму водополімерної перфорації є науково обґрунтованим та високоефективним. Запропонований гідроімпульсний перфоратор є інноваційним технічним рішенням, що відповідає критерію «винахідницький рівень» і відкриває шлях до створення енергоощадної та більш продуктивної технології розкриття нафтогазових пластів.

Ключові слова: гідроімпульсний перфоратор, розчин полімеру, сопло-насадка, обсадна колона, цементне кільце, порода, дисипативна функція, в'язкопружність.

Perkun I. V. Hydro-pulse perforation of oil and gas wells with a polymer solution jet

This paper analyzes the existing intensification method: hydro-abrasive jetting (or hydro-sandblasting perforation). Despite its effectiveness in establishing a reliable hydrodynamic connection between the formation and the wellbore, this method has significant drawbacks. Chief among these are the intense hydro-abrasive wear of pumping equipment and fittings, leading to a decline in the quality of perforation channels due to nozzle erosion, as well as the high resource and energy intensity of the process. As a promising and more advanced alternative, the authors propose the use of a high-velocity polymer solution jet (polyethylene oxide). The key innovative idea of the work is the application of a pulsed, rather than a steady (continuous), mode for delivering the water-polymer jet. The main hypothesis of the research posits that this approach, owing to the unique rheophysical properties of polymers, can significantly enhance the destructive capability of the jet. Theoretical justification and a series of experiments have fully confirmed this hypothesis. Studies of the behavior of polymer solutions under oscillatory flow conditions, which simulate the perforator's operation, revealed the existence of a critical pulsation frequency. It was established that maximum destructive efficiency is achieved when the pulse frequency corresponds to the maximum of the dissipative function. In this mode, the largest portion of the flow's energy is irreversibly dissipated and converted into destructive work. Experiments involving the perforation of a target model (steel, concrete, and rock formation) clearly demonstrated that the pulsed jet creates significantly deeper channels than a steady jet at identical initial pressures. Based on the results obtained, a conceptual solution and design for a new device—the hydro-pulse perforator—were developed. Its novelty lies in the use of a rotating rotor with V-shaped grooves, driven by an integrated hydraulic turbine. As it rotates, the rotor mechanically interrupts the flow of the working fluid to the nozzles, thereby generating powerful hydrodynamic pulses. An important design feature is the capability for

axial displacement of the rotor, which allows for the precise adjustment of the pulse shape, duration, and frequency to achieve maximum destructive effect depending on the properties of the rock formation. Thus, the work demonstrates that the transition to a pulsed mode for water-polymer perforation is scientifically justified and highly effective. The proposed hydro-pulse perforator represents an innovative technical solution that meets the 'inventive step' criterion and paves the way for creating an energy-efficient and more productive technology for developing oil and gas formations.

Key words: *hydro-pulse perforator, polymer solution, nozzle, casing string, cement ring, rock, dissipative function, viscoelasticity.*

Постановка проблеми. У процесі тривалої експлуатації свердловин відбувається кольматація привибійної зони пласту твердими частинками – продуктами руйнування гірських порід, що транспортуються потоками вуглеводнів. Крім того, у цій зоні можуть накопичуватися компоненти бурового та цементного розчинів, пластова вода, вуглеводневий конденсат, солі та технологічні рідини, які використовуються під час спорудження та ремонту свердловин. Це призводить до утворення додаткових фільтраційних опорів, що, своєю чергою, зменшує дебіт свердловин.

До ефективних методів інтенсифікації припливу флюїдів до вибою свердловин належить гідропіско-струминна перфорація. Цей метод дозволяє знизити фільтраційні втрати тиску у привибійній зоні, активізувати неефективно працюючі перфоровані інтервали пласта та залучити до розробки малопотужні й низькопроникні нафто- й газонасичені прошарки, які раніше вважалися нерентабельними [1, 2].

Гідропіскоструминна перфорація забезпечує надійний гідродинамічний зв'язок між продуктивним пластом і стовбуром свердловини, демонструючи істотні переваги відносно інших методів, зокрема вибуховою перфорацією. Проте ця технологія має і суттєві недоліки, серед яких – інтенсивне зношування насосно-компресорного обладнання та арматури під дією піску. Збільшення діаметра сопел і погіршення профілю їх отворів призводить до зниження швидкості гідроабразивного струменя, що погіршує якість формування перфораційних каналів в обсадних колонах, цементному кільці й гірській породі, а також збільшує тривалість процесу. Крім того, глибоке проникнення абразивних частинок у породу знижує ефективність віддачі пласта. Усі ці чинники зумовлюють високу ресурсо- та енергоємність процесу [2].

