

МОНІТОРИНГ, ДІАГНОСТИКА ТА КЕРУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ ТА ОБЛАДНАННЯМ

MONITORING, DIAGNOSTICS AND CONTROL OF ENERGY PROCESSES AND EQUIPMENT.

УДК 622.276

DOI 10.20535/1813-5420.4.2024.315569

В. М. Сліденко¹, д-р. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0001-9313-331X
С.П. Шевчук¹, д-р. техн. наук, проф., ORCID 0000-0002-7517-0501
Л.К. Лістовщик¹, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0003-3413-1802
В. О. Бут¹, аспірант, ORCID 0009-0003-7024-1184
¹Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

АДАПТИВНА ІМПУЛЬСНА СИСТЕМА ВПЛИВУ З ПОВЕРХНІ НА ПРИВИБІЙНУ ЗОНУ НАФТОВОЇ СВЕРДЛОВИНИ

В даній статті досліджено функціонування адаптивної імпульсної системи з електрогідравлічним приводом для впливу на привибійну зону нафтової свердловини з поверхні без зупинки видобутку вуглеводнів. Особливу увагу приділено визначенню структури та функцій електрогідравлічного приводу імпульсної системи та визначено раціональну зону спрацювання імпульсного генератора імпульсів з встановленням обмежень на його функціонування. В статті наведено математичну модель імпульсного процесу та функціонально-логістичну модель адаптації імпульсної системи до умов робочого середовища. Розглянуто варіант компоновки системи з встановленням імпульсного генератора імпульсів на насосному агрегаті для дії з поверхні на привибійну зону нафтової свердловини. Визначено раціональну довжину імпульсної камери та встановлено область функціонування адаптивної імпульсної системи з генерацією раціональних значень тиску гідроудару. Експериментально встановлено, що одним з напрямків застосування адаптивної імпульсної системи є можливість генерації частотного режиму з виникненням резонансних коливань тиску в привибійній зоні нафтової свердловини, що дозволить значно підвищити ефективність запропонованої системи.

В роботі наведені результати промислової апробації адаптивної імпульсної системи з електрогідравлічним керуванням попередньої модифікації за промислових умов України. Наведена характеристика пристроїв, які були застосовані в процесі промислової апробації.

Ключові слова: адаптація, електрогідравлічна система, генератор імпульсів, математична модель, імпульсія, прямий гідроудар, вуглеводні, нафтова свердловина.

Вступ

Підвищення дебіту нафтових свердловин є проблемою енергетичної незалежності не тільки в Україні, але й у всьому світі. Для підвищення дебіту використовуються різноманітні засоби, які сприяють очищенню фільтраційної зони свердловини, що призводить до збільшення притоку нафти в свердловину і, відповідно, до підвищення продуктивності видобутку вуглеводнів [1, 2]. Проведення робіт, які значимо впливають на збільшення продуктивності в більшості випадків здійснюється під час проведення поточних або капітальних ремонтів, які проводяться при тимчасовій повній зупинці видобутку вуглеводнів. Після проведення ремонтів значний час відводиться для запуску свердловини в експлуатацію. Проте вже в міжремонтному циклі зона перфорації знову кольматується, що призводить знову до зниження продуктивності видобутку та необхідності проведення нових ремонтних робіт [3].

Застосування генераторів імпульсів тиску для проведення ремонтних робіт проводиться з поверхні [4] або, в більшості випадків, при опусканні обладнання до рівня перфораційних отворів в обсадній колоні за допомогою колтюбінгових установок або підйомного агрегату [5].

Доведена ефективність пристроїв з генерацією імпульсів тиску на основі реалізації прямого гідроудару, імпульсії чи ефекту Юткіна в залежності від технологічних умов робочого середовища, але при проведенні ремонтних робіт. Тому розробка і застосування технологій, які проводять профілактичний вплив на перфораційну зону і пластову систему без зупинки видобутку вуглеводнів або з короточасною

зупинкою, але без спуско-підйомних робіт, є актуальною проблемою. При цьому, актуальним є застосування адаптивних методів впливу на привибійну зону з урахуванням змінних статистичних характеристик технологічного процесу та пластової системи [6].

