

СТАТИСТИЧНА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ІМПЛОЗІЙНОГО ГЕНЕРАТОРА ДЛЯ АКТИВІЗАЦІЇ ВИДОБУТКУ ВУГЛЕВОДНІВ

Віктор Сліденко

доктор технічних наук, доцент кафедри автоматизації електротехнічних та мехатронних комплексів
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
просп. Берестейський, 37, Київ, Україна, 03056, Україна, ViktorSlidenko@gmail.com
ORCID: 0000-0003-1799-784X

Любов Марчук

аспірантка кафедри автоматизації електротехнічних та мехатронних комплексів
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
просп. Берестейський, 37, Київ, Україна, 03056, marchuk@iill.kpi.ua
ORCID: 0000-0002-2099-4538

Мета статті – дослідити проблему ефективності впливу імпульсного генератора у статистично допустимих межах технологічних параметрів для активізації видобутку вуглеводнів імпульсним очищенням фільтраційної зони нафтової свердловини; визначити статистично допустимі межі технологічних параметрів у процесі імпульсної дії та встановити критичні головні параметри: швидкість потоку рідини в імпульсному каналі, його оптимальну довжину, тиск гідроудару та їх імовірність реалізації. Обґрунтовано статистичну оцінку ефективності імпульсного генератора з мембранним клапаном як комплекс імовірнісних величин для реалізації способу постійного очищення привибійної зони пластової системи в процесі видобутку нафти без зупинки виробництва. Уперше сформульовано вимоги до технологічних параметрів у процесі реалізації ефекту імпульсу з урахуванням імовірності їх реалізації в раціональному діапазоні з визначенням числових характеристик випадкових величин для рівномірного та нормального законів розподілу. Отримані залежності дають змогу сформулювати вимоги до параметрів імпульсного генератора та умов його практичного застосування для підвищення видобутку вуглеводнів без зупинки процесу видобутку та оцінити ефективність імпульсного генератора з урахуванням статистичних характеристик технологічних параметрів.

Ключові слова: імпульсний генератор, мембранний клапан, нафтова свердловина, нафта, видобуток вуглеводнів, числові характеристики, імовірність.

Вступ. Проблема підвищення продуктивності нафтових свердловин України актуальна, і для її вирішення використовуються різноманітні засоби, які сприяють очищенню фільтраційної зони свердловини, що призводить до збільшення продуктивності видобутку вуглеводнів [1; 2]. Проте проведення таких робіт здебільшого здійснюється під час проведення поточних або капітальних ремонтів, після чого в міжремонтному циклі зони перфорації обсадної колони знову кольматуються, що призводить знову до зниження продуктивності видобутку вуглеводнів [3].

Завдання статистичного прогнозування ефективності видобутку вуглеводнів є актуальним. Для його вирішення розглядаються різні підходи до прогнозування та визначення ефективності видобутку. Так, на основі досліджень 71 родовища нафти на норвезькому континентальному шельфі за період із 1995 до 2020 р. підтверджено ефективність досліджень із використанням комбінованих способів статистичного аналізу [4].

У роботі [5] досліджено механізм та особливості вилучення нафти з нафтошлему, застосування акустичних методів та умов роботи, які статистично визначають ефективність вилучення нафти з нафтошлему в ультразвукових полях. Автори роблять висновок, що енергія всередині кавітаційних бульбашок зростає зі зменшення частоти, сприяючи розпаду маслянистого шлему.

Важливою з погляду методики дослідження є робота, у якій оцінюється надійність інтервалу прогнозування для Гаусових процесів методом перехресної перевірки [6] та розглянуто проблему оптимізації технологічних параметрів для оцінки моделі, включаючи поняття ймовірності.