Альтернативним рішенням є використання високошвидкісного струменя водного розчину поліетеленоксида (ПЕО) замість гідроабразивної суміші. Експериментальні дані свідчать, що малі добавки полімерів здатні істотно підвищити руйнівну здатність водного струменя [3–6]. Втім, сучасні уявлення про поведінку макромолекул у збіжній течії – характерний для вхідних ділянок струменеформуєвих сопел гідроперфоратора – залишаються обмеженими.

Становлення теоретичних засад реофізики водополімерної перфорації є необхідною умовою для створення енергоощадної та екологічно безпечної технології. Наразі спостерігається перехід від накопичення експериментальної інформації до розуміння реофізичної сутності явищ, що виникають при збіжній течії розчинів полімерів, і встановлення закономірностей прояву гумоподібної високоеластичності.

Дослідження, присвячені реофізиці перфорації полімерним струменем, а також розробці відповідного обладнання, є інноваційними й актуальними. *Концептуальна гіпотеза роботи* ґрунтується на здатності розчинів полімерів змінювати свої властивості під впливом деформаційної дії потоку. Це відкриває перспективи для створення технології гідроструминної водополімерної перфорації з високою енергоефективністю та мінімальним негативним екологічним впливом.

Аналіз експериментальних даних [5–8] показує, що вдосконалення процесу водополімерної перфорації нафтогазових свердловин пов'язано, в першу чергу, з формуванням гідродинамічних властивостей струменя за умов енергозбереження. Це забезпечує максимальну продуктивність і збільшує ресурс перфораційного обладнання. Підвищення якості водополімерного струменя дає змогу мінімізувати енергетичні витрати за рахунок зниження значень робочого тиску перед насадками при задоволенні технологічних вимог до процесу перфорації.

Теорія деформаційних ефектів при течії розчинів полімерів [9] дозволяє сподіватися, що руйнівна здатність водополімерного струменя буде значно більша при імпульсному протіканні полімерного розчину крізь соплові насадки гідроперфоратора.

Метою статті є: обґрунтувати припущення, що висока руйнівна здатність водополімерного струменя досягається при імпульсній його течії;

– вивчення особливості імпульсної течії (з розтягом) розчину полімеру в модельних умовах соплової насадки гідроперфоратора;

– проведення теоретичного аналізу особливостей імпульсної течії розчинів полімерів для використання отриманих теоретико-експериментальних результатів при розробці гідроімпульсного перфораційного обладнання;

– розробка концептуального рішення щодо створення гідроімпульсного перфоратора.

Методи і матеріали. Дослідження особливостей осцилюючої течії водних розчинів полімеру проводили з використанням гідродинамічної установки, схема якої зображена на рис. 1. Модельний режим формування осцилюючого водополімерного струменя реалізовувався при течії водного розчину ПЕО крізь точну камеру під дією постійного перепаду тиску і впливу на течію електромагнітного вібратора.

Ефективність досліджуваних полімерних розчинів оцінювали за величиною їх гідродинамічного опору η_{ef} . Цей параметр визначали шляхом порівняння об'ємної витрати розчину полімеру та калібрувальної ньютонівської рідини за однакового перепаду тиску.