Мета та завдання

Метою дослідження є формування структури та розробка умов оптимізації технологічного процесу функціонування адаптивної імпульсної системи з застосуванням імпульсного генератора імпульсів, з розташуванням елементів системи на поверхні з дією на привибійну зону без зупинки видобутку вуглеводнів.

Завданнями є розробка умов оптимального функціонування адаптивної імпульсної системи з електрогідрравлічним приводом системи керування, з визначенням співвідношення конструктивних та технологічних параметрів імпульсного генератора імпульсів, розробка структури системи з формуванням функціонально-логістичної моделі адаптації до умов робочого середовища.

Матеріал і результати досліджень

На рис. 1 наведена структурна схема адаптивної імпульсної системи (АІС) з автономним гідрравлічним приводом та імпульзійним генератором імпульсів тиску.

АІС (рис.1) включає імпульзійний генератор імпульсів (ІГІ) та автономний електрогідрравлічний привод, в якому шестерневий насос (НШ) з електроприводом подає робочу рідину з бака (Б1) на електрогідрравлічний розподільвач (ЕГР), що керується програмованим логічним контролером (ПЛК) за показаннями датчиків тиску (ДТ1), (ДТ2). Датчики тиску контролюють поточний тиск в затрубному просторі (затруб'ї) свердловини при роботі насосного агрегату та при генерації імпульсу тиску ІГІ. Для підтримання, необхідного для роботи АІС, тиску в затруб'ї доцільне застосування насосного агрегату, наприклад, ЦА-320, який захищений від дії імпульсів регульованим дроселем (Др). При досягненні тиску в затруб'ї заданої величини, за подачею насосного агрегату, який реєструється датчиками тиску (ДТ1) та (ДТ2) (в цьому випадку показання датчиків практично співпадають) і передаються в ПЛК, який спрямовує керуючий сигнал через підсилювач на електрогідрравлічний розподільвач (ЕГР), який керує клапаном ІГІ, що прискорено відкриває приток рідини під тиском з свердловини в імпульзійну камеру (К1), яка розташована в ємності (Б2), наприклад, баку насосного агрегату. При цьому генерується імпульзійний потік, з наступним перекриттям потоку рідини на відстані L_k , що створює прямий гідроудар з генерацією хвилі репресії через затруб колони обсадних труб в зону перфорації. При цьому датчик тиску ДТ2 реєструє підвищений тиск гідроудару, а датчик тиску ДТ1 реєструє тиск, створений насосним агрегатом, оскільки і він і насосний агрегат захищений регульованим дроселем Др від гідроудару.

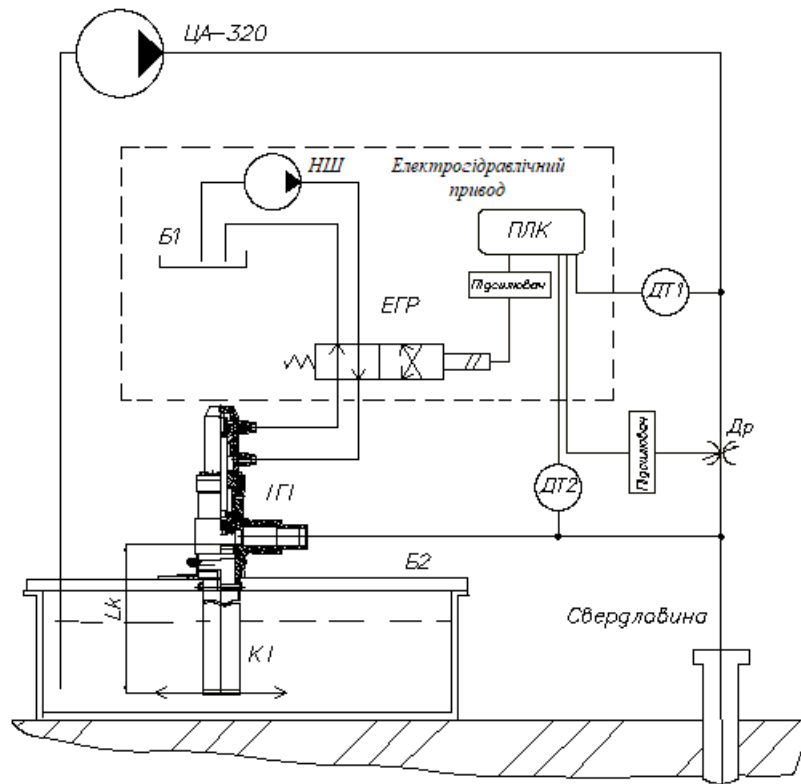


Рисунок 1 – Структурна схема адаптивної імпульсної системи

Тиск прямого гідроудару при імпульсному процесі в залежності від довжини $x=0...L_k$ імпульсної камери (КІ) та тиску p_0 в затруб'ї, від дії насосного агрегату, визначається залежністю з урахуванням формули Жуковського [2] :

