

Техніка і технології

УДК 622.243:(658.5+622.323)

УМОВИ ЕФЕКТИВНОГО ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ДИСКРЕТНО-РОЗПОДІЛЕНИХ УДАРНИХ НАВАНТАЖЕНЬ ДЛЯ ЛІКВІДАЦІЇ ЗАКЛИНЮВАНЬ КНБК У ПРОЦЕСІ БУРІННЯ СВЕРДЛОВИН

В.М. Чарковський

*ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. 096 4459677,
e-mail: ztk@nupg.edu.ua*

Обґрунтовано застосування основних теоретичних законів розподілу ймовірності виникнення геологічних ускладнень різного ступеня важкості на родовищах ДП «Укрбургаз». Запропоновано застосовувати емпіричний закон розподілу результативності нової техніки як критерій її ефективності. У якості математичної моделі відповідного потоку виникнення ускладнень прийнято потік Пуассона, характеристики заявок на ліквідацію ускладнень та аварій, спричинених втратою рухомості бурильної колони. Визначено оптимальну кількість технічних засобів, призначених для реалізації дискретно-розподілених ударних навантажень у стаціонарному стані системи. Розглянуто у часі перехідний період, пов'язаний із відновленням стаціонарності стану.

Ключові слова: емпіричний закон розподілу; ефективність; потік Пуассона; система масового обслуговування.

Обосновано применение основных теоретических законов распределения вероятности возникновения геологических осложнений различной степени тяжести на площадях ДП «Укрбургаз». Предлагается применять эмпирический закон распределения результативности новой техники в качестве критерия ее эффективности. В качестве математической модели соответствующего потока возникновения осложнений принят поток Пуассона, характеристики которого позволили с достаточной точностью определить основные параметры системы, связанной с выполнением заявок на ликвидацию осложнений и аварий, причиной которых является потеря подвижности бурильной колонны. Определено оптимальное количество технических средств, предназначенных для реализации дискретно-распределенных ударных нагрузок в стационарном состоянии системы. Исследован во времени переходной период, связанный с восстановлением стационарности состояния.

Ключевые слова: эмпирический закон распределения; эффективность; поток Пуассона; система массового обслуживания.

The application of basic theoretical distribution laws on the probability of occurrence of different geological complications at SE "Ukrburhaz" has been justified. An empirical distribution law of new technology effectiveness as a criterion of its effectiveness has been proposed to apply. Acting as a mathematical model, a Poisson flow is taken for the corresponding flow of complications occurrence; its characteristics have allowed to determine adequately the main parameters of the system related to the performance of applications on the elimination of failures and accidents caused by loss of motion of the drill string. The optimal amount of facilities designed to implement discrete-distributed impact loads in a system's stationary condition has been defined. A transition period has been researched in the cause of time, which is associated with the recovery of the stationary condition.

Key words: empirical distribution law; effectiveness; Poisson flow; queueing theory.

Постановка проблеми дослідження. Оцінюючи економічну доцільність інвестицій у нафтогазовий сектор, необхідно враховувати не тільки фінансові ризики, а й численні фактори, що виникають в умовах невизначеності геологічної інформації. Зокрема це стосується бурін-

ня свердловин в ускладнених геологічних умовах, що призводить до затягування процесу їх спорудження і, як наслідок, збільшення витрат.

Для економічно обґрунтованого і ефективного застосування технічних засобів і технологій попередження та ліквідації геологічних

ускладнень необхідно отримувати точну оцінку ймовірності виникнення подібних ситуацій в бурінні. Різного роду ризики можна сформулювати як максимально можливі збитки за кредитним портфелем для заданої довірчої ймовірності. Збільшення ризиків – це збільшення додаткових витрат, пов'язаних з аварійними ситуаціями, а отже, необхідно оцінити ймовірність виникнення геологічного ускладнення, що призведе до стрибкоподібних витрат протягом заданого інтервалу часу. Впровадивши у виробничий процес нову техніку чи технологію для попередження аварійності, буровики тим самим зменшують виникнення цих стрибкоподібних витрат у майбутньому за умови результативного застосування нової техніки. Отже, різниця між передбачуваними витратами на ліквідацію геологічних ускладнень та аварій і витратами на впровадження нової техніки складе деяку додатню або від'ємну величину, яка відповідно визначатиме економічну ефективність чи перевитрати коштів при впровадженні.

