

УДК 622.242.32

УДОСКОНАЛЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ПРОГНОЗУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ БУРОВИХ ВЕЖ

¹ І.І.Цюцяк, ² О.М.Карнаш¹ НВФ „Зонд”, м. Івано-Франківськ, вул. Микитинецька, 5а, тел. (0342) 536313² ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 42430
e-mail: public@nimg.edu.ua

Рассматриваются вопросы прогнозирования технического состояния буровых вышек, в том числе с сверхнормативным сроком эксплуатации. Предложено усовершенствовать математическую модель определения фактического технического состояния, суть которой в том, что сначала прогнозирования выполняются для каждого показателя технического состояния, а конечный результат получаем как композицию отдельных прогнозов для каждого комплексного показателя, а неопределенности, которые возникают, решаются с помощью метода экспертных оценок.

Проблема безпечної експлуатації бурових веж (БВ) є надзвичайно актуальною для підприємств нафтогазового комплексу. За даними Держнаглядохоронпраці та НВФ „Зонд” – головної організації в галузі неруйнівного контролю та технічної діагностики бурового і нафтогазового інструменту за останні роки спостерігається стабільна кількість відмов елементів бурових веж [1]. Найхарактернішими дефектами є:

– дефекти у зварних з’єднаннях конструктивних елементів бурових веж, наприклад: розкоса (рис. 1, б) – бурова Яблунівка 154; швелера основи (рис. 1, а) – бурова Лютнянська 1;

– дефекти порушення форми несучих конструкцій, наприклад: деформації швелера (рис. 2, а) – Волошки 32, деформація рами та реборди кронблока (рис. 2, б) – Зачепилівка 80.

Особливо це стосується бурових веж з понаднормативним терміном експлуатації, кількість яких за останні п’ять років збільшилася щонайменше вдвічі.

Різні схеми технічного обслуговування (ТО) та умови експлуатації, а також ступінь завантаження обладнання на бурових підприємствах призводить до того, що до завершення нормативного (розрахункового) терміну експлуатації обладнання підходить з різним ступенем зношування та ступенем вичерпання свого технічного ресурсу. У таблиці 1 наведено дані про конкретні бурові вежі, на яких у 2006 році проведено технічне діагностування під час якого було виявлено дефекти, зображені на рис 1 та 2. Тому виникає можливість і необхідність, через економічну ситуацію, в продовженні терміну експлуатації понаднормативного терміну до граничного зношування та старіння.

Комплекс робіт із продовження термінів експлуатації регламентують нормативні та технічні документи [2, 3] та ін.

The issues of derricks technical state forecasting are considered. The improvement of mathematical model of technical state forecasting is proposed. It is a system of technical state factors and forecast for everyone is calculated separately. The final result is the composition of separated forecasts for complex factor. The vagueness are solved by expert evaluation.

Вказані нормативні документи були введені в дію у 2000 році і передбачали проведення оцінки технічного стану (ТС) бурової вежі шляхом діагностування її основних елементів та визначення залишкового ресурсу з метою встановлення терміну безвідмовної експлуатації в заданих умовах. Під час встановлення залишкового ресурсу повинен бути забезпечений запас для переходу об’єкта в граничний стан.

Методика оцінки технічного стану ґрунтується на аналізі зіставлених фактичних кількісних значень показників пошкодженості елементів, визначених у ході проведення неруйнівного контролю, з їх допустимими значеннями. Зокрема приймаються до уваги:

– зменшення товщини стінки несучих елементів;

– наявність, вид та кількість дефектів у несучих і допоміжних елементах металоконструкції;

– зміна фізико-математичних характеристик нижче значень, наведених у нормативній документації;

– ступінь корозійного пошкодження елементів, характерні види корозійних пошкоджень.

На підставі проведеного аналізу, як правило, проводять розрахунок вежі методом граничних станів, який дає змогу виявити фактичний запас міцності металоконструкції.

Впродовж останніх років на практиці для оцінки технічного стану різних технічних об’єктів широко застосовують різні методи моделювання, зокрема процесорне моделювання, застосування методу кінцевих елементів та ін. [4]. Усі вказані методи мають певні обмеження та недоліки і вимагають доопрацювання.