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

Для визначення конструктивного параметру L_k – раціональної довжини імпульсної камери (КІ) розглянемо усереднені параметри процесу функціонування АІС: φ – коефіцієнт швидкості, прийнятий для даної конструкції $\varphi=0,71$; p_0 – тиск в свердловині, $p_0 = 5$ МПа; ρ – густина рідини, $\rho = 1000$ кг/м³; d – внутрішній діаметр імпульсної камери, $d=0,059$ м; λ – коефіцієнт гідравлічного опору тертя, $\lambda = 0,02$; x – довжина імпульсної камери, приймається $x=0, \dots, 1,3$ м; l_0 – розмір, який характеризує втрати довжини імпульсної камери через розташування механізму різкого перекриття, $l_0 = 0,07$ м; c – швидкість звуку в рідині, $c=1400$ м/с. .

Для визначення раціональної довжини камери, розглянемо залежність за умови постійного значення $p_0=5,5$ МПа. На рис. 2 наведена залежність за зазначених умов.

Як випливає з графіка рис.2 раціональний діапазон довжини імпульсної зони лежить в межах від $L_{kmin} = 0,2$ м до $L_{kmax} = 1,3$ м, що дозволило встановити дослідний зразок ІГІ безпосередньо над баком насосного агрегату ЦА-320 (рис.3) і провести випробування за виробничих умов [4].

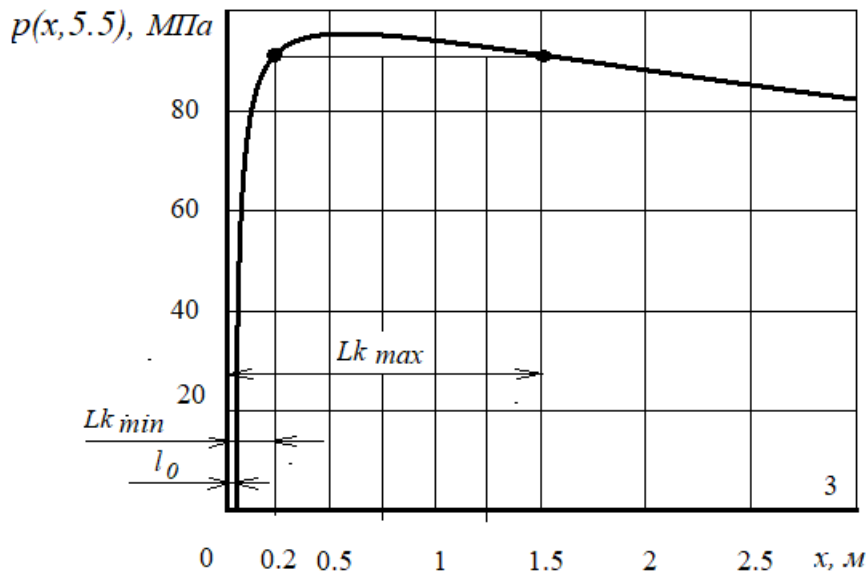


Рисунок 2 – Графік залежності тиску гідроудару на поверхневій частині свердловини від довжини L_k імпульсної камери КІ (рис.1)



Рисунок 3 – Установка дослідного зразка ІГІ над баком робочої рідини насосного агрегату ЦА-320: 1 – ІГІ, 2 – бак насосного агрегату; 3 – насосна установка

На рис. 4 наведений графік з визначенням раціональної області Ω функціонування адаптивної імпульсної системи за умови зміни довжини імпульсної камери в межах 0,2...0,4 м та тиску p_0 в межах 0...10 МПа за залежністю (1).

Для реалізації адаптивного керування системою слід враховувати два основних впливових чинники: глибину свердловини та спроможність пластової системи поглинати енергію імпульсів. В останньому випадку таке поглинання енергії сприяє підвищенню проникливості пластової системи, а отже - підвищенню продуктивності видобутку вуглеводнів.