Огляд досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання проблеми. Усі фактори техніко-технологічного характеру, які мають вплив на виникнення геологічних ускладнень чи аварій можна розглядати як потік подій низької інтенсивності. Інтенсивність потоку буде залежати від ряду показників механіки гірських порід (твердість, пластичність, пористість, проникність, коефіцієнт анізотропії і т.п.), технологічних показників (липкість глинистої кірки, геометрія відкритого стовбура свердловини, режими буріння), кваліфікації персоналу бурового підприємства (наявність спеціалізованих виконавців з ліквідації аварій, наявність системи підвищення кваліфікації персоналу, схильність персоналу до роботи з інноваціями), наявності подібних ускладнень та аварій в минулому, а також успішності їх ліквідації, наявності системи заходів та управлінських рішень для попередження аварійності в подальшому. Кожен із наведених факторів тією чи іншою мірою буде характеризуватися деякою випадковою складовою у реальних умовах виконання бурових робіт. Розрахунок випадкової складової при реалізації певного виду техніки чи технології можна виконати методами імітаційного моделювання на базі розігрування значень конкретних факторів. Але тут потрібно зазначити, що імітаційне моделювання можливе, якщо закони розподілу ймовірності впливу вказаних вище факторів є відомими.

Серед ускладнень геологічного характеру одними з найбільш витратних щодо їх ліквідації є ті, які призводять до втрати рухомості бурильного інструменту у свердловині. Відома робота А.К.Самотоя [1] базувалася на поєднанні експертних та статистичних методів оцінювання впливу факторів на виникнення даного виду ускладнень.

Нехай, узагальненою характеристикою бурового підприємства як системи S є сума витрат коштів на спорудження свердловин

W_1, W_2, \dots, W_n , а отже, величину S можна розрахувати через функцію витрат

$$S = f(W_1, W_2, \dots, W_n). \quad (1)$$

У дійсності внаслідок дії різноманітних факторів показники витрат на буріння свердловин W_1, W_2, \dots, W_n будуть дещо відрізнятися від (1).

Прийнято вважати [2], що параметри, які впливають на аргументи функції (1), є незалежними випадковими величинами, і потрібно визначити функції їх розподілу для встановлення закону розподілу випадкової величини S .

Відповідно до основних понять математичної статистики та теорії ймовірностей втрату рухомості бурильного інструменту на деякій діючій свердловині будемо розглядати як випадкову величину, або експеримент, що повторюється n -ну кількість разів, які характеризуються взаємовиключними результатами, а тому класифікуються як деякі елементарні події. При цьому експерименти є такими, що поділяються на скінчене число елементарних подій, які є рівноймовірними, тобто в подальшому будемо виходити з класичного визначення ймовірності події. Для випадкової характеристики втрати рухомості бурильного інструменту приймемо індикатор подій

$$X = \begin{cases} 1, \text{ якщо подія відбулася} \\ 0, \text{ якщо подія не відбулася} \end{cases} \quad (2)$$

з можливими ймовірностями $p_0 = P(X = 0) = 1 - p$ та $p_1 = P(X = 1) = p$.

Для оцінки ефективності того чи іншого виду техніки або технології потрібна деяка характеристика успішності (позитивного результату) чи, відповідно, неуспішності (негативного результату) застосування нової техніки. Індикатор (2) у цьому випадку буде означати успішне застосування техніки чи технології ($X=1$) та неуспішне ($X=0$) з відповідними ймовірностями. Такий підхід дозволяє представити випадкову величину X як узагальнену характеристику дії всіх вищенаведених незалежних факторів впливу, кожен з яких вносить у випадкову величину тільки певний внесок, а тому є підстави стверджувати, що дана характеристика приблизно розподілена за нормальним законом.

Серед невирішених раніше завдань можна виділити відсутність досліджень умов або чинників, за яких застосування певних технічних засобів для ліквідації та попередження геологічних ускладнень і аварій є економічно доцільним.

Метою даної статті є вибір та обґрунтування математичної моделі результативності або успішності застосування технології дискретно-розподілених ударних навантажень в тих чи інших умовах ліквідації геологічних ускладнень та аварій під час буріння глибоких свердловин на нафту й газ та відповідне виконання досліджень умов ефективного застосування цієї технології і технічних засобів її реалізації.

Таблиця 1 – Статистична вибірка щодо результативності застосування ударних механізмів