Мета статті – обґрунтувати спосіб постійного очищення привибійної зони пластової системи в процесі видобутку нафти із застосуванням генератора імпульсної дії, який установлюється на насосно-компресорних трубах (НКТ), що, своєю чергою, кріпляться до видобувного штангового насоса; дослідити статистичні характеристики

генерації імпульсу тиску імпульзійним генератором та визначити величину імпульсу тиску, а також імовірність його реалізації в раціональній зоні з урахуванням рівномірного розподілу числових характеристик для випадкової величини – густини пластової нафти; дослідити статистичні характеристики за нормальним розподілом (розподілом Гауса) з визначенням числових характеристик для випадкової величини – об’ємного модулю пружності пластової нафти; визначити силові характеристики процесу імпульзії з урахуванням екстремальних та ймовірнісних параметрів й оцінити діапазон генерації імпульсів тиску з урахуванням імовірності реалізації.

Основна частина. Імпульзійний генератор опускають у свердловину під час установки штангового насоса з кріпленням до нього через НКТ (рис. 1).

Під час відкачування нафти штанговим насосом у каналі НКТ між штанговим насосом та імпульзійним генератором падає тиск і виникає депресія [3; 7]. Під дією гідростатичного тиску в затруб’ї відкривається імпульсний мембранний клапан генератора, і рідина із зони високого тиску в затруб’ї швидко поступає в імпульзійний канал низького тиску, а на її місце падає стовп рідини над генератором, що призводить до різкого підвищення тиску в зоні перфорації.

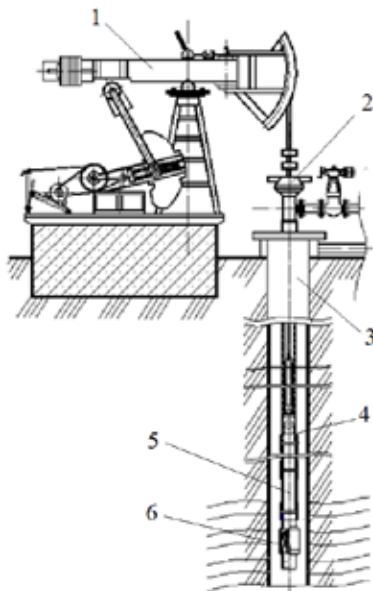


Рис. 1. Схема установки імпульзійного генератора з гідравлічним приводом від штангового насоса:
1 – верстат-гойдалка; 2 – фонтанна арматура;
3 – обсадна колона; 4 – штанговий насос; 5 – НКТ з імпульзійним каналом; 6 – імпульзійний генератор

Таким чином, реалізується ефект, наближений до ефекту імпульзії [8].

Швидкість руху рідини в імпульзійному каналі НКТ залежно від його довжини (рис. 2) визначається [8]:

$$w(x) = \phi \sqrt{\frac{2p_0 \cdot d}{\rho \cdot \lambda \cdot x} \left[1 - \exp\left(-\frac{\lambda(x-l_0)}{d}\right) \right]}, \quad (1)$$

де ϕ – коефіцієнт швидкості, прийнятий для даної конструкції $\phi=0,71$; p_0 – перепад тиску на клапані, $p_0=1,364$ МПа; ρ – густина рідини, $\rho = 1000$ кг/м³; d – внутрішній діаметр каналу, $d = 0,059$ м; λ – коефіцієнт гідравлічного опору тертя, $\lambda = 0,02$; x – довжина імпульзійного каналу; l_0 – розмір, який характеризує втрати довжини імпульзійного каналу через монтаж імпульсного клапану, $l_0 = 0,01$ м, що відповідає параметрам для імпульзійного генератора (рис. 2) та рекомендаціям [3].

Підвищення тиску від різкого перекриття руху рідини імпульсним клапаном імпульзійного генератора визначається за формулою Жуковського [9]:

$$p(x) = \rho \cdot c \cdot w \quad (2)$$

Отримані за формулами (1) та (2) графіки залежностей швидкості та тиску в рідині від довжини x імпульзійного каналу наведено на рис. 3.