Реалізація адаптивних функцій здійснюється підсистемами корекції: енергорозподілу, подачі рідини від насосного агрегату з тиском p_0 та продуктивністю Q ; амплітуди та частоти імпульсу тиску відбитого від вибою свердловини, який реєструється датчиком ДТ2. Метою адаптивного керування є забезпечення такої оптимальної дії ІГІ на нафтовий пласт, при якому реалізується максимальна передача енергії пластовій системі при мінімальних витратах енергетичних ресурсів насосної установки.

Досягнення мети керування адаптивними методами [7] відображається за допомогою функціонально-логістичної моделі, яка реалізується через мінімізацією функціонала Q при заданих обмеженнях

$$Q = \int_{t_0}^{t_k} q[t, u(t), \omega(t), \vec{v}(t), \vec{r}(t)] \cdot dt, \quad (2)$$

де $u(t)$ – сигнал керування, що подавався на електрогідорозподілювач (ЕГР); $\omega(t)$ – динамічні впливи, що вносять збурення; $\vec{v}(t)$ – вектор вихідних сигналів об'єкта, які характеризують стан свердловини та характеристику міцності обсадної колони; $\vec{r}(t)$ – бажане значення виходу: тиск p_0 та час спрацювання ІГІ; $q[t, u(t), \omega(t), \vec{v}(t), \vec{r}(t)]$ – задана додатна функція адаптивної корекції; t_0 і t_k – моменти початку й кінця функціонування системи адаптації відповідно.

Алгоритм керування АІС повинен забезпечити оптимум

$$u_{opt}(t) = \arg \min_{u \in \Omega} \tilde{Q}[u/I(t)], \quad (3)$$

де Ω – задана область допустимих значень тиску гідродару, що служать сигналом для керування системою; $I(t)$ – наявна в теперішній момент часу апостеріорна інформація про функціонування об'єкта в проміжку часу (t_0, t_k) .

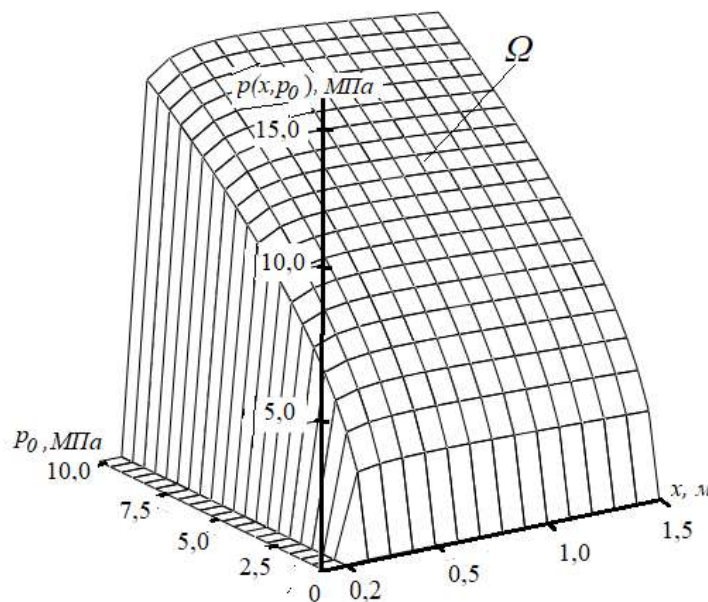


Рисунок 4 – Графік залежності тиску гідродару на поверхневій частині свердловини від довжини L_k та тиску p_0 з формуванням області Ω допустимих значень тиску гідродару

Апостеріорна інформація про функціонування об'єкта в проміжку часу (t_0, t_k) базується на проведенні попередніх пошукових досліджень та промислового застосування дослідного зразка з генерацією ІГІ пробних імпульсів невеликої амплітуди для вивчення динамічних можливостей свердловини з визначенням часу t_p реакції свердловини на дію імпульсу тиску та декремента затухання $\Delta = p_{i0}/p_{i1}$. Для

конкретного випадку досліджень [4] встановлено $t_p = 4,5$ с, $\Delta \approx 1,4$ за осцилограмою (рис. 5). Основні апаратні компоненти дослідного зразка АІС наведені на рис. 6.