№ з/п	Свердловина	Значення індикатора (2) як характеристики результативного застосування УМ*	Значення індикатора (2) як характеристики технологічно можливого застосування УМ	Значення індикатора (2) як перспективи застосування запропонованої технології
Хрещищенське ВБР				
1	109 Яблунівська	0	0	0
2	120 Новоукраїнська	0	1	0
3	102 Розпашнянська	1	1	0
4	103 Новоукраїнська	0	1	0
5	60 Юліївська	1	1	0
6	60 Матвіївська	0	1	1
7	65 Багатіївська	0	0	0
8	67 Матвіївська	0	1	1
9	64 Матвіївська	0	1	1
10	89 Розпашнянська	0	1	0
11	52 Яблунівська	0	1	0
12	55 Личківська	0	1	0
Шебелинське ВБР				
1	31 Єфреміївська	1	1	0
2	131 Березівська	0	0	0
3	91 Мелихівська	0	0	0
4	92 Мелихівська	0	0	0
5	92 Мелихівська	0	1	1
6	155 Степова	0	0	0
7	92 Мелихівська	0	1	1
8	92 Мелихівська	0	1	1
9	111 Березівська	0	0	0
10	93 Мелихівська	1	1	1
11	111 Березівська	1	1	1
12	57 Вільхівська	0	1	0
13	800 Шебелинська	0	0	0
14	800 Шебелинська	0	0	0
15	99 Мелихівська	1	1	1
16	99 Мелихівська	0	1	1
17	132 Березівська	0	1	1
18	57 Волохівська	0	0	0
19	52 Скоробагатківська	1	1	0
20	97 Мелихівська	0	1	1
21	114 Мелихівська	0	0	0

*Примітка: Результативним застосуванням УМ тут вважається факт як повної, так і часткової ліквідації аварії за допомогою УМ

Виклад основного матеріалу. Дослідження базуються на даних результативності застосування різних способів ліквідації аварій, пов'язаних із втратою рухомості колони буринних труб, на площах ДП «Укрбургаз» за період з 1991-го по 1995-й роки і проаналізованих в [3]. У табл.1 наведені дані щодо результативності застосування ударних механізмів (УМ), як безпосереднього аналога технології дискретно-розподілених ударних навантажень [4].

У табл. 1 перша графа – номер за порядком – характеризує черговість виникнення події в часі, тобто це порядковий номер виникнення аварії в отриманій послідовності спостережень за п'ятирічний період з 1991-го по 1995-й роки. Третя і четверта графа табл.1 – це характеристики двох подій, пов'язаних з результативністю нової техніки, а також її можливістю взагалі застосовувати для ліквідації даної аварії. Значення індикатора X у третій графі характеризує відповідно до (2) успішність (або позитивний

результат) застосування УМ для звільнення бурильного інструменту у випадку, якщо такий спосіб застосовували, що, у свою чергу, відображено у четвертій графі табл.1.

Для впровадження технології дискретно-розподілених ударних навантажень та відповідних технічних засобів необхідно, в першу чергу, визначити ті геологічні площі, родовища та свердловини, які розбуруються в складних геологічних умовах. Основою реалізації запропонованої технології є заміна стандартизованих розмірними рядами елементів компоновок низу бурильної колони (КНБК) секційними ударними механізмами [4], які з'єднуються в свічі певної довжини і створюють навантаження на долото, а також експлуатуються як безопорна КНБК для реалізації параметрів спрямованої у певному напрямку проводки свердловини. На початковому етапі впровадження, як правило, випробовують дослідні зразки нової техніки, а тому потрібно розрахувати ймовірність застосування дослідної конструкції секційного ударного механізму, який буде постійно застосовуватися у якості КНБК при бурінні певної свердловини. Вибір такої свердловини у даних дослідженнях здійснювався за результатами вибірки індикатора X для геологічної площі чи родовища, на яких було зафіксовано 3 і більше аварій, ліквідація яких, у свою чергу, технологічно можлива з допомогою УМ. Як приклад можна привести Мелихівську площу Шебелинського ВБР, на якій тільки при бурінні свердловини №92 зафіксовано 4 аварії. Саме для таких свердловин призначена технологія дискретно-розподілених ударних навантажень. Відповідні значення індикатора X, які допоможуть спрогнозувати перспективу подальшого впровадження запропонованої технології наведені у п'ятій графі табл.1.

Емпірична функція розподілу $F_n(x)$ одержана за загальноприйнятою для дискретних виборок X формулою

$$F_n(x) = \frac{m_n(x)}{n}, \quad (3)$$

де $m_n(x)$ – випадкова величина, яка рівна кількості елементів вибірки X, значення яких менше x.

Для побудови емпіричної функції розподілу використано типовий підхід [5] з деяким пристосуванням для даних досліджень, а саме:

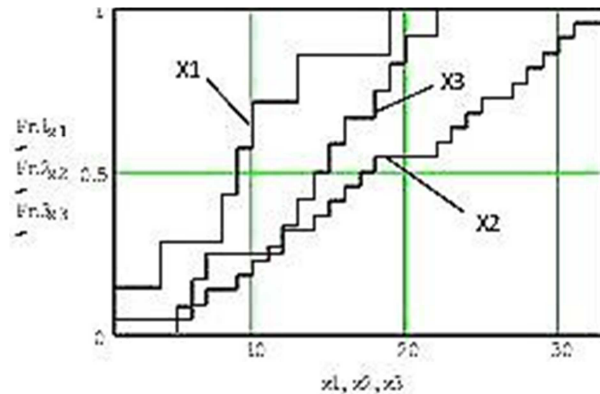
- 1) всі результати спостережень впорядковано за їх виникненням в часі п'ятирічного періоду та присвоєно їм ранги або порядкові номери в отриманій послідовності;
- 2) кожному спостереженню наведено у відповідність число, отримане за формулою (3);
- 3) побудовано графік(рис.1) емпіричної функції розподілу.