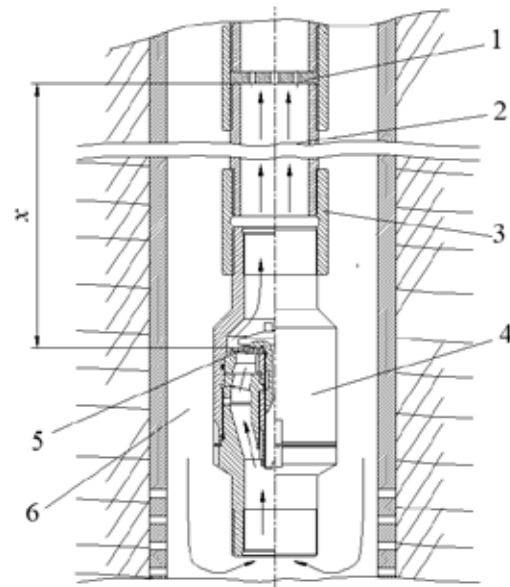


Рис. 2. Конструктивна схема установки імпульзійного генератора: 1 – обмежувач імпульзійного каналу; 2 – імпульзійний канал; 3 – муфта; 4 – імпульзійний генератор; 5 – мембранний клапан; 6 – затрубний простір

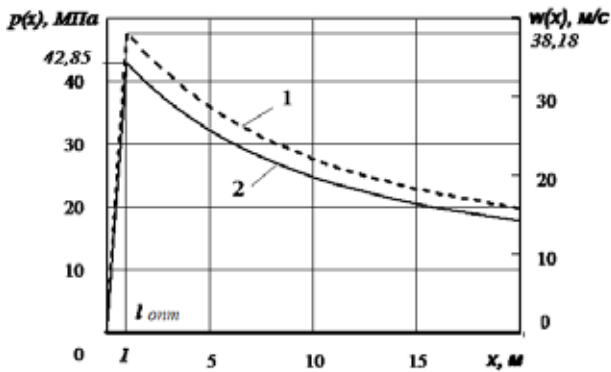


Рис. 3. Залежність швидкості імпульсійного потоку (1) та підвищення імпульсійного тиску (2) від довжини імпульсійного каналу

Як випливає з формули (1), значний вплив на силові параметри має густина рідини.

Розглянемо фізичні умови під час проведення видобутку, за яких густина рідини змінюється в широкому діапазоні. Основні з них:

а) під час проведення видобутку нафти куштовим методом можливі періодичні потрапляння пластової води з нагнітальної свердловини в добувну, що призводить до збільшення густини нафти й обводнення нафтової свердловини;

б) під час запуску нафтової свердловини після її глушіння соляними розчинами можливе досягнення максимального значення густини флюїдів (суміш нафти з водою, солями та газом) до 1000 кг/м³;

в) під час потрапляння попутного газу в свердловину можливе різке зменшення густини нафти аж до 400 кг/м³.

Можливі й інші технологічні чинники, які впливають на густину нафти.

Ураховуючи достатню продовжність циклу видобутку нафти, приймаємо гіпотезу, що всі ці чинники рівнозначно впливають на зміну густини нафти як випадкової величини за рівномірним розподілом імовірності.

Ураховуючи визначення швидкості звуку в рідині:

$$c = \sqrt{\frac{\rho}{E}}, \quad (3)$$

де E – об’ємний модуль пружності сирової нафти, який, як і густина, має широкий діапазон значень і може розглядатись як випадкова величина. Відповідно, і швидкість звуку має широкий діапазон значень.

Визначимо можливі діапазони значень густини і модулю пружності методом максимуму –

мінімуму, який полягає у визначенні їхніх крайніх значень як двох випадкових величин, відповідно для двох математичних аналогів – формул (1) і (2) з урахуванням залежності (3).

Густина пластової нафти має зазвичай значення 400–800 кг/м³ і зі збільшенням газовмісту нафти і температури зменшується проти густини сепарованої нафти на 20–40% і більше. За густиною пластові нафти поділяють на легкі (менше 850 кг/м³) і важкі (понад 850 кг/м³). Нафту густиною понад 1000 кг/м³ називають *мальтою* [10].