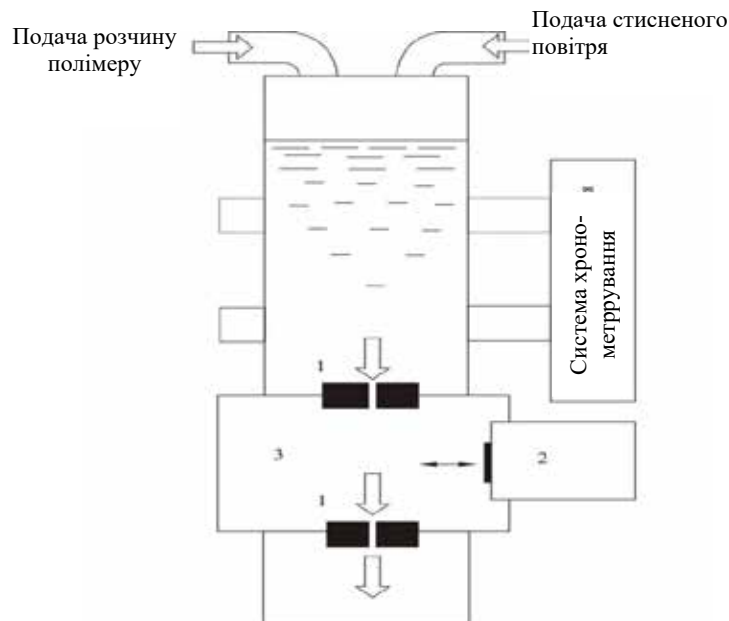


Рис. 1. Схема гідродинамічної установки

Примітка: 1 – пластини з отворами, 2 – електромагнітний вібратор, 3 – зона впливу вібратора

Дослідження впливу частоти переривання струменя водного розчину ПЕО в імпульсному режимі на довжину формованого каналу проводили на гідрорізальній установці [9]. Установа була оснащена електромеханічним клапаном для періодичного переривання потоку. Модель перешкоди, що імітувала обсадну колону, цементне кільце та керн, складалася зі сталевго листа (товщина 10 мм), шару бетону (20 мм) і гірської породи (770 мм) [5].

Робочі водні розчини ПЕО (мол. маси $6 \cdot 10^6$) готували шляхом розведення вихідного концентрованого розчину концентрації 0,1 % [10].

Результати і їх обговорення. Результати експериментального дослідження наведено на рисунку 2, а, де η_{ef} позначає ефективний гідродинамічний опір за умов стаціонарної течії розчину полімеру, а $\Delta\eta_{\text{ef}}$ – додатковий внесок у опір, що виникає внаслідок імпульсного збурення основного потоку [11].

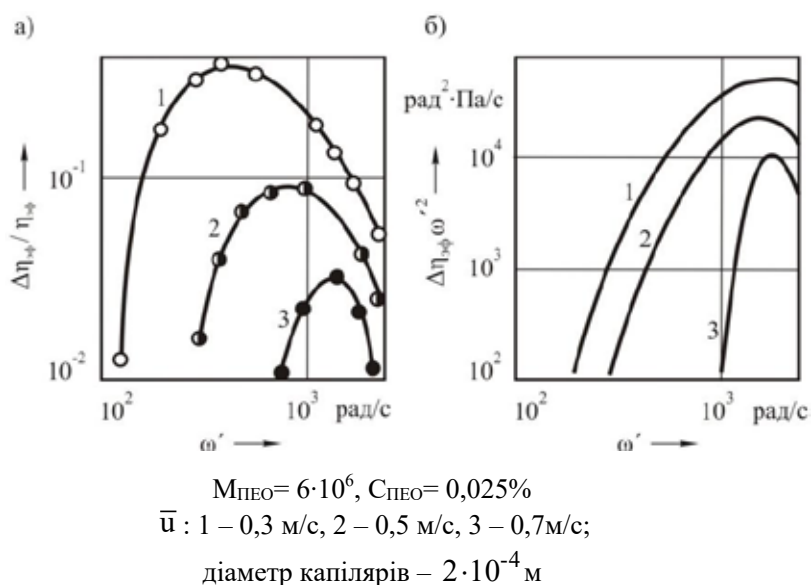


Рис. 2. Вплив частоти зовнішнього поля на гідродинамічний опір (а) і дисипативну функцію (б) при течії водополімерного розчину для різних середніх швидкостей протікання

Аналіз отриманих залежностей показує існування критичної частоти дії $\omega'_{кр}$ на течію водного розчину ПЕО крізь отвори в пластинах. При перевищенні цієї частоти потік характеризується значним зростанням дисипації енергії. Встановлено, що зі збільшенням середньої швидкості потоку значення критичної частоти $\omega'_{кр}$ зростає, тоді як відносний додатковий опір $\Delta\eta_{ef}$ знижується. Окрім того, за умов сталої швидкості потоку, зменшення концентрації полімеру в водному розчині ПЕО призводить до зміщення критичної частоти в область вищих значень.

Відомо, що зміни величини деформації ε і напруження σ при деформації розчинів гнучколанцюгових полімерів відбуваються на різних фазах [12, 13]. Кут δ' характеризує цю різницю і є функцією частоти дії ω' вібратора на потік розчину полімеру. Деформація в умовах осцилюючої течії водополімерного розчину виникає під дією напруження, що змінюється за наступним законом:

$$\sigma(\tau) = \bar{\sigma} + \sigma_0 \exp(i \omega' \tau). \quad (1)$$

де $\bar{\sigma}$ – стаціонарне напруження; τ – час.