Результати моделювання такої системи адаптації показують, що система працездатна для широкого класу моделей об'єктів впливу на привибійну зону нафтової свердловини.

У розглянутому методі структура функціоналу (3) функціонально-логістичної моделі будується відповідно до мети керування - поліпшення показників взаємодії ІГІ з нафтовим пластом, підвищення значення коефіцієнту передачі ударного імпульсу та, в результаті, підвищення видобутку вуглеводнів.

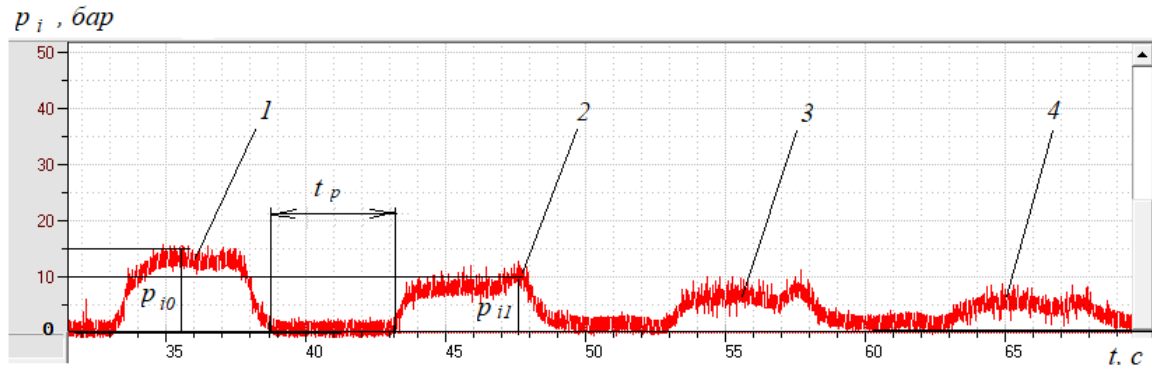


Рисунок 5 – Фрагмент осцилограми дії одиночного імпульсу тиску ІГІ з реєстрацією відбитих хвиль: 1 – хвиля прямого імпульсу ІГІ; 2, 3, 4 – відбиті від вибою свердловини затухаючі хвилі тиску; t_p – час реєстрації відбитої від вибою хвилі тиску, p_{i0} – максимальна амплітуда початкової хвилі від прямого імпульсу, p_{i1} – максимальна амплітуда першої відбитої хвилі

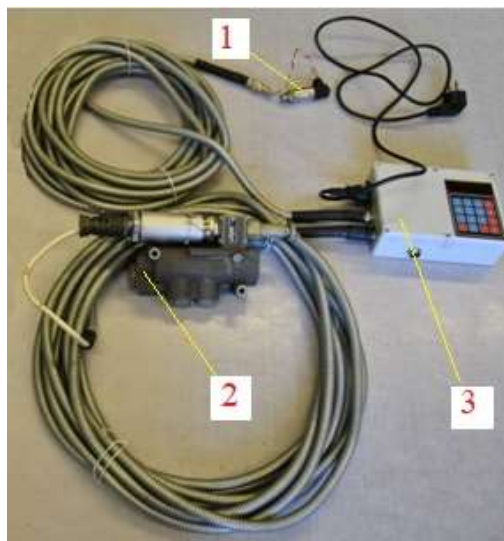


Рисунок 6 – Основні компоненти дослідного зразка АІС : 1 – електрогідорозподільвач, 2 – ПЛК, 3 – датчик тиску

Одним з ефективних напрямків застосування АІС є можливість генерація ІГІ наступного імпульсу в момент приходу від вибою і зворотного відбиття попереднього імпульсу. В цьому випадку можливе виникнення процесу резонансної дії на привибійну зону, що дозволить значно підвищити ефективність застосування АІС.

В запропонованій технології з використанням АІС передбачено використання дозволених хімічних реагентів (розріджувачів, кислот, ПАВ та інших), але в значно менших об'ємах ніж при традиційній хіміко-технологічній обробці привибійної зони, що є економічно більш вигідним варіантом.