Проведемо оцінку статистичних параметрів у межах вибірки значень густини нафти як випадкової величини X із рівномірним розподілом на ділянці від $a=400$ кг/м³ до $b=1100$ кг/м³, і її щільність імовірності $f(x)$ на цій ділянці постійна [11]:

$$\begin{cases} \frac{1}{b-a} & \text{при } x \in (a,b) \\ 0 & \text{при } x \notin (a,b) \end{cases} \quad (4)$$

Тоді статистичні параметри визначаються так [12]: математичне сподівання – $m_x=(a+b)/2=750$ кг/м³; дисперсія – $D_x=(b-a)^2/12=4,083 \cdot 10^4$ кг²/м⁶; середнє квадратичне відхилення – $\sigma_x = \sqrt{D_x} = 202,073$ кг/м³; коефіцієнт варіації – $v = \sigma_x / m_x = 0,269$; моди M_x рівномірний розподіл не має; медіана, виходячи із симетрії: $x_m = m_x = 750$ кг/м³; через симетрію третій центральний момент випадкової величини X дорівнює нулю: $\mu_3 = \mu_3 / \sigma_x^3 = 0$; відповідно асиметрія (скошеність) $S_k = \mu_3 / \sigma_x^3 = 0$; четвертий центральний момент $\mu_4 = (b-a)^4/80 = 3,001 \cdot 10^9$ кг⁴/м¹²; ексцес $\varepsilon_x = \mu_4 / \sigma_x^4 - 3 = -1,2$, отже, ексцес від’ємний, що підтверджує плоско-вершинний розподіл.

Знайдемо імовірність попадання випадкової величини X , рівномірно розподіленої на ділянці (a, b) , на частину (α, β) у межах середнього квадратичного відхилення. Тобто: $\alpha = m_x - \sigma_x = 547,9$ кг/м³; $\beta = m_x + \sigma_x = 952,1$ кг/м³.

Імовірність потрапляння в зону (α, β) становить:

$$P\{\alpha < X < \beta\} = \frac{\beta - \alpha}{b - a} = 0.577 \quad (5)$$

На рис. 4 відображено функцію щільності ймовірності та діапазон (α, β) для визначення ймовірності потрапляння в нього.

Об’ємний модуль пружності E пластової нафти залежить від багатьох чинників. Центральна гранична теорема теорії ймовірності стверджує, що нормальний розподіл виникає тоді, коли дана випадкова величина являє собою суму великого числа незалежних випадкових величин, кожна

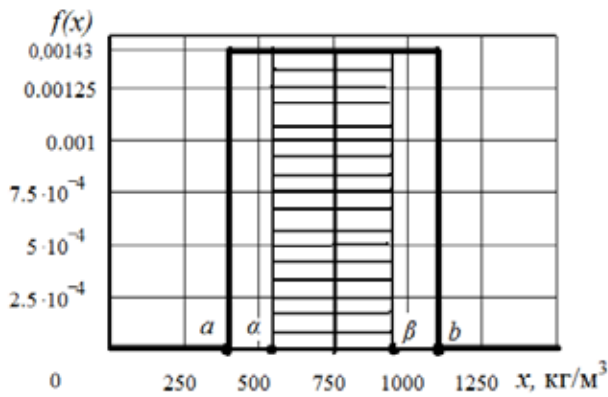


Рис. 4. Функція щільності ймовірності для рівномірного розподілу та діапазон (α , β) для визначення ймовірності потрапляння в нього

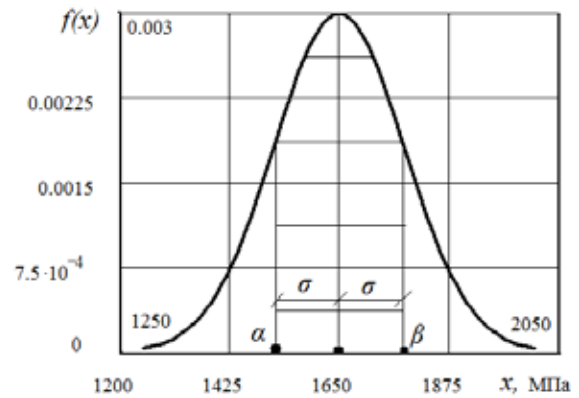


Рис. 5. Функція щільності ймовірності для нормального розподілу об'ємного модулю пружності нафти та діапазон (α , β) для визначення ймовірності потрапляння в нього

з яких відіграє незначну роль в утворенні всієї суми, то цілком обґрунтовується розподіл E як випадкової величини через нормальний розподіл Гауса [11; 12]. Оскільки зміна об'ємного модуля пружності пластової нафти допустима в межах від $E_{min}=1250$ МПа до $E_{max}=2050$ МПа, то, припускаючи, що здебільшого значення об'ємного модулю пружності стабілізується всередині інтервалу, а його крайні значення малоімовірні і тому відповідають правилу 3σ .