Вибравши з даних табл.1 тільки ті свердловини, де застосовували УМ і впорядкувавши значення індикатора (2) в часі вибраного п'ятирічного періоду, для результативності УМ матимемо

$$F_n(x) =$$

1	0	0	1	0	0	0	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0
0.143	0.143	0.143	0.286	0.286	0.286	0.429	0.571	0.714	0.714	0.714	0.857	0.857	0.857	0.857	0.857	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

Одержану емпіричну функцію розподілу результативності застосування УМ можна порівняти з емпіричною функцією розподілу ймовірності виникнення тих аварій та геологічних ускладнень, ліквідація яких технологічно можлива за допомогою УМ. Для побудови такої функції за формулою (3) потрібно скористатися значеннями індикатора (2) з 4-ої графі табл.1.



- X1 – результативного застосування УМ;
- X2 – технологічно можливого застосування УМ;
- X3 – можливого застосування технології дискретно-розподілених ударних навантажень

Рисунок 1 – Емпіричні функції розподілу ймовірностей

Процедура побудови емпіричної функції розподілу виникнення геологічних ускладнень та аварій, ліквідація яких технологічно можлива з допомогою УМ, аналогічна описаній вище, а графічне порівняння двох функцій представлено на рис.1. На цьому ж графіку (рис.1) показана функція розподілу ймовірності виникнення досить частих аварій, пов'язаних з втратою рухомості колони труб, отримана за аналогічною методикою, при ліквідації яких можна застосовувати технічні засоби, вмонтовані в КНБК, а отже, і технологію дискретно-розподілених ударних навантажень. У випадку вищої результативності застосування УМ функція розподілу успішності (зліва на графіку, рис.1) зміщуватиметься вправо, наближаючись до функції розподілу ймовірності технологічно придатного застосування УМ для ліквідації всіх аварій та геологічних ускладнень. Це дозволяє у першому наближенні використати порівняння емпіричних функцій розподілу як відносну міру ефективності впроваджуваного виду техніки. Розміщення на графіку (рис.1) функції розподілу X3 можливого застосування запропонованої технології між двома іншими емпіричними функціями вказує на значний резерв для реалізації даної технології за умови більш результативного застосування відповідних технічних засобів, порівняно з роботою УМ інших конструкцій.

Оцінити ймовірність виникнення тієї чи іншої події з представлених у табл. 1 можна, одержавши функцію найбільшої вірогідності та розв'язавши відповідне диференціальне рівняння, що складає суть методу [5]. Відповідно до даних, представлених у табл.1, подія А1 – результативне чи успішне застосування УМ – виникає у $m=7$ випадках з $n=22$ спостережень. За методом найбільшої вірогідності

$$w_n(A1) = \frac{m}{n} = \frac{7}{22} = 0,318 \quad (4)$$

є найбільш вірогідною оцінкою невідомої величини p – ймовірності успішного результату від застосування УМ відповідної конструкції для ліквідації аварії чи геологічного ускладнення.

Аналогічно для події А2 – технологічної можливості застосовувати УМ будь-яких конструкцій при ліквідації аварій та ускладнень – матимемо таку вірогідну оцінку ймовірності

$$w_n(A2) = \frac{22}{33} = 0,667.$$

Частота $w_n(A)$ є точковою оцінкою ймовірності настання відповідної події, тому для точності цієї оцінки необхідно визначити довірчі межі, які знаходять, розв'язуючи квадратну нерівність [5]

$$p^2 \left(1 + \frac{z_\alpha^2}{n}\right) - p \left(2w_n + \frac{z_\alpha^2}{n}\right) + w_n^2 < 0, \quad (5)$$

де, z_α – аргумент функції розподілу $\Phi_0(z_\alpha)$, який знаходиться з рівняння $2\Phi_0(z_\alpha) = 1 - \alpha$;

α – задана величина, що визначає міру надійності $1 - \alpha$;

p – розв'язок (5), який відповідно визначає нижню та верхню межу для $w_n(A)$, тобто довірчі оцінки.