Проведена промислова апробація елементів адаптивної імпульсної системи попередньої модифікації за умов сервісних компаній «Укркарпатоїл Лтд» (Україна, США, технологія «Імпульс»), «Азгард» (Україна), «Plato» (Індонезія, технологія «Pulse Jet») на протязі 2000 – 2013 років підтверджує ефективність технології для свердловин глибиною до 3500 м з проникливістю колекторів не менше 10 мД, густиною флюїдів 600...900 кг/м³, в'язкістю 1...5 мПа. В результаті обробки добувних малодобітних нафтових свердловин безпосередньо з поверхні на протязі восьми годин (через затрубний простір або колону насосно-компресорних труб) досягалось підвищення продуктивності видобутку в межах 20...30%.

Висновок.

1. Розроблена математична модель імпульсного процесу, за допомогою якої встановлено раціональний діапазон довжини імпульсної камери в межах 0,2 м до 1,3 м, що дозволило встановити дослідний зразок ПІ безпосередньо над баком насосного агрегату ЦА-320 і провести промислові випробування. Визначено раціональну область функціонування адаптивної імпульсної системи за умови зміни довжини імпульсної камери в межах 0,2...0,4 м та тиску в межах 0...10 МПа.

2. Для реалізації адаптивного керування системою слід враховувати два основних впливових чинники: глибину свердловини та спроможність пластової системи поглинати енергію імпульсів. В останньому випадку таке поглинання енергії сприяє підвищенню проникливості пластової системи, а отже - підвищенню продуктивності видобутку вуглеводнів.

3. Розроблено функціонально-логістична модель, за якої реалізація адаптивних функцій здійснюється підсистемами корекції: енергорозподілу, подачі рідини з тиском від насосного агрегату; амплітудою та частотою імпульсу тиску відбитого від вибою свердловини з забезпеченням такої оптимальної дії на нафтовий пласт, при якому реалізується максимальна передача енергії пластовій системі при мінімальних витратах енергетичних ресурсів насосної установки.

4. Апостеріорна інформація про функціонування об'єкта в заданому проміжку часу базується на проведенні попередніх пошукових досліджень та промислового застосування дослідного зразка з генерацією пробних імпульсів невеликої амплітуди, що дозволило встановити динамічні можливості та реакцію свердловини на дію імпульсу тиску: час хвильового руху прямого та відбитого імпульсів тиску, а також декремент затухання. Для конкретного випадку досліджень встановлено час руху в межах 4,5 с, а декремент затухань близько 1,4.

5. Одним з ефективних напрямків застосування адаптивної імпульсної системи є можливість генерації наступного імпульсу в момент приходу від вибою і зворотного відбиття попереднього імпульсу. В цьому випадку можливе виникнення процесу резонансної дії на привибійну зону, що дозволить значно підвищити ефективність застосування АІС.

6. В запропонованій технології з використанням АІС передбачено використання дозволених хімічних реагентів (розріджувачів, кислот, ПАВ та інших), але в значно менших об'ємах ніж при традиційній хіміко-технологічній обробці привибійної зони, що є економічно більш вигідним варіантом.

7. Дослідженнями встановлена ефективність промислової апробації функціонування адаптивної імпульсної системи, попередньої модифікації, в комплексі з насосним агрегатом, що розташовані на поверхні, для очищення привибійної зони від кольматантів та знеміцнення колектору пластової системи, що дозволяє, без зупинки процесу поточного видобутку нафти, підвищити продуктивність малодебітних свердловин на 20-30% .

Список використаної літератури

1. Світлицький В.М. Поточний та капітальний ремонт свердловин/ В.М. Світлицький, С.І. Ягодівський, Г.Р. Галустян. К.: Логос, 2001. 344с.

2. E. Nesvold and R. V. Bratvold, "Debiasing probabilistic oil production forecasts," Energy, vol. 258, p. 124744, Nov. 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124744>.

3. Катеринчук П.О. Освоєння, інтенсифікація та ремонт свердловин/ П.О. Катеринчук, Д.В. Римчук, С.В. Цибулько, О.Л. Шудрик – Х.: Пром-Арт, 2018. – 608 с.

4. Сліденко В.М., Лістовщик Л.К., Бут В.О. Адаптивна мехатронна система імпульсно-хвильової дії на гірський масив //Електромеханічні та енергетичні системи. Методи моделювання та оптимізації. Збірник наукових праць XVI Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених і спеціалістів (м. Кременчук 12–13 квітня 2018 р.) Кременчук, КрНУ, 2018. С. 27-28.