Основні параметри розподілу: центр розсіювання – $m=(E_{min}+E_{max})/2=1650$ МПа; середнє квадратичне відхилення – $\sigma=(m-E_{max})/3=133,3$ МПа; дисперсія – $D[x]=\sigma^2=1778$ МПа²; для третього порядку у зв'язку із симетричністю розподілу $\mu_3=0$ і коефіцієнт асиметрії $S_k=\mu_3/\sigma^3=0$; для четвертого порядку $\mu_4=3\cdot\sigma^4=9,481\cdot 10^8$ МПа⁴; ексцес для нормального розподілу – $\epsilon_x=\mu_4/\sigma^4_x-3=0$.

Крива нормального розподілу [11]:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}}. \quad (6)$$

Ймовірність потрапляння в зону математичного сподівання обмежена середнім квадратичним відхиленням. Тобто $\alpha=m-\sigma=1517$ МПа; $\beta=m+\sigma=1783$ МПа.

$$P\{\alpha < X < \beta\} = \frac{1}{\sqrt{2\cdot\pi}} \int_{\frac{\alpha-m}{\sigma}}^{\frac{\beta-m}{\sigma}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt = 0,683. \quad (7)$$

На рис. 5 наведено графік щільності ймовірності за нормальним законом розподілу з виділенням зони для визначення ймовірності потрапляння у цю зону, яка знаходиться в межах реалізації середнього квадратичного відхилення.

Швидкість рідини (пластової нафти) в імпульзійному каналі НКТ залежить від його довжини і визначається за формулою (1), де φ – коефіцієнт швидкості, прийнятий для даної конструкції $\varphi=0,71$; p_0 – перепад тиску на клапані, $p_0=1,364$ МПа; ρ – густина рідини, яка змінна і має мінімальне ($\rho_{min}=400$ кг/м³), максимальне ($\rho_{max}=1100$ кг/м³) і середнє (відповідне математичному сподіванню $\rho_m=750$ кг/м³) значення; d – внутрішній діаметр каналу, $d=0,059$ м; λ – коефіцієнт гідравлічного опору тертя, $\lambda=0,02$; x – довжина імпульзійного каналу; l_0 – розмір, який характеризує втрати довжини імпульзійного каналу через розташування імпульсного клапану, $l_0=0,3$ м. Тоді за формулою (1) $w_{min}(x)$ визначається за значення ρ_{max} , а $w_{max}(x)$ – за ρ_{min} , відповідно $w_m(x)$ – за ρ_m .

Швидкість звуку в рідині визначається за формулою (3) і залежить від густини та модулю об'ємної пружності E , який змінюється в межах розподілу Гауса: $E_{min}=1250$ МПа; $E_{max}=2050$ МПа; середнє значення, яке відповідає математичному сподіванню, $E_m=1650$ МПа. Відповідно $c_{max}=(E_{max}/\rho_{min})^{0,5}=2264$ м/с; $c_{min}=(E_{min}/\rho_{max})^{0,5}=1066$ м/с; $c_m=(E_m/\rho_m)^{0,5}=1483$ м/с. Значення тиску гідродару визначаються за формулою (2) і відповідно будуть: $p_{min}(x)=\rho_{min}\cdot c_{min}\cdot w_{min}(x)$; $p_{max}(x)=\rho_{max}\cdot c_{max}\cdot w_{max}(x)$; $p_m(x)=\rho_m\cdot c_m\cdot w_m(x)$.