Якщо задатися α близьким до 0, то довірчий інтервал перекриватиме точкову оцінку ймовірності настання відповідної події з мірою надійності близькою до 1. Розв'язавши рівняння (5), для міри надійності, близької до 0,95, отримаємо, такі довірчі межі визначених вище точкових оцінок ймовірності настання відповідних подій

$$0,167 < w_n(A1) < 0,520$$

$$0,502 < w_n(A2) < 0,799$$

Для того, щоб використовувати у майбутньому результати розрахунків, отриманих на базі статистичної вибірки з табл.1, необхідно перевіряти статистичну гіпотезу H_0 про рівність математичного сподівання величини $w_n(A)$ з контрольної вибірки, та цієї ж величини, отриманої зі статистичної вибірки в майбутньому. У даному дослідженні статистична нульова гіпотеза сформульована як гіпотеза про рівність отриманого емпіричного та деяких теоретичних законів розподілу. У якості теоретичних вибрано:

- нормальний (Гаусса) закон розподілу

$$P(k, \mu, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(k-\mu)^2}{2\sigma^2}};$$

- закон розподілу Пуассона

$$Pr(\lambda, k) = \frac{\lambda^k}{k!} e^{-\lambda};$$

- біноміальний закон розподілу

$$Bi(p, k, n) = \frac{n!}{k!(n-k)!} p^k (1-p)^{n-k};$$

- від'ємний біноміальний закон розподілу

$$NB(p, k, n) = \binom{k+n-1}{k} p^n (1-p)^k.$$

Підбір основних теоретичних законів розподілу здійснювався на першому етапі візуально, на побудованих і суміщених графіках емпіричного та теоретичного розподілів, тобто параметри теоретичних функцій підбиралися відповідно до «найкращого» співпадання їх кривих з емпіричними значеннями. На другому етапі перевірялися нульові статистичні гіпотези за t-критерієм. Перевірка підтверджує гіпотезу H_0 в усіх трьох випадках з табл. 1 для всіх вибраних теоретичних законів розподілу на рівнях значущості $\alpha = 0,1..0,01$, що достатньо для практичних розрахунків.

На рис. 2 показано суміщені графіки емпіричного розподілу та розподілу за законом Пуассона для ймовірного застосування технології дискретно-розподілених ударних навантажень. Інтегральна крива розподілу Пуассона побудована для значень $k = 1..22$; $\lambda = 14$, а розраховане значення t-критерію становить 0,027, що набагато менше табличного на рівні значущості $\alpha = 0,1$, а отже, підтверджується гіпотеза H_0 про рівність емпіричного та теоретичного розподілів.

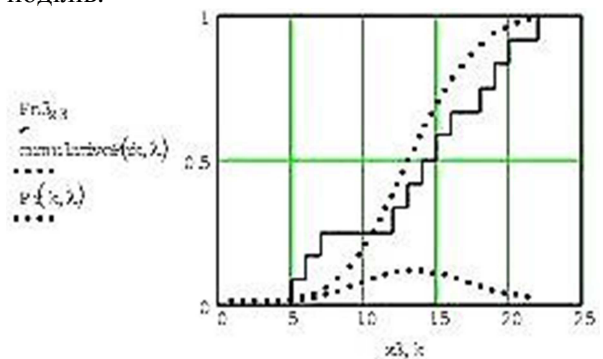


Рисунок 2 – Емпіричний та теоретичний розподіли ймовірності застосування технології дискретно-розподілених ударних навантажень

Закон розподілу Пуассона рекомендується застосовувати у більшості випадків для найпростішого потоку подій, тобто такого потоку, у якому проміжок часу між двома послідовними подіями є випадковою величиною, розподіленою на проміжку часу $[0; +\infty]$ зі щільністю розподілу, що відповідає формулі Пуассона. Таким чином, події являтимуть собою однорідний потік геологічних ускладнень чи аварій, для ліквідації яких можна застосувати технологію дискретно-розподілених ударних навантажень і які різнитимуться лише моментами їх появи на осі часу, причому за одиницю часу вибрано п'ятирічний період.

Таблиця 2 – Характеристики потоку аварій та геологічних ускладнень за п'ятирічний період

Кількість аварій n	Ймовірність того, що відбудеться не більше, ніж n аварій	Ймовірність виникнення точно n аварій	Ймовірність виникнення понад n аварій
1	0	0	1
5	0,006	0,004	0,994
9	0,109	0,047	0,891
13	0,464	0,106	0,536
17	0,827	0,071	0,173
21	0,971	0,019	0,029
25	0,997	0,002	0,003