Враховуючи, що $\sigma(\tau) = \sigma_0 \cos \omega' \tau$, $\varepsilon(\tau) = \varepsilon_0 \cos(\omega' \tau - \delta')$ і виключаючи з цих рівнянь час, одержимо вираз:

$$\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^2 + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right)^2 = \varepsilon^2 \delta' + \left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right) \cdot \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right) \cos \delta'. \quad (2)$$

Вираз (2) описує площу еліпса, яка дорівнює роботі A_0 , що за період гармонійних коливань дисипується при деформації. Тоді функція дисипації W обчислюється як A_0 на частоту осциляції:

$$W = A_0 \frac{\omega'}{2\pi} = \frac{\varepsilon_0 \sigma_0 \omega'}{2} \sin \delta'. \quad (3)$$

З (3) видно, що дисипативна функція залежить від молекулярних властивостей полімеру, що враховується параметром δ' . Якщо напруження змінюється за гармонійним законом, то легко отримати вираз для зміни швидкості деформації $\dot{\varepsilon}$. Остання пов'язана з деформацією таким чином:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{d\tau} = \varepsilon_0 i \omega' \exp[i(\omega' \tau - \delta')] = i \omega' \varepsilon. \quad (4)$$

Величина відношення $\frac{\sigma}{\dot{\varepsilon}}$ є комплексною динамічною в'язкістю η^* . Її можна подати, як різницю дійсної та уявної компонент в'язкості [14–16]

$$\eta^* = \eta' - i\eta'', \quad (5)$$

$$\text{де } \eta' = \left(\frac{\sigma_0}{\varepsilon_0 \omega'}\right) \sin \delta', \quad \eta'' = \left(\frac{\sigma_0}{\varepsilon_0 \omega'}\right) \cos \delta'.$$

Введемо у вираз (3) η' і зробивши перетворення, отримаємо

$$W = \eta' \frac{\varepsilon_0^2 \omega'^2}{2}. \quad (6)$$

Динамічна в'язкість розчину полімеру проявляється при його деформації, і приріст гідродинамічного опору $\Delta\eta_{ef}$ в умовах осцилюючого впливу на основну його течію можна віднести до появи η' . Оскільки амплітудне значення величини деформації μ_0 залишалося в експериментах постійним, можна скористатися скейлінгом і переписати (6) у вигляді:

$$W \approx \Delta\eta_{ef} \cdot \omega'^2. \quad (7)$$

Враховуючи експериментальні результати, що представлені на рис. 2,а були отримані з використанням рівняння (7) залежності для дисипативної функції, що наведені на рис. 2,б. Аналіз результатів, наведених на рис. 2,б свідчить, що дисипація енергії при осцилюючій течії зменшується зі зростанням середньої швидкості течії розчину полімеру. Цей результат корелює зі збільшенням частки розгорнутих макромолекул в потоці розчину ПЕО [17] і, як наслідок, зі зростанням наведеної жорсткості полімерних молекул [18].

Відповідно, для систем із більш жорсткими та розгорнутими ланцюгами частоти, за якими режим течії стає високодисипативним, зміщуються в область вищих значень. Таким чином, можна сподіватися, що осцилюючий режим формування водополімерного струменя буде забезпечувати вищу руйнівну здатність порівняно зі стаціонарним струменем.

Для верифікації цього припущення було проведено експериментальне дослідження впливу частоти осцилюючого формування водополімерного струменя на його проникаючу здатність. Досліди виконували на гідрорізальній установці [9], вимірюючи довжину каналу, що утворюється в модельній перешкоді струменем водного розчину ПЕО, генерованим в осцилюючому режимі. Результати, наведені в Таблиці 1,

підтверджують, що реофізичні ефекти, які зумовлюють високодисипативний режим течії, відіграють ключову роль у підвищенні ефективності гідроструминної перфорації нафтогазових свердловин.

Експериментально встановлено, що ефективність процесу гідроструминної водополімерної перфорації нафтогазових свердловин значно підвищується за умов формування струменя в імпульсному режимі, який забезпечує прояв пружних деформацій. При цьому оптимальною є частота пульсаційного впливу, що відповідає максимуму дисипативної функції $W \approx \Delta\eta_{ef} \cdot \omega'^2$.