На рис. 6 наведено графіки залежності швидкості від довжини імпульзійного каналу, яка визначається за формулою (1) від змінних значень густини, відповідно для крайні значень ρ_{min} та ρ_{max} , а також для ρ_m . Рис. 7 ілюструє залежності тиску гідродару при імпульзії від довжини імпульзійного каналу для комбінації параметрів: гус-

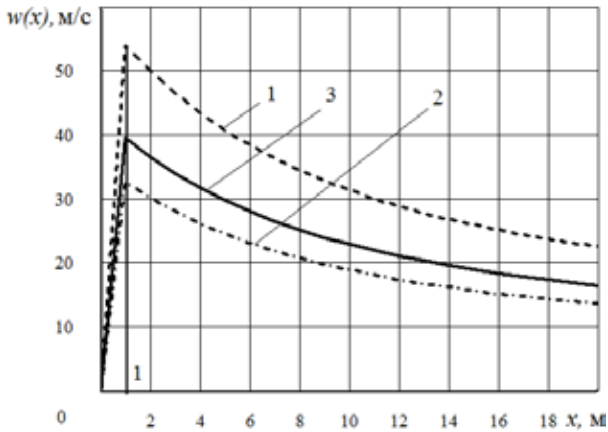


Рис. 6. Графіки швидкості залежно від змінних значень густини: 1 – $w_{\max}(x)$; 2 – $w_{\min}(x)$; 3 – $w_m(x)$

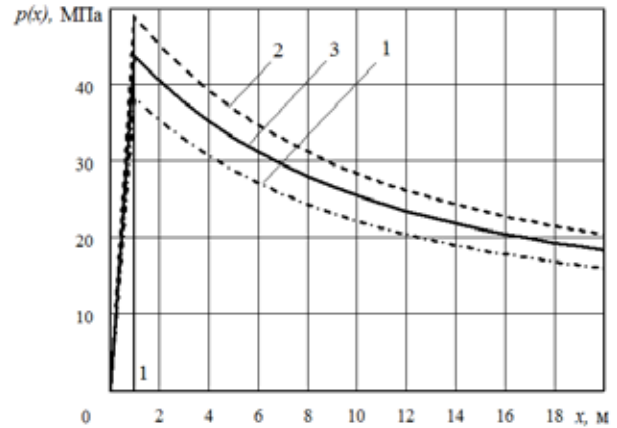


Рис. 7. Графіки тиску імпульсу залежно від змінних значень густини та модулю пружності: 1 – $p_{\min}(x)$; 2 – $p_{\max}(x)$; 3 – $p_m(x)$

тини, швидкості звуку та швидкості імпульсного потоку.

Як видно з рис. 7, максимальне значення тиску гідроудару досягається за довжини імпульсного каналу, наближено до 1 м. При цьому відповідні крайні та середні значення параметрів будуть: $w_{\max}(1)=53,99$ м/с; $w_{\min}(1)=32,55$ м/с; $w_m(1)=39,43$ м/с; $p_{\max}(1)=48,89$ МПа; $p_{\min}(1)=38,17$ МПа; $p_m(1)=43,86$ МПа.

Висновки. Застосування імпульсного генератора як постійного діючого генератора імпульсів тиску дасть змогу проводити в процесі експлуатації штангового насоса постійну динамічну дію на привибійну зону, очищуючи її від коьматантів і тим самим сприяючи підвищенню видобутку вуглеводнів.

Визначені кінематичні та силові параметри процесу імпульсу у разі перепаду тиску в затрубному просторі і тиску депресії 1,364 МПа, відповідно – швидкості рідини 38,183 м/с та тиску гідроудару 42,85 МПа та встановлена оптимальна довжина імпульсного каналу наближена до 1 м.

Установлені залежності швидкості рідини, тиску гідроудару від довжини імпульсного каналу з урахуванням характерних екстремальних та ймовірнісних параметрів: густини пластової нафти та її об'ємного модуля пружності. Крайні значення параметрів для густини 400...1100 кг/м³, математичне сподівання 750 кг/м³ за ймовірності 0,577 для рівномірного розподілу в межах середньоквадратичного відхилення $\pm 202,073$, кг/м³, що дає змогу реалізувати на практиці раціональний діапазон швидкості потоку рідини в імпульсному каналі в межах 32,55... 53,99 м/с.