Для того, щоб повністю описати найпростіший потік, достатньо знати середнє число аварій, які виникають в одиницю часу, або інтенсивність потоку. У законі розподілу Пуассона інтенсивності потоку аварій рівне число λ , а сам розподіл дає значення ймовірності того, що за певний проміжок часу виникне деяка n -на кількість аварій, пов'язаних з втратою рухомості колони бурових труб. Ймовірність того, що за час t виникне не більше, як n аварій визначатиметься формулою

$$F(\leq n, t) = \sum_{k=0}^n \Pr(\lambda, k, t) = e^{-\lambda t} \sum_{k=0}^n \frac{(\lambda t)^k}{k!}, \quad (6)$$

причому, ймовірність виникнення точно n аварій чи геологічних ускладнень задається таким записом

$$F(= n, t) = \frac{(\lambda t)^n}{n!} e^{-\lambda t}. \quad (7)$$

Ймовірність виникнення більш, ніж n аварій чи геологічних ускладнень складе відповідно $1 - F(\leq n, t)$. Ймовірність виникнення однієї аварії чи геологічного ускладнення за час t визначається з формули (6)

$$F(n = 1, t) = \lambda t e^{-\lambda t}, \quad (8)$$

а ймовірність виникнення не більше однієї аварії відповідно складе

$$F(n \leq 1, t) = (1 - \lambda t) e^{-\lambda t}. \quad (9)$$

Ймовірність відсутності аварій взагалі в деякому інтервалі часу τ буде визначатися як $e^{-\lambda \tau}$. Остання величина дає ймовірність того, що інтервал часу між послідовними аваріями перевищить деяку величину τ , а отже функція розподілу інтервалів між появою двох послідовних аварій буде задана таким чином

$$F(\tau) = 1 - e^{-\lambda \tau}. \quad (10)$$

Математичне сподівання інтервалу τ , розподілене за законом Пуассона, матиме вигляд

$$M\tau = \frac{1}{\lambda}. \quad (11)$$

Наведені вище математичні співвідношення, які пояснюють закон розподілу Пуассона, покладені в основу окремого розділу теорії ймовірності – теорії масового обслуговування [6]. Предметом цієї теорії, у тому числі, є визначення ймовірної ефективності функціонування різних організаційних структур, що за-

ймаються виконанням заявок від різних підрозділів деякої виробничої системи, а тому ця теорія добре підходить для даних досліджень. Індикатор подій (2) можна відобразити послідовністю точок, які відповідатимуть значенню $X=1$, на осі часу і різнитимуться моментами їх появи. А оскільки, ці події є аваріями та геологічними ускладненнями, які необхідно ліквідувати у найкоротший термін, то їх можна розглядати як заявки на застосування технології дискретно-розподілених ударних навантажень. Відповідно апаратами обслуговування стануть технічні засоби, призначені для реалізації даної технології. Завдання полягатиме у тому, щоб, попередньо дослідивши потік вимог та умови функціонування апаратів обслуговування, підібрати оптимальну кількість апаратів, тобто оптимальну кількість технічних засобів для реалізації запропонованої технології дискретно-розподілених ударних навантажень.

За формулами (6)-(9), а також з урахуванням результатів аналізу теоретичного та емпіричного розподілів (рис. 2), виконані розрахунки, результати яких наведені у табл. 2.

Досліджуючи умови функціонування апаратів обслуговування, тобто УМ, визначають час обслуговування однієї вимоги, який також є випадковою величиною, розподіленою за тим же законом Пуассона зі щільністю

$$g(\mu, t) = \mu e^{-\mu t}, \quad (12)$$

де μ – інтенсивність обслуговування є величиною, оберненою до середнього часу обслуговування, тобто

$$\mu = \frac{1}{t_{\text{середнє}}}. \quad (13)$$

Особливістю визначення середнього часу обслуговування при реалізації технології дискретно-розподілених ударних навантажень є не аналіз статистичних виборок за часом, витраченим на ліквідацію аварій з допомогою відповідних технічних засобів, а облік часу, протягом якого ці технічні засоби знаходилися в складі КНБК (або самі являли собою КНБК) при бурінні свердловини, чи деякого інтервалу свердловини, у якому очікується висока ймовірність виникнення аварій чи геологічного ускладнення. Відповідно час очікування вимоги в черзі задається законом Пуассона зі щільністю розподілу

$$h(v, t) = ve^{-vt}, \quad (14)$$

де v – параметр, обернений до середнього часу очікування, який розраховується за співвідношенням

$$v = \frac{1}{t_{\text{очікування}}}. \quad (15)$$

Середній час очікування залежить як від наявної кількості незадіяних на складі технічних засобів для реалізації запропонованої технології, так і від тривалості буріння свердловин, на яких вже застосовуються вказані технічні засоби. Час буріння свердловин визначається глибиною буріння, геологічними умовами проводки та конструкцією свердловини і складає переважно від 2-3-х місяців до 1-го року. Наявність на складі бурового підприємства технічних засобів для ліквідації аварії чи ускладнення, пов'язаних з втратою рухомості бурильного інструменту, визначатиме наявність каналів обслуговування у математичній моделі.