Таблиця 1

Довжина каналу сформованого стаціонарним та імпульсним водополімерним струменями в моделі перешкоди ($M_{\text{ПЕО}} = 6 \cdot 10^6$, $C_{\text{ПЕО}} = 0,005\%$, $d_{\text{сон}} = 0,35 \cdot 10^{-3}$ м, час перфорації – 10 хв, $l_0 = l_{\text{онт}}$)

Довжина сформованого каналу $h \cdot 10^3$, м		
ΔP_0 , МПа	Стаціонарний струмінь водного розчину ПЕО	Осцилюючий водополімерний струмінь
100	380	445
200	405	474
300	420	491

Таким чином, проведені експерименти не лише підтвердили, але й всебічно обґрунтували фундаментальну гіпотезу про значне підвищення руйнівної здатності водополімерного струменя за умов його імпульсного (осцилюючого) формування. Було доведено, що цей ефект безпосередньо пов'язаний з проявом унікальних в'язкопружних властивостей полімерного розчину в потоці, що дозволяє перетворювати енергію потоку на роботу руйнування з максимальною ефективністю.

Ці фундаментальні результати стали науковою основою для переходу від теорії до практики – розробки вдосконаленого гідроперфоратора, конструкція якого цілеспрямовано використовує відкриті реофізичні явища [7, 9] для підвищення ефективності процесу перфорації нафтогазових свердловин. Запропонований гідроімпульсний перфоратор є інноваційним технічним рішенням, що включає порожнистий корпус із сопловими насадками та ключовий елемент – ротор, встановлений усередині з можливістю обертання. Для забезпечення автономної та стабільної роботи привід обертання ротора реалізовано у вигляді вбудованої багатоступінчастої гідравлічної турбіни, що працює за рахунок енергії самого потоку рідини [19].

Ключові конструктивні особливості та їх обґрунтування. Головна перевага розробленого пристрою полягає в унікальних конструктивних особливостях, що дозволяють не просто створювати пульсації, а й гнучко керувати їх параметрами:

- Ротор виконано у формі порожнистого циліндра, на зовнішній поверхні якого нанесено спеціальні V-подібні пази. Така форма, по-перше, спрощує конструкцію та здешевлює виробництво. По-друге, геометричне розташування пазів (їхній нижній край знаходиться не вище верхнього краю соплових отворів) забезпечує повне періодичне перекриття потоку рідини, що генерує потужні гідродинамічні імпульси.

- Механізм регулювання імпульсів: Перфоратор оснащено прецизійним механізмом для осьового зміщення та надійної фіксації ротора відносно сопел. Цей механізм реалізовано у вигляді штока, що проходить крізь осьовий отвір приводного вала турбіни. На нижньому кінці штока закріплений ротор, а на верхньому – встановлено цанговий затискач для його надійної фіксації.

Функціональні переваги. Таке поєднання конструктивних елементів надає пристрою виняткові експлуатаційні можливості. Наявність V-подібних пазів у поєднанні з можливістю осьового зміщення ротора дозволяє точно регулювати форму, тривалість та частоту гідродинамічних імпульсів. Ця функція є критично важливою, оскільки дає змогу налаштовувати режим роботи перфоратора для досягнення максимального руйнівного ефекту залежно від властивостей породи та реофізичних характеристик полімерного розчину.

Надійна фіксація положення штока за допомогою цангового затискача гарантує стабільність заданих параметрів протягом усього процесу перфорації. При цьому конструкція залишається технологічною у виготовленні та простою в експлуатації. Розміщення затискного механізму на верхньому кінці штока забезпечує зручність та швидкість налаштування пристрою безпосередньо перед його спуском у свердловину.

Таким чином, завдяки цим продуманим конструктивним удосконаленням було створено пристрій, що дозволяє цілеспрямовано генерувати гідродинамічні імпульси з оптимальними, заздалегідь визначеними характеристиками. Заявлена сукупність ознак є інноваційною, відповідає критерію «винахідницький рівень» та демонструє якісно новий технічний результат, відкриваючи шлях до створення більш продуктивної та енергоощадної технології розкриття нафтогазових пластів.