Для об'ємного модулю пружності в межах 1250...2050 МПа і математичного сподівання 1650 МПа, за ймовірності 0,683 для нормального розподілу Гауса, із середнім квадратичним відхиленням $\pm 133,33$ МПа, на практиці можлива реалізація величини гідроудару в межах 38,17...48,89 МПа, що забезпечує ефективне очищення перфораційної зони нафтової свердловини від коьматантів та сприяє підвищенню видобутку вуглеводнів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Світлицький В.М., Ягодовський С.І., Галустян Г.Р. Поточний та капітальний ремонт свердловин. Київ : Логос, 2001. 344 с.
2. Тарко Я.Б. Підвищення продуктивності свердловин здійсненням гідроімпульсної імпульсної дії на привибійну зону пласта. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2008. № 3. С. 17–21.
3. Лістовщик Л.К., Сліденко В.М., Лісовол О.П. Мехатронна система імпульсного впливу на привибійну зону пласта нафтової свердловини. *Енергетика, економіка, технології, екологія*. 2016. № 4(46). С. 66–71.
4. Nesvold E., Bratvold R.B. Debiasing probabilistic oil production forecasts, *Energy*. 2022. Vol. 258. P. 124744.
5. Luo, H. Gong, Z. He, P. Zhang, and L. He, Research on mechanism and characteristics of oil recovery from oily sludge in ultrasonic fields, *Journal of Hazardous Materials*. 2020. Vol. 399. P. 123137.
6. Acharki N., Bertocello A., Garnier J., Robust prediction interval estimation for Gaussian processes by cross-validation method. *Computational Statistics & Data Analysis*. 2023. Vol. 178. P. 107597.
7. Сліденко В.М., Калюш М.П. Моделювання гідродинамічних процесів функціонування генератора коли-

вань. *Матеріали науково-технічної конференції «Енергетика. Екологія. Людина»*. Київ : НТУУ «КПІ», ІЕЕ, 2013. С. 8–11.

8. Яремійчук Р.С. Сучасні проблеми буріння свердловин. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2001. № 1. С. 32–35.

9. Братах М.І. Методика розрахунку умов виникнення гідроудару. *Інтегровані технології та енергозбереження*. 2014. № 1. С. 40–44.

10. Punanova, S.A. Supergene transformed naphthides: Peculiarities of trace-element composition. *Geochem. Int.* 52, 57–67 (2014).

11. Gorbenko, I., Kandiy C., Ostrianska, Y. Comparison of the quality of sampling algorithms from discrete normal distribution on NTRU lattices. *Radiotekhnika*, 2022. 2(209), 29–37.

12. Іванюта І.Д., Рибалка В.І., Рудоміно-Дусятська І.А. Елементи теорії ймовірностей та математичної статистики. Київ, 2006. 272 с.

STATISTICAL EVALUATION OF THE PERFORMANCE OF AN IMPLOSION GENERATOR FOR ENHANCED HYDROCARBON PRODUCTION

Viktor Slidenko

Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor at the Department of Automation of Electrical and Mechatronic Complexes

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, 37 Beresteyskyi ave., Kyiv, Ukraine, 03056, ViktorSlidenko@gmail.com

ORCID: 0000-0003-1799-784X

Liubov Marchuk

PhD Student at the Department of Automation of Electrical and Mechatronic Complexes

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, 37 Beresteyskyi ave., Kyiv, Ukraine, 03056, marchuk@iit.kpi.ua

ORCID: 0000-0002-2099-4538

To investigate the problem of the effectiveness of the impact of an implosion generator within the statistically acceptable limits of technological parameters to enhance hydrocarbon production by pulse cleaning of the filtration zone. To determine the statistically permissible limits of technological parameters in the process of implosion action and to establish the critical main parameters: fluid flow rate in the implosion channel, its optimal length, water hammer pressure and their probability of realization.

Use of statistical analysis methods, in particular, determination of statistical characteristics by a normal distribution (Gaussian distribution) with obtaining numerical characteristics for a random variable. Determination of the characteristics of the implosion process, considering extreme and probabilistic parameters.