Нами пропонується удосконалити математичну модель прогнозування технічного стану бурового устаткування із застосуванням методу експертних оцінок.



а



б

Рисунок 1 — Дефекти у зварному з'єднанні складових бурої вежі



а



б

Рисунок 2 — Дефекти порушення форми конструкції

Таблиця 1 — Дані технічного діагностування бурових веж, на яких виявлено дефекти

№ п/п	№ бурової	Підприємство-власник вежі	Тип бурової вежі	Зав. №	Рік виготовлення	Граничний термін експлуатації
1	154 Яблун.	Полтавське ВБР БУ „Укрбургаз”	ВМА-45х320	13543	1987	22.02.2006
2	32 Волошки	Прикарпатське УБР ВАТ „Укрнафта”	ВБ-53х320М	93	1990	27.11.2003
3	80 Зачепилівка	Стрийське ВБР БУ „Укрбургаз”	БУ-75	2742	1986	23.05.2006
4	305 Ланна	Хрестищинське ВБР БУ „Укрбургаз”	ВБ-53х320М	17	1994	26.05.2006
5	1 Лютнянська	Стрийське ВБР БУ „Укрбургаз”	ВБ-53х320М	002	1994	21.03.2006

У визначенні фактичного технічного стану і залишкового робочого ресурсу БВ вирішальне значення має прийняття рішення про можливість подальшої експлуатації даної БВ. Для формалізації процесу прийняття такого рішення необхідно побудувати математичну модель простору допустимих значень показників ТС

БВ і модель траєкторії, яку описує БВ у просторі показників її ТС.

Пропонується математична модель динаміки ТС БВ, яка ґрунтується на лінійних моделях простору показників ТС, траєкторії руху ТС БВ у просторі показників ТС і методах математичної статистики. Для опису змін значень показників ТС за одиницю системного часу

прийнято так званий робочий цикл, або просто цикл. Під поняттям робочого циклу розуміється час буріння свердловини разом з необхідними технологічними операціями, в яких використовується БВ. Дана модель має апроксимативний характер, так як для її побудови використовуються дані, одержані в процесі нормальної експлуатації БВ.

У моделюванні простору показників ТС БВ використано методи компонентного аналізу (метод головних компонент) [5,6,7]. У результаті застосування вказаних методів відбувається перехід від довільного n -вимірного простору показників ТС БВ і показників умов роботи БВ до простору комплексних показників ТС, які є лінійними комбінаціями вихідних показників

$$z_i(x) = l_{i,1}x_1 + l_{i,2}x_2 + l_{i,3}x_3 + \dots + l_{i,N}x_N, \quad (1)$$

де $l_{i,1}, l_{i,2}, l_{i,3}, \dots, l_{i,N}$ – складові i -го власного вектора кореляційної матриці вихідних показників R ; $x_1, x_2, x_3, \dots, x_N$ – значення вихідних показників технічного стану БВ.

Власні числа і вектори матриці кореляцій R можна знайти шляхом розв'язання рівняння

$$(R - \lambda_i I) \cdot l_i = 0, \quad (2)$$

де: R – кореляційна матриця для інформаційної матриці X ; λ_i – i -те власне число матриці R ; l_i – власний вектор матриці R , що відповідає власному числу λ_i [8].

Одержані таким чином комплексні показники мають важливі для моделювання динаміки зміни ТС БВ властивості:

1. Комплексні показники $z(x)$ некорельовані між собою, що дає можливість розглядати їх окремо.

2. Комплексні показники технічного стану БВ, що знайдені методом головних компонент, серед усіх інших лінійних способів найкращим способом відновлюють як взаємозв'язки між вихідними показниками технічного стану БВ і умовами її роботи (кореляційну матрицю R), так і геометрію простору вихідних показників (траєкторію руху точки технічного стану $O(X)$ у просторі можливих технічних станів.

3. Власні числа λ_i , що відповідають власному вектору l_i , і відповідно інтегрованому показнику z_i , визначають частку дисперсії (розкидання) вихідних даних, яку бере на себе даний інтегрований показник. Досвід застосування компонентного аналізу (метод головних компонент) в різноманітних галузях науки і техніки показує, що перші власні числа мають значення більші, ніж наступні. Звідси випливає можливість без великих втрат інформації обмежити кількість інтегрованих показників величиною $p \ll N$.