5. Інструкція застосування установки з гнучкими трубами для виконання підземного ремонту і інтенсифікації роботи свердловин. СТП 320–30019775.002-2004 [Чинний від 15.01.2004] ДК «Укргазвидобування», 2004. – 234 с.

6. Сліденко В.М. Статистична оцінка ефективності імпульсного генератора для активізації видобутку вуглеводнів/ В.М. Сліденко, Л.Р. Марчук// Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. Випуск 3/2023 (140). С. 132-148 DOI <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2023.3.15>

7. Сліденко В.М., Шевчук С.П., Замараєва О.В., Лістовщик Л.К. Адаптивне функціонування імпульсних виконавчих органів гірничих машин: монографія. Київ: НТУУ "КПІ", 2013. 180 с .

V. Slidenko¹, Dr. Sc. (Eng.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0001-9313-331X

S. Shevchuk¹, Dr. Sc. (Eng.), Prof., ORCID 0000-0002-7517-0501

L. Listovshchik¹, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof., ORCID 0000-0003-3413-1802

V. But¹, Ph.D. student, ORCID 0009-0003-7024-1184

¹National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

ADAPTIVE IMPULSE SYSTEM OF IMPACT FROM THE SURFACE ON THE NEAR-PRODUCTION ZONE OF THE OIL WELL

This article examines the functioning of an adaptive impulse system with an electro-hydraulic drive for influencing the near-bore zone of an oil well from the surface without stopping hydrocarbon production. Particular attention was paid to the definition of the structure and functions of the electrohydraulic drive of the pulse system, and the rational zone of operation of the implosion pulse generator was determined with the establishment of restrictions on its operation. The article presents a mathematical model of the implosive impulse process and a functional-logistic model of adaptation of the impulse system to the conditions of the working environment. The variant of the system layout with the installation of an implosion pulse generator on the pump unit for action from the surface on the near-breakout zone of the oil well was considered. The rational length of the implosion chamber was determined and the area of operation of the adaptive pulse system with the generation of rational values of water hammer pressure was established.

The paper presents the results of the industrial approval of the adaptive impulse system with electrohydraulic control of the previous modification under the industrial conditions of Ukraine. The characteristics of the devices that were used in the process of industrial approval are given.

Keywords: adaptation, electrohydraulic system, pulse generator, mathematical model, implosion, direct hydraulic shock, hydrocarbons, oil well.

References

1. Svitlytskyi V.M. Current and major repair of wells/ V.M. Svitlytskyi, S.I. Yagodovskyi, H.R. Galustyan K.: Logos, 2001. 344p.
2. E. Nesvold and R. B. Bratvold, "Debiasing probabilistic oil production forecasts," *Energy*, vol. 258, p. 124744, Nov. 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124744>.
3. Katerynchuk P.O. Development, intensification and repair of wells/ P.O. Katerynchuk, D.V. Rymchuk, S.V. Tsibulko, O.L. Shudrik - Kh.: Prom-Art, 2018. - 608 p.
4. Slidenko V.M., Listovshchik L.K., But V.O. Adaptive mechatronic system of pulse-wave action on a mountain massif // *Electromechanical and energy systems. Methods of modeling and optimization. Collection of scientific papers of the 16th International Scientific and Technical Conference of Young Scientists and Specialists (Kremenchuk, April 12–13, 2018) Kremenchuk, KrNU, 2018. C. 27-28.*
5. Instructions for using the installation with flexible pipes for underground repair and intensification of wells. STP 320–30019775.002-2004 [Effective from 15.01.2004] DK "Ukrgezvydobuvannya", 2004. - 234 p.
6. Slidenko V.M. Statistical assessment of the effectiveness of the implosion generator for the activation of hydrocarbon production/ V.M. Slidenko, L.R. Marchuk// *Mykhailo Ostrogradskyi KrNU Bulletin. Issue 3/2023 (140). C. 132-148 DOI <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2023.3.15>*
7. Slidenko V.M., Shevchuk S.P., Zamaraeva O.V., Listovshchik L.K. Adaptive functioning of impulse executive bodies of mining machines: monograph. Kyiv: NTUU "KPI", 2013. 180 p.

Надійшла: 10.09.2024

Received: 10.09.2024