Для дослідного виробництва необхідно розглянути спочатку одноканальну систему масового обслуговування, у межах якої розглядають надходження n -ної кількості вимог або заявок на ліквідацію аварії у деякий момент часу t при кількості каналів обслуговування (УМ для реалізації запропонованої технології) $k=1$. Якщо виявиться, що кількість заявок на ліквідацію аварії з допомогою технології дискретно-розподілених ударних навантажень перевищить кількість відповідних технічних засобів для реалізації даної технології, то система видасть відмову, оскільки на практиці переходять до інших способів ліквідації аварії. Задача формулюється таким чином. На вхід одноканальної системи з відмовами надходить найпростіший потік заявок з інтенсивністю надходження λ , виконання яких розпочинає найпростіший потік обслуговування з інтенсивністю обслуговування μ . Граничні ймовірності станів системи $p_0(t)$ – ймовірність того, що УМ вільний та $p_1(t)$ – ймовірність того, що УМ зайнятий, знаходять з умови стаціонарності стану $p_0(t) \equiv p_0$ та $p_1(t) \equiv p_1$ при будь-якому t , прирівнявши диференціальні рівняння Ерланга із системи

$$\begin{cases} \frac{dp_0(t)}{dt} = -\lambda p_0(t) + \mu p_1(t) \\ \frac{dp_1(t)}{dt} = \lambda p_0(t) - \mu p_1(t) \end{cases}$$

до нуля, звідки, враховуючи, що $p_0 + p_1 = 1$, остаточно знаходять

$$\begin{cases} p_0 = \frac{\mu}{\mu + \lambda} \\ p_1 = \frac{\lambda}{\mu + \lambda} \end{cases}, \quad (16)$$

де p_0 – ймовірність обслуговування вимоги, оскільки УМ є вільним;

p_1 – ймовірність відмови, оскільки УМ є зайнятим.

Таким чином, оскільки інтенсивність потоку заявок на ліквідацію аварії визначають через середній інтервал часу між двома заявками, а інтенсивність потоку обслуговувань – через

середній час обслуговування одним технічним засобом або УМ, то граничні ймовірності p_0 і p_1 визначають середній відносний час перебування системи у станах відповідно «УМ вільний» та «УМ зайнятий», тобто визначають відносну пропускну здатність системи та ймовірність відмови відповідно. Якщо використати позначення $\alpha = \frac{\lambda}{\mu}$ – коефіцієнт завантаженості УМ, який реалізовує запроповану технологію, то при умові $p_0 + p_1 = 1$, отримують

$$p_1 = p_0 \frac{\lambda}{\mu} = p_0 \alpha. \quad (17)$$

Абсолютну пропускну здатність системи (або число заявок, що обслуговується в одиницю часу) розраховують за формулою

$$A = \frac{\lambda \mu}{\lambda + \mu}. \quad (18)$$

Суть розрахунку багатоканальної системи масового обслуговування зводиться до наведеного вище тільки з тією відмінністю, що розглядають k каналів обслуговування, тобто певну k -ту кількість технічних засобів або УМ для реалізації технології дискретно-розподілених ударних навантажень, частина з яких буде деякий час відповідно простоювати, очікуючи свого замовлення. Якщо всі k технічних засобів будуть зайняті, то система видасть відмову. Задача формулюється таким чином. На вхід k -канальної системи масового обслуговування подається найпростіший потік у кількості n заявок з інтенсивністю надходження λ . Потік обслуговування кожного каналу також найпростіший з інтенсивністю обслуговування μ . Якщо вимога застає вільним хоча б один канал обслуговування, то вона обслуговується до завершення процесу буріння свердловини або відповідного інтервалу буріння з ускладненими геологічними умовами. Якщо ні – то покидає систему без обслуговування. Така система називається класичною, граничні ймовірності станів стаціонарного режиму для якої описуються формулами Ерланга

$$p_0 = \frac{1}{\sum_{k=0}^n \frac{\alpha^k}{k!}}; \quad (19)$$

$$p_k = \frac{\frac{1}{k!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^k}{\sum_{k=0}^n \frac{1}{k!} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^k}, \quad (20)$$

де величина p_0 є ймовірністю того, що система взагалі не завантажена, а ймовірності p_k визначають граничний закон розподілу числа вмонтованих у КНБК УМ, які зайняті при бурінні свердловин. При $k = n$ остання формула поверне ймовірність відмови системи, оскільки всі УМ будуть зайнятими.

Формули (19) та (20) отримують із системи диференціальних рівнянь Ерланга

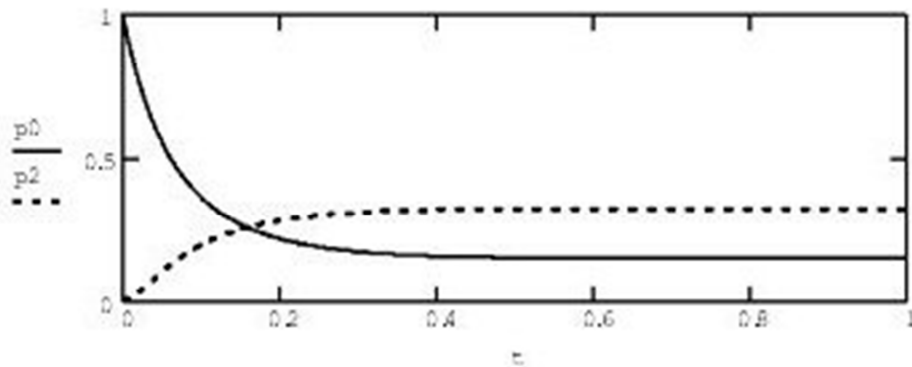


Рисунок 3 – Залежність ймовірностей від часу у нестационарному режимі

Основні висновки, які впливають із результатів проведених досліджень, а також перспективи подальшої роботи полягають у наступному.

1) Ймовірність виникнення геологічних ускладнень і аварій в часі можна змоделювати із достатньою точністю, розглядаючи основні закони розподілу, зокрема широко висвітлений в науковій літературі закон розподілу Пуассона. Розподіл ймовірності успішної реалізації відповідної нової техніки можна в першому наближенні прийняти як критерій ефективності.

2) Розглядаючи закон розподілу Пуассона в світлі теорії масового обслуговування, з можливих випадків якої для моделювання інтенсивності як виникнення, так і ліквідації геологічних ускладнень і аварій прийнято рівняння Ерланга, визначено оптимальну кількість задіяних технічних засобів та технологій. Розрахунки показують, що оптимальна кількість технічних засобів для реалізації запропонованої технології дискретно-розподілених ударних навантажень не перевищуватиме найбільш ймовірної кількості відповідних аварій або геологічних ускладнень, спрогнозованих за контрольною статистичною вибіркою, за умови зіставлення основних чинників бурових робіт і становитиме 1-2 комплекти УМ на 5 років експлуатації.

3) Умовами ефективного застосування технології дискретно-розподілених ударних навантажень визначено:

- підвищену результативність відповідних технічних засобів, порівняно із традиційними конструкціями УМ;

- необхідність постійного обліку та аналізу потоку заявок на предмет застосування УМ для ліквідації аварій чи геологічних ускладнень;

- розрахунок оптимальної кількості УМ для застосування на певний період часу, у тому числі обґрунтування кількості технічних засобів для реалізації запропонованої технології дискретно-розподілених ударних навантажень.

Звичайно, що більш точні результати будуть отримані, якщо в якості відповідних критеріїв ефективності використовувати вартісні показники, тобто безпосередньо грошові витрати бурового підприємства, пов'язані як з фінансуванням робочої сили, матеріалів і обладнання під час виконання аварійних робіт, так і витрати, пов'язані з придбанням і експлуатацією за-

пропонованих [4] технічних засобів, що підлягатиме подальшому дослідженню.

Література

1. Предупреждение и ликвидация прихватов труб при бурении скважин / А.К.Самотой. – М.: Недра, 1979. – 180 с.
2. Численные методы Монте-Карло / И.М.Соболь. – М.: Наука, 1973. – 312 с.
3. Пути повышения эффективности техники и технологии ликвидации прихватов бурильного инструмента / М.А.Мыслюк, В.М.Чарковский, И.И.Рыбич, В.Ю.Близников, М.Н.Яворский, М.П.Мельник. – М.: ИРЦ Газпром, 1997. – 64 с. (ОИ, сер. Бурение газовых и газоконденсатных скважин).
4. Про можливість застосування технології дискретно-розподілених ударних навантажень в КНБК для попередження заклинювань під час буріння свердловин / В.М.Чарковський // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2014. – № 2(51). – С.37-44.
5. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов / И.Н.Бронштейн, К.А.Семендяев. – М.: Наука, 1986. – 544 с.
6. Математичне моделювання в економіці / В.М.Чарковський, І.М.Хвостіна, І.Б.Запужляк. – Івано-Франківськ: вид-во Ів.-Фр. національного технічного ун-ту нафти і газу, 2004. – 128 с.

Стаття надійшла до редакційної колегії
01.03.17

Рекомендована до друку
професором Чудиком І.І.
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)
канд. техн. наук Ставичним Є.М.
(НДП ПАТ «Укрнафта», м. Івано-Франківськ)