Граничні значення комплексних показників, що формують межу допустимих значень параметрів ТС, можна одержати за формулою (1), а їх довірчі інтервали за формулою

$$z_{Gi} \pm z_{Gi} / [1 - N \times N_{\alpha/2} \cdot (2/(N-1))^{1/2}], \quad (3)$$

де: z_{Gi} – граничне значення i -го інтегрованого показника, N – кількість вихідних показників, $N_{\alpha/2} - \alpha \times 100\% / 2$ -квантиль стандартного нормального розподілу.

Для прогнозування значень комплексних показників використовується метод авторегресії першого порядку

$$z_j = b \cdot z_{j-1} + \varepsilon_j, \quad j = N_m, \dots, N_n, \quad (4)$$

де: z_j – j -те значення інтегрованого показника; z_{j-1} – попереднє його значення; b – коефіцієнт авторегресії, ε_j – випадкові помилки; N_m – цикл з якого починається етап прогресивної зміни значень інтегрованого показника; N_n – кількість відпрацьованих циклів.

Прогнозування виконується окремо для кожного показника ТС, а кінцевий результат одержується як композиція окремих прогнозувань для кожного комплексного показника. Розрахункове прогнозне значення комплексного показника z_e і його довірчі інтервали можна знайти за наступними формулами:

$$z_e = b \cdot z_{Nn}, \quad (5)$$

$$z_e \pm N_{\alpha/2} \cdot (S_z)^{1/2}, \quad (6)$$

де $N_{\alpha/2} - \alpha \times 100\% / 2$ -квантиль стандартного нормального розподілу.

Коефіцієнт авторегресії b у формулі (5) і дисперсію прогнозованого значення комплексного показника S_z визначають за формулами:

$$b = \Sigma(z_j \cdot z_{j-1}) / \Sigma z_{j-1}^2, \quad (7)$$

$$S_z = \Sigma(z_j - b \cdot z_{j-1})^2 / N_a. \quad (8)$$

На рисунку 3 зображено приклад зміни ТС БВ у площині двох перших комплексних показників для двох БВ. Так для БВ A робочий ресурс є вичерпаним, тоді як для БВ B можлива подальша її експлуатація.

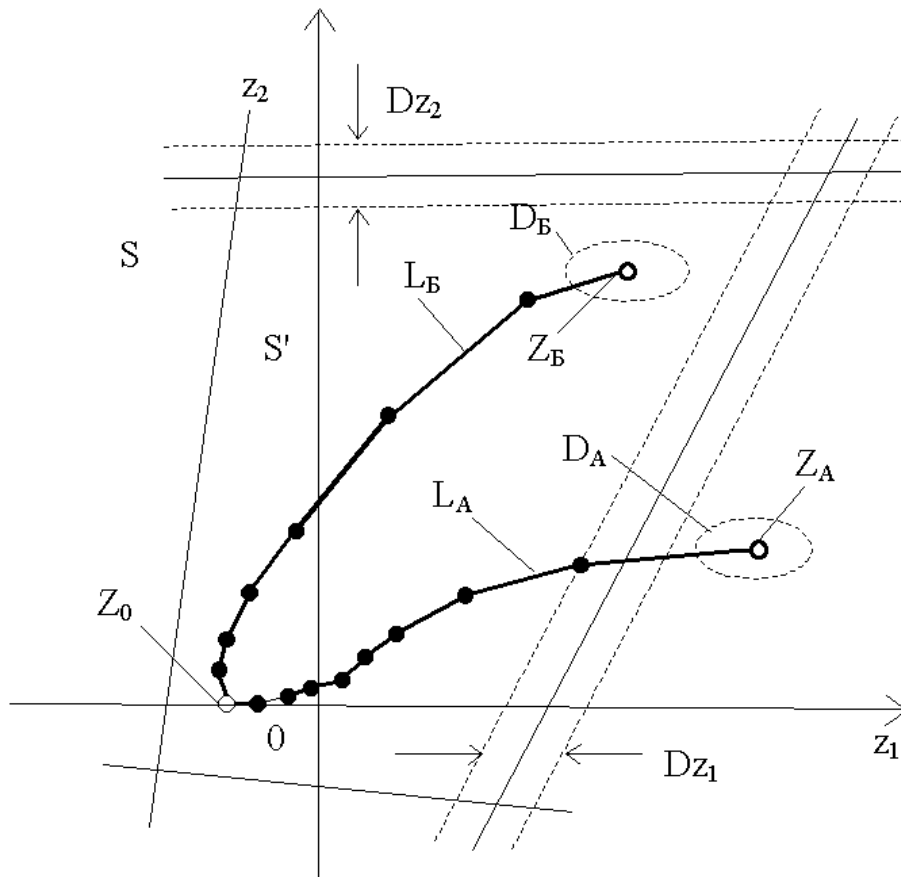
Як вже було зазначено, прийняття рішення про подальшу експлуатацію БВ є принциповим для визначення залишкового робочого ресурсу БВ. Таке рішення приймається на основі аналізу взаємного розташування прогнозованого значення комплексного показника ТС БВ і меж допустимих значень таких показників. Аналіз проводиться окремо для кожного показника. Рішення про вичерпання робочого ресурсу приймається якщо тільки один будь-який з показників порушує граничне значення.