Висновки

1. На основі теоретичного аналізу та експериментальних досліджень обґрунтовано переваги імпульсного режиму формування водополімерного струменя для підвищення ефективності перфорації нафтогазових свердловин. Визначено ключовий параметр оптимізації процесу: частота пульсацій має відповідати максимуму дисипативної функції.

2. Створено нову конструкцію гідроімпульсного перфоратора, що дозволяє ефективніше здійснювати водополімерну перфорацію нафтогазових свердловин. Наукова новизна та практична значущість розробки полягає у досягненні вищих показників процесу завдяки запропонованим конструктивним удосконаленням.

Напрями подальших досліджень. Проведена робота відкриває значні перспективи для подальшого вдосконалення технології водополімерної гідроімпульсної перфорації. Подальші наукові та інженерні пошуки доцільно зосередити на кількох ключових напрямках, що дозволять не лише оптимізувати існуючу розробку, але й розширити сферу її застосування.

По-перше, пріоритетним завданням є розробка математичної моделі для прогнозування оптимальної частоти імпульсів залежно від конкретних геолого-фізичних умов: типу гірської породи, її пористості, проникності та механічних властивостей, а також пластового тиску і температури. Створення такої моделі дозволить ще на етапі планування робіт обирати оптимальні параметри робочої рідини (тип полімеру, його концентрацію та молекулярну масу) і режими роботи перфоратора, що значно підвищить ефективність та передбачуваність результатів.

По-друге, перспективним є дослідження нових полімерних композицій та добавок до робочої рідини. Вивчення впливу наночастинок, поверхнево-активних речовин або сумішей різних полімерів може призвести до створення рідин з унікальними реофізичними властивостями. Це дозволить посилити руйнівну здатність струменя, підвищити його стабільність на великих відстанях від сопла та зменшити екологічне навантаження шляхом використання біорозкладних компонентів.

По-третє, важливим етапом є створення "інтелектуальної" системи керування перфоратором. Це передбачає оснащення пристрою датчиками зворотного зв'язку (наприклад, тиску, вібрації, акустичними сенсорами), які б у режимі реального часу відстежували процес перфорації нафтогазових свердловин. Аналіз цих даних за допомогою бортового мікропроцесора дозволить би автоматично коригувати частоту та форму імпульсів шляхом регулювання положення ротора, адаптуючи роботу перфоратора до змін у властивостях пласта. Це виведе технологію на новий рівень автоматизації та ефективності.

Нарешті, необхідно провести повномасштабні промислові випробування розробленого гідроімпульсного перфоратора на реальних свердловинах. Це дозволить не тільки підтвердити отримані лабораторні результати, але й оцінити довговічність та надійність конструкції, відпрацювати технологічні регламенти його застосування та зібрати дані для подальшої оптимізації.

Комплексна реалізація цих напрямів досліджень сприятиме створенню високоефективної, енергоощадної та екологічно безпечної технології інтенсифікації видобутку вуглеводнів, що має значний потенціал для широкого впровадження в нафтогазовій промисловості.

Список використаних джерел:

1. Чорний М. І., Чорний О. М., Метошоп І. М., Кузів І. М. *Геологічні основи розкриття і випробування продуктивних пластів*. Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2013. 306 с.
2. Бойко В. С. *Підземний ремонт свердловин* : підручник : у 4 ч. Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2009. Ч. 3. 809 с.
3. Pogrebnyak V. G., Naumchik N. V. Hydrodynamic activity of polymers in high-velocity flows. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 1995. Vol. 68, no. 1. P. 138–140.
4. Погребняк В. Г., Погребняк А. В. Технології високоефективного гідрорізання. *Актуальні напрями розвитку технічного та виробничого потенціалу національної економіки: монографія* за ред. В. О. Пінчук, Г. С. Прокудіна. Дніпро : Пороги, 2021. С. 84–99.
5. Pogrebnyak V. G., Chudyk I. I., Pogrebnyak A. V., Perkun I. V. Perforation of oil and gas wells by a high-velocity jet of polymer solution. *Nafta-Gaz*. 2022. No. 78(1). P. 3–12. DOI:10.18668/NG.2022.01.01
6. Pogrebnyak V. G., Chudyk I. I., Pogrebnyak A. V., Perkun I. V. High-efficiency Casing Perforation Oil and Gas Wells. *SOCAR Proceedings*. 2021. No.2. P. 112–120. DOI: 10.5510/OGP2021SI200578
7. Perkun I., Pogrebnyak V., Szymanskiy V. Perforation of casing strings in oil and gas wells with a polymer solution jet: scientific and practical aspects. *Trends in petroleum engineering*. 2025. Vol. 5, no. 1. P. 1–7. DOI: 10.53902/TPE.2025.05.00045.
8. Спосіб гідроструминної перфорації свердловин: пат. на корисну модель № 150245, Україна. МПК (2022.01) E21B43/00 E21B 43/14 (2006.01) / Погребняк В. Г., Перкун І. В., Погребняк А. В., Шиманський В. Я. № u 2021 04406, заявл. 29.07.2021, опубл. 19.01.2022. Бюл. № 3.
9. Погребняк В. Г., Волошин В. С. Екологічна технологія створення водозахисних екранів: монографія. Донецьк: Ноулідж, 2010. 482 с. URL: <https://scholar.google.com/citations?user=rwvMpTQAAAAJ&hl=en&oi=sra>
10. Pogrebnyak V. G., Naumchuk N. V., Maksyutenko S. N. Use of heat carriers with hydrodynamically active additives. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Energetika*. 1982. No. 5. P. 109–111.
11. Pogrebnyak V. G., Perkun I. V., Pogrebnyak A. V. Displacement of Oil from Porous Bed by the Oscillating Flow of Polymer Solution. *American Journal of Science, Engineering and Technology*. 2017. Vol. 2, no. 1. P. 53–57.
12. Ferry J. D. *Viscoelastic Properties of Polymers*. New York : John Wiley & Sons, 1961. 482 p.

-
13. Middleman S. *The Flow of High Polymers: Continuum and Molecular Rheology*. New York : Interscience Publishers, 1968. 245 p.
 14. Vinogradov G. V., Malkin A. Ya. *Rheology of Polymers*. M.: Mir Publishers; Berlin: Springer-Verlag, 1980. 468 p.
 15. Kleiman R. N. Analysis of the oscillating-cup viscometer for the measurement of viscoelastic properties. *Physical Review A*. 1987. Vol. 35, no. 1. P. 261–275.
 16. Ferry J. D. Relaxations in Polymer Solutions, Liquids, and Gels // *Physical Acoustics: Principles and Methods*. ed. by W. P. Mason. New York; London: Academic Press. 1965. Vol. II, part B. P. 1–115.
 17. Pogrebnyak A., Pogrebnyak V. The Elastic Deformations and Anomalously High Cutting Ability of a Polymer Solution Jet. *Scientific Journal of the Ternopil National Technical University*. 2017. No. 1 (85). P. 89–94.
 18. Elyashevich G. K. Thermodynamics and kinetics of orientational crystallization of flexible chain polymers. *Advances in Polymer Science*. 1982. Vol. 43. P. 205–245.
 19. Гідроімпульсний перфоратор : пат. 152383 Україна : МПІК Е21В 43/114 / Погребняк В. Г., Перкун І. В., Погребняк А. В., Шиманський В. Я. № u202202267 ; заявл. 30.06.2022 ; опубл. 18.01.2023, Бюл. № 3.
 20. Pogrebnyak V. G., Chudyk I. I. Solutions of Polymers in the Oil and Gas Technologies. *Prospects for developing resource-saving technologies in mineral mining and processing : multi-authored monograph*. Petrosani : UNIVERSITAS Publishing, 2022. P. 110–294. DOI: 10.31713/m1106.

References:

1. Chornyi, M. I., Chornyi, O. M., Metoshop, I. M., & Kuziv, I. M. (2013). *Heolohichni osnovy rozkryttia i vyprovuvannia produktyvnykh plastiv* [Geological bases of disclosure and testing of productive layers]. Ivano-Frankivsk: IFNTUNH.
2. Boiko, V. S. (2009). *Pidzemnyi remont sverдловyn: pidruchnyk: u 4 ch.* [Underground well repair: textbook: in 4 parts] (Ch. 3). Ivano-Frankivsk: IFNTUNH.
3. Pogrebnyak, V. G., & Naumchik, N. V. (1995). Hydrodynamic activity of polymers in high-velocity flows. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 68(1), 138–140.
4. Pogrebnyak, V. H., & Pogrebnyak, A. V. (2021). Tekhnolohii vysokoefektyvnoho hidrorizannia [Technologies of highly effective hydrocutting]. In V. O. Pinchuk & H. S. Prokudina (Eds.), *Aktualni napriamy rozvytku tekhnichnoho ta vyrobnychoho potentsialu natsionalnoi ekonomiky: monohrafiia* [Current directions of development of the technical and production potential of the national economy: monograph] (pp. 84–99). Dnipro: Porohy.
5. Pogrebnyak, V. G., Chudyk, I. I., Pogrebnyak, A. V., & Perkun, I. V. (2022). Perforation of oil and gas wells by a high-velocity jet of polymer solution. *Nafta-Gaz*, 78(1), 3–12. <https://doi.org/10.18668/NG.2022.01.01>
6. Pogrebnyak, V. G., Chudyk, I. I., Pogrebnyak, A. V., & Perkun, I. V. (2021). High-efficiency Casing Perforation Oil and Gas Wells. *SOCAR Proceedings*, (2), 112–120. <https://doi.org/10.5510/OGP2021SI200578>
7. Perkun, I., Pogrebnyak, V., & Szymanskiy, V. (2025). Perforation of casing strings in oil and gas wells with a polymer solution jet: scientific and practical aspects. *Trends in petroleum engineering*, 5(1), 1–7. <https://doi.org/10.53902/TPE.2025.05.00045>
8. Pogrebnyak, V. H., Perkun, I. V., Pogrebnyak, A. V., & Shymanskyi, V. Ya. (2022). *Sposib hidrostrumynnoi perforatsii sverдловyn* [Method of hydrojet perforation of wells] (Patent No. 150245). Ukrainskyi instytut intelektualnoi vlasnosti (Ukrpatent).
9. Pogrebnyak, V. G., & Voloshyn, V. S. (2010). *Ekolohichna tekhnolohiia stvorennia vodozakhysnykh ekraniv: monohrafiia* [Ecological technology for creating water protection screens: monograph]. Donetsk: Knowledge. <https://scholar.google.com/citations?user=rwvMpTQAAAAJ&hl=en&oi=sra>
10. Pogrebnyak, V. G., Naumchuk, N. V., & Maksyutenko, S. N. (1982). Use of heat carriers with hydrodynamically active additives. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Energetika*, (5), 109–111.
11. Pogrebnyak, V. G., Perkun, I. V., & Pogrebnyak, A. V. (2017). Displacement of Oil from Porous Bed by the Oscillating Flow of Polymer Solution. *American Journal of Science, Engineering and Technology*, 2(1), 53–57.
12. Ferry, J. D. (1961). *Viscoelastic Properties of Polymers*. John Wiley & Sons.
13. Middleman, S. (1968). *The Flow of High Polymers: Continuum and Molecular Rheology*. Interscience Publishers.
14. Vinogradov, G. V., & Malkin, A. Ya. (1980). *Rheology of Polymers*. Mir Publishers; Springer-Verlag.
15. Kleiman, R. N. (1987). Analysis of the oscillating-cup viscometer for the measurement of viscoelastic properties. *Physical Review A*, 35(1), 261–275.
16. Ferry, J. D. (1965). Relaxations in Polymer Solutions, Liquids, and Gels. In W. P. Mason (Ed.), *Physical Acoustics: Principles and Methods* (Vol. II, part B, pp. 1–115). Academic Press.
17. Pogrebnyak, A., & Pogrebnyak, V. (2017). The Elastic Deformations and Anomalously High Cutting Ability of a Polymer Solution Jet. *Scientific Journal of the Ternopil National Technical University*, (1(85)), 89–94.
18. Elyashevich, G. K. (1982). Thermodynamics and kinetics of orientational crystallization of flexible chain polymers. *Advances in Polymer Science*, 43, 205–245.

-
19. Pogrebniyak, V. H., Perkun, I. V., Pogrebnyak, A. V., & Shymanskyi, V. Ya. (2023). *Hidroimpulsnyi perforator* [Hydro-impulse perforator] (Patent No. 152383). Ukrainskyi instytut intelektualnoi vlasnosti (Ukrpatent).
20. Pogrebnyak, V. G., & Chudyk, I. I. (2022). Solutions of Polymers in the Oil and Gas Technologies. In *Prospects for developing resource-saving technologies in mineral mining and processing: multi-authored monograph* (pp. 110–294). UNIVERSITAS Publishing. <https://doi.org/10.31713/m1106>

Дата надходження статті: 06.10.2025

Дата прийняття статті: 10.11.2025

Опубліковано: 30.12.2025