

Vyslouh S. P. *Primenenie metodov diskriminantnogo analiza pri tehnologicheskom proektirovanii // Rezanie i instrument v tehnologicheskikh sistemah. Mezhyved. Nauchn.- tehn. sbornik. –2001. –Vyp. 60. – S. 26-35.* 4. Vyslouh S. P. *Primenenie metodov klasternogo analiza pri proektirovanii tehnologicheskikh processov // Vestnik Sev. GTU. Vypusk 36: Avtomatizacija processov i upravlenie. Sb. Nauchn. Trudov Sevastop. Nac. tehn. un-t. – 2002. – S. 103-108.* 5. Vysloukh S. P. *Informacijni tehnologii v zadachah tehnologichnoï pidgotovki prilado- ta mashinobudivnogo virobnictva: monogr. – K.: NTUU “KPI”, – 2011. – 488 s.* 6. Vysloukh S. P., Rogovij O. M., Voloshko O. V. *Svidoctvo na reestraciju avtors'kogo prava na tvir: “Komp’juterna programa “Avtomatizovana sistema obrobki tehnologichnoï informacii “Analisis” № 49337 vid 27.05.2013 r.*

УДК 539.4

**В. І. Білобородченко**

Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра зварювального виробництва, діагностики  
і відновлення металоконструкцій

## **ІНФОРМАЦІЙНА ЗДАТНІСТЬ МАГНІТОСТАТИЧНИХ МЕТОДІВ ДІАГНОСТУВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ (НДС) ТРУБОПРОВІДІВ. ЧАСТИНА II**

© Білобородченко В. І., 2014

**Розглянуті питання інформативної здатності магнітно-статичного діагностування напружено-деформованого стану трубних конструкцій, оцінених за величиною  $\alpha$ -коефіцієнта магнітної неоднорідності за різницею головних напружень.**

**Ключові слова:** магістральний трубопровід, напружено-деформівний стан, магніто-статичне діагностування, критичні напруження, статистичні моделі, інформаційна здатність.

**The questions of informative power of the magnetic-static diagnosing of tense-deformed state of pipe constructions are considered on size of  $\alpha$ -coefficient of magnetic heterogeneity in relation to grounds of main tensions.**

**Key words:** header pipe, stress-deformation state, magneto-static diagnostics, critical strtes, statistical models, information capacity.

Магістральні трубопроводи є енергонапруженими об'єктами, відмова яких супроводжується значними матеріальними та екологічними втратами. Таким чином, надійність безпечної експлуатації трубопровідного транспорту, який працює під тиском, повинна гарантуватися запасом міцності при заданих умовах роботи.

Розрахунок на міцність такої конструкції принципово не може врахувати всіх експлуатаційних чинників, що можуть виникнути в часі його роботи. Непроєктні навантаження геологічного, механічного, електро-хімічного ін. типів в поєднанні з утвореними експлуатаційними

дефектами, що можуть доповнюватися не виявленими під час контролю монтажно – будівельних робіт ненормованими відхиленнями, стають причиною руйнування трубопроводів [1, 3].

Визнається, що найбільш впливовими чинниками різкого зменшення ресурсу таких об'єктів є стрес – корозія та зміна напружено – деформівного стану (НДС) матеріалу конструкції, що утворюють локальні зони критичних напружень (ЗКН). Найважливішою складовою, з рештою рівних умов, вважається НДС та його зміна під впливом експлуатаційних та природно-кліматичних факторів [1, 3].

Останнє вимагає постійного моніторингу робочого стану трубопроводів, що виконується за такими основними напрямками: 1. Моніторинг технічного стану; 2. Моніторинг напружено – деформівного стану; 3. Геодезичний моніторинг. Для цього застосовуються низка технічних засобів, серед яких чинне місце займають непрямі магнітні методи контролю, котрі базуються на встановленій кореляційній залежності між магнітними та механічними параметрами матеріалу [3]. Такі методи та їх технічне забезпечення мають низку переваг, особливо на ранніх стадіях оцінки НДС: 1. Можливість контролю без виведення трубопроводу з експлуатації (робочий рівень навантаження стінки труби); 2. Достатня продуктивність контролю в польових умовах; 3. Принципова можливість безперервного дистанційного спостереження.

Для оцінювання біжучого стану НДС використовуються такі магнітні ефекти: 1. Магнітні шуми; 2. Магнітна пам'ять; 3. Магнітна анізотропія; 4. Залишкова намагніченість; 5. Магнітна проникність; 6. Коерцитивна сила. Роботи проведені в області магнітоструктурної дефектоскопії [2] дозволили встановити закономірності між магнітними та фізико – механічними властивостями основних конструкційних матеріалів. Таким чином за зміною магнітних параметрів матеріалу можна відстежувати динаміку зростаючої ушкодженості трубопроводу в умовах експлуатації.

Одним з ефективних магнітних параметрів за відгуком на зміну НДС визнається коерцитивна сила  $H_C$  (А/см), оскільки є найбільш чутливою до зміни рівня інтенсивності та локалізації дислокаційних полів в металі і достатньо пропорційною від механічних властивостей матеріалів (ГОСТ 30415-96). Величина коерцитивної сили є інтегральною від всіх типів напружень, що діють у навантаженому об'єкті: 1. Напруження третього роду – обумовлені тонкою структурою матеріалу – склад та тип кристалічної ґратки, розподіл та інтенсивність зміни полів дислокацій і домішків; 2. Напруження другого роду – обумовлені термо – деформаційним циклом зварювання або інших термічних процесів; 3. Напруження першого роду пов'язані з експлуатаційним тиском робочого тіла в трубопроводі.

Відповідно суперпозиція таких напружень, в залежності від знаку полів залишкових механічних напружень спричинених попередніми процесами технологічного оброблення конструкції, може по різному впливати на виміряне значення коерцитивної сили навіть в області пружних деформацій.

Проте прикладні методики оцінювання НДС за магнітними параметрами матеріалу також володіють значними недоліками [2,3]: 1. Достатньо однозначна кореляція за рівнем механічних напружень та магнітними відгуками в області пружних напружень втрачається і результати стають не певними при переході навантаження в область пружно – пластичних та пластичних деформацій матеріалу; 2. Неоднозначність виявлених закономірностей зміни величини напруженості поля залишкового намагнічування при зростанні механічних деформацій в пружній області; 3. Відповідно значна похибка вимірювань (30 %) та визначення дійсних напружень в матеріалі за вимірюванням коерцитивної сили; 3. Відсутність технологічних регламентів контролю за магнітними параметрами; 4. Відсутність строгої розрахункової оцінки надійності потенційно небезпечних ЗКН конструкції.

Вищезазначене