The statistical evaluation of the efficiency of an implosion generator with a diaphragm valve as a complex of probability values for the implementation of a method of continuous cleaning of the bottomhole zone of a reservoir system in the process of oil production without stopping production is substantiated.

The requirements for technological parameters in the process of implementing the implosion effect are formulated, taking into account the probability of their implementation, in a rational range, with the definition of numerical characteristics of random variables for uniform and normal distribution laws.

The obtained dependencies make it possible to formulate requirements for the parameters of the implosion generator and the conditions of its practical application to increase hydrocarbon production without stopping the production process and to evaluate the efficiency of the implosion generator taking into account the statistical characteristics of technological parameters.

Key words: implosion generator, diaphragm valve, oil, hydrocarbon production, numerical characteristics, probability.

REFERENCES

1. Svitlytsky V.M., Yahodovs'kyi S.I., Halustyan H.R. (2001) Potochnyy ta kapitalnyy remont sverdlovyh [Current and capital repair of wells]. Kyiv: Lohos [in Ukrainian].

2. Tarko, Y.B (2008) Pidvyshchennya produktyvnosti sverdlovyh zdiysnenniam hidroimpulsnoyi imploziynoyi diyi na pryvybiynu zonu plasta [Increasing the productivity of wells by implementing hydropulse implosion action on the near-breakout zone of the formation] *Rozvidka ta rozrobka*

naftovykh i hazovykh rodovyshch – Exploration and development of oil and gas deposits, 3, 17–21 [in Ukrainian].

3. Listovshchik L., Slidenko V., Lisovol O. (2016) Mekhatronna systema imploziynoho vplyvu na pryvybiynu zonu plasta naftovoyi sverdlovyh [Mechatronic system of implosion action on a bottomhole zone of the oil well] *Power engineering: economics, technique, ecology*. Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 4(46), 66–71 [in Ukrainian].

4. Nesvold E., Bratvold R.B., (2022) Debiasing probabilistic oil production forecasts, *Energy*, 258.
5. Luo, H. Gong, Z. He, P. Zhang, and L. He, (2020) Research on mechanism and characteristics of oil recovery from oily sludge in ultrasonic fields, *Journal of Hazardous Materials*, 399.
6. Acharki N., Bertonecello A., Garnier J., (2023) Robust prediction interval estimation for Gaussian processes by cross-validation method, *Computational Statistics & Data Analysis*, 178, 107597.
7. Slidenko V.M., Kalyush M.P. (2013) Modelyuvannya hidrodinamichnykh protsesiv roboty heneratora kolyvan [Modeling of hydrodynamic processes of the operation of the oscillation generator] *Enerhiya. Ekolohiya. Lyudyna – Energy. Ecology. Man*, 1, 8–11 [in Ukrainian].
8. Yaremychuk, R.S. (2001) Suchasni problemy burinnya sverdlodyn. [Modern problems of well drilling]. *Rozvidka ta rozrobka rodovyshch nafty i hazu – Exploration and development of oil and gas deposits*. 1, 32–35 [in Ukrainian].
9. Bratakh M.I. (2014) Metodyka rozrakhunku umov vynyknennya hidroudaru. [Methodology for calculating the conditions for the occurrence of water hammer]. *Intehrovani tekhnolohiyi ta enerhozberezhennya – Integrated technologies and energy saving*, 1, 40–44 [in Ukrainian].
10. Punanova, S.A. (2014) Supergene transformed naphthides: Peculiarities of trace-element composition. *Geochem. Int.* 52, 57–67.
11. Gorbenko, I., Kandiy C., Ostrianska, Y. (2022) Comparison of the quality of sampling algorithms from discrete normal distribution on NTRU lattices. *Radiotekhnika*, 2(209), 29–37.
12. Ivanyuta I.D., Rybalka V.I., Rudomino-Dusyatska I.A. (2006) Elementy teorii ymovirnostey ta matematychnoyi statystyky [Elements of probability theory and mathematical statistics]. Kyiv: Slovo [in Ukrainian].

Стаття надійшла 08.06.2023