На рисунку 4 зображено різні варіанти співвідношення вірогідних зон для меж допустимих значень інтегрованих показників технічного стану БВ і прогнозованого його значення. Так для варіанта a) вірогідні зони межі і прогнозованого значення інтегрованого показника не перетинаються, при цьому вірогідна зона прогнозованого значення показника цілком знаходиться в межі його допустимих значень. Тому єдиним обґрунтованим рішенням про подальшу експлуатацію БВ буде позитивне рішення. Аналогічно, у випадку e) слід припинити подальшу експлуатацію БВ, так як вірогідна зона прогнозованого значення інтегрованого показника цілком знаходиться поза межею допустимих його значень.

Для випадків b) – d) прийняття рішень про подальшу експлуатацію БВ значно ускладнюється внаслідок імовірносної природи оцінок граничних і прогнозованих значень інтегрова-

них показників технічного стану БВ. Якщо скористатися точковими розрахунковими оцінками їх значень, то у випадках б) і в) слід було б прийняти рішення про можливість подальшої

Для розв'язання вказаної невизначеності пропонується використання методу експертних оцінок. Пропонована математична модель, як і будь-яка інша модель, реалізує формалізований



z_1, z_2 – інтегровані показники; S – зона можливих технічних станів БВ; S' – зона допустимих технічних станів БВ; L_A, L_B – траєкторії зміни технічного стану бурових веж А, і Б відповідно; Z_A, Z_B – прогнозовані значення інтегрованих показників технічного стану; Z_0 – початкові значення показників технічного стану; D_A, D_B – вірогідні зони прогнозованого технічного стану бурових веж А, і Б; Dz_1, Dz_2 – довірчі інтервали граничних значень z_1 і z_2

Рисунок 3 — Динаміка зміни технічного стану БВ у площині двох перших інтегрованих показників z_1 і z_2

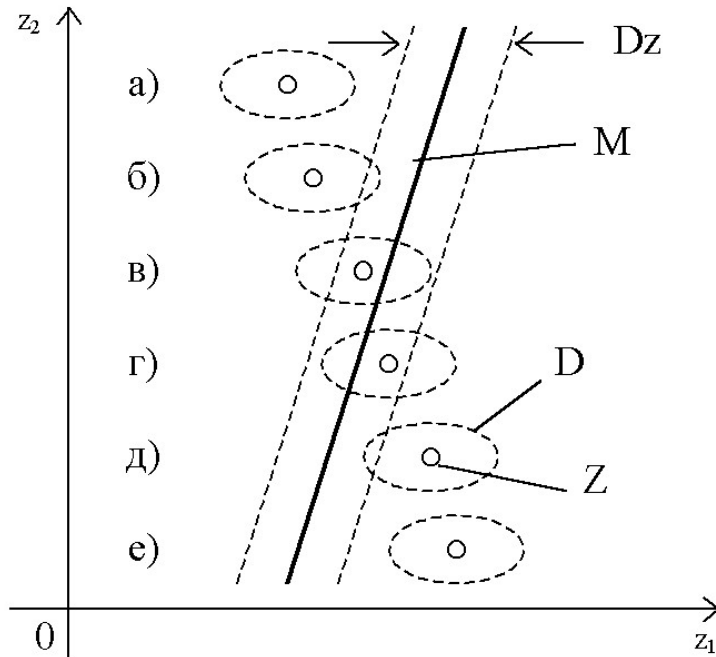
експлуатації даної БВ. У випадках з) і д) приймається рішення про вичерпання робочого ресурсу БВ.

Врахування інтервальних оцінок викликає неоднозначність у процесі прийняття відповідного рішення про подальшу експлуатацію БВ. Згідно з ідеологією статистичного оцінювання дійсне значення деякої величини не може бути визначено точно, а знаходиться в межах деякого інтервалу (довірчого інтервалу). Ширина довірчого інтервалу визначається з одного боку статистичними характеристиками величини, значення якої визначається, і заданої апріорно довіри до висновку з другого. У нашому випадку прийняття відповідного рішення додатково ускладнюється тим, що значення інтегрованих показників технічного стану БВ є імовірнісним як для прогнозованого так і для граничного значення показника. Тому у випадках б) – д) виникає деяка невизначеність.

підхід до розв'язання практичної задачі прогнозування технічного стану БВ. Математична модель не враховує інформацію, яка не може бути формалізована з достатньою точністю, або зовсім не піддається формалізації. Джерелом такої інформації, яка до речі може мати вирішальне значення, є досвід спеціалістів. Методи експертних оцінок дають змогу, в деякому сенсі, врахувати такий досвід.

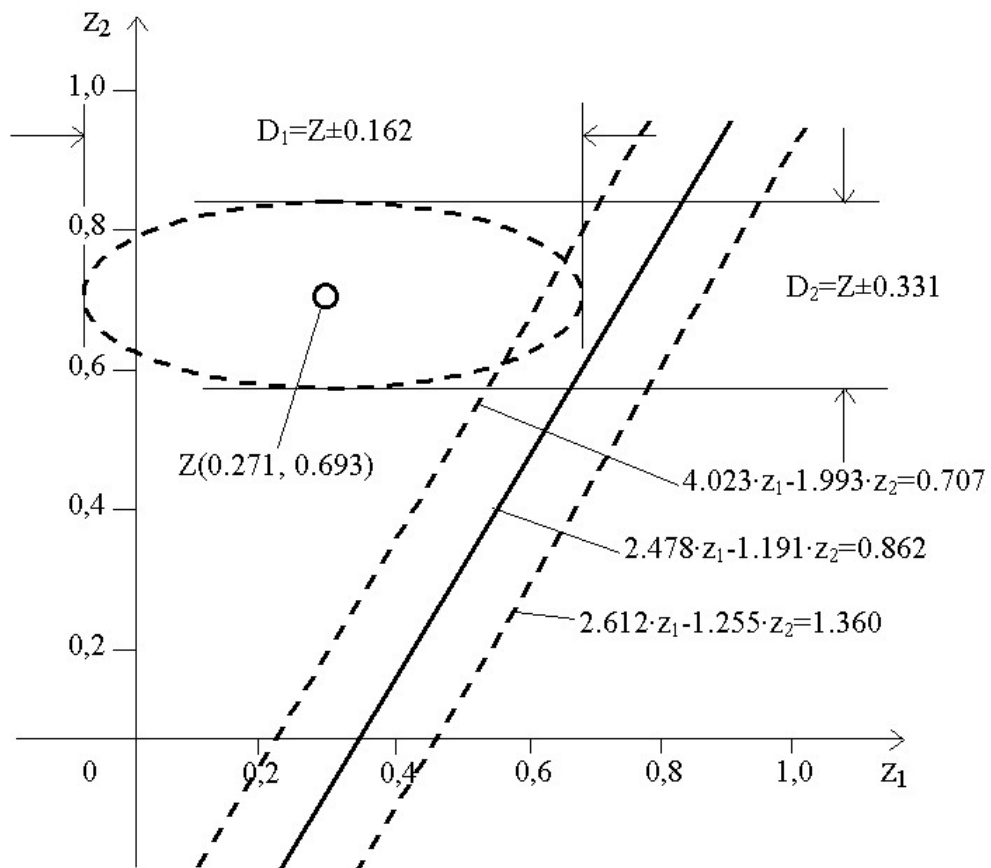
Експертам, у кількості M_E надається інформація про попередні робочі цикли БВ, діаграми динаміки технічного стану БВ типу зображеної на рис. 1 і проектна інформація про планований робочий цикл. Перед експертами ставиться запитання: "Чи є можливим проведення планованого робочого циклу БВ?". Складається таблиця відповідей експертів, яка має M_E рядків відповідно до кількості залучених експертів і двох стовпчиків для відповідей "так" чи "ні". Відповідь експерта "так" кодується одиницею у відповідному стовпчику і нулем у дру-

гому. Для відповіді "ні" кодування – протилежне. Якщо експерт не може однозначно відповісти на поставлене запитання, тоді код $\frac{1}{2}$ заноситься в обидва стовпчики. Рішення про виконання проектного робочого циклу приймається за більшістю голосів експертів:



z_1, z_2 – інтегровані показники, Z – прогнозне значення технічного стану,
 D – вірогідна зона значення технічного стану, M – межа зони допустимих технічних станів,
 Dz – довірчий інтервал межі допустимих технічних станів

Рисунок 4 — Взаємне положення межі зони допустимих технічних станів і вірогідної зони значення технічного стану БВ у площині двох перших інтегрованих показників z_1 і z_2



z_1, z_2 – інтегровані показники, Z – прогнозне значення технічного стану,
 D_1, D_2 – розміри вірогідної зони значення технічного стану за показниками z_1 і z_2

Рисунок 5 — Результати моделювання технічного стану бурової вежі

якщо $S_{max} > S_{ni}$ – проводити наступний робочий цикл, (9)
 якщо $S_{max} < S_{ni}$ – не проводити наступний робочий цикл,
 де S_{max} – сума голосів експертів "так", S_{ni} – сума голосів експертів "ні".

Для оцінки достовірності експертного рішення використовується коефіцієнт згоди [9]:

$$U=2 \cdot S_s / \{ (M_E \cdot (M_E - 1)) \}, \quad (10)$$

де: S_s – кількість випадків згоди експертів, M_E – кількість експертів.

Величина S_s розраховується за формулою:

$$S_s = S_{max} \cdot (S_{max} - 1) + S_{ni} \cdot (S_{ni} - 1). \quad (11)$$

За спеціальними таблицями [9] розподілу величини S_s знаходять імовірність, з якою думки M_E експертів не збігаються.

Було проведено моделювання динаміки змін значень показників ТС БВ типу (вказати тип БВ) для (вказати регіон). У результаті моделювання одержано такі вирази для однієї з меж зони допустимих значень двох перших комплексних показників:

Межа

$$2.478 \cdot z_1 - 1.191 \cdot z_2 = 0.862,$$

Ліва довірча межа

$$4.023 \cdot z_1 - 1.993 \cdot z_2 = 0.707,$$

Права довірча межа

$$2.612 \cdot z_1 - 1.255 \cdot z_2 = 1.360.$$

У результаті моделювання динаміки зміни значень комплексних показників одержано такі прогнозовані їх значення: $z_1 = 0,271$ і $z_2 = 0,693$. Відповідно, одержано межі вірогідної зони прогнозованих значень комплексних показників: $z_1 = 0,271 \pm 0,331$ і $z_2 = 0,693 \pm 0,162$.

Розрахунки були проведені для 95% рівня надійності.

Результати моделювання зображено на рисунку 5. З аналізу взаєморозташування вірогідних зон для межі допустимих значень комплексних показників і вірогідної зони їх прогнозованих значень випливає, що:

1. Прогнозований ТС даної БВ знаходиться в межах допустимих значень;

2. Вірогідні зони межі допустимих значень показників ТС і прогнозованих їх значень перетинаються між собою.

Таким чином, виникає невизначеність у процесі прийняття рішення про подальшу експлуатацію даної БВ. Для вирішення вказаної невизначеності було проведено експертне опитування п'ятих спеціалістів ($M_E = 5$). Результати опитування наведено в таблиці 2.

За даними таблиці 2 одержано такі значення: $S_s = 8,75$ і $U = 0,9$.

За більшістю голосів експертів приймаємо рішення про подальшу експлуатацію даної БВ. Визначимо значущість коефіцієнту згоди U . За даними спеціальної таблиці [10] знаходимо імовірність неузгодженості відповідей експертів.

Таблиця 2 — Результати експертного опитування

Експерт	Голоси	
	"Так"	"Ні"
А	1	0
Б	1	0
В	1/2	1/2
Г	0	1
Д	1	0
Сума	7/2	3/2

Таблиця 3 — Витяг з таблиці ймовірності неузгодженості експертних оцінок

S_s	Імовірність неузгодженості P
6	0,375
10	0,063

Таблиця 4 — Узгодженість парних порівнянь імовірність (P) того, що значення S_s буде досягнуто або перевищено

		M_E							
		3		4		5		6	
S_s	P	S_s	P	S_s	P	S_s	P	S_s	P
1	1,000	2	1,000	4	1,000	6	1,000		
3	0,250	3	0,625	6	0,375	7	0,688		
		6	0,125	10	0,063	10	0,219		
						15	0,031		

Шляхом лінійної інтерполяції знайдемо імовірність для значення $S_s = 8,75$. Для цього значення S_s імовірність неузгодженості експертних оцінок складає $P = 0,16$. Таким чином, експертні оцінки узгоджені з імовірністю $1 - 0,16 = 0,84$.

Високі значення коефіцієнта узгодженості U та імовірності узгодженості експертних оцінок дають можливість прийняти обґрунтоване рішення про подальшу експлуатацію даної БВ.

Таблиці ймовірності неузгодженості експертних оцінок у довідковій літературі зустрічаються досить рідко, тому тут наводиться така таблиця.

Таким чином, запропоновано математичну модель прогнозування фактичного технічного стану, суть якої полягає в тому, що спочатку прогнозування виконуються для кожного показника технічного стану, а кінцевий результат одержуємо як композицію окремих прогнозувань для кожного комплексного показника. Як правило, значення інтегрованих показників ТС БВ є імовірнісними, то невизначеності, які виникають при цьому, розв'язуються за допомогою методу експертних оцінок.

Література

1. Карпаш О.М., Цюцяк І.І., Буній М.В., Козлов А.В. Методика оцінювання фактичного технічного стану бурових веж // Нафт. і газ. пром-сть. – 2005. – № 1. – С. 25-29.
2. ГСТУ – 320.02829777.014-99 Неруйнівний контроль та оцінка технічного стану металоконструкцій бурових веж у розібраному і зібраному стані.
3. СТП 320.00135390.068-2002 Оцінка фактичного технічного стану основ бурових веж.
4. Придвижкин В.А., Бабин С.Г., Гарин Ю.Р. Экспертиза промышленной безопасности технических устройств буровых установок. – М.: Национальный институт нефти и газа, 2005. – 80 с.
5. Прикладная статистика: Классификация и снижение размерности: Справ. изд. / С.А.Айвазян, В.М.Бухштабер, И.С.Енюков, Л.Д.Мешалкин; Под ред. С.А.Айвазяна. – М.: Финансы и статистика, 1989. – 607 с.
6. Иберла К. Факторный анализ / Пер. с нем. – М.: Статистика, 1980. – 398 с.
7. Статистические методы для ЭВМ / Под ред. К.Энслейна, Э.Рэлстона, Г.С.Уилфа: Пер. с англ. – М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. – 464 с.
8. Уилкинсон Дж., Райнш С. Справочник алгоритмов на языке АЛГОЛ. Линейная алгебра / Пер. с англ. – М.: Машиностроение, 1976. – 389 с.
9. Прикладная статистика: Исследование зависимостей: Справ. изд. / С.А.Айвазян, И.С.Енюков, Л.Д.Мешалкин; Под ред. С.А.Айвазяна. – М.: Финансы и статистика, 1985. – 487 с.
10. Кендэл М. Ранговые корреляции. Зарубежные статистические исследования. – М.: Статистика, 1975. – 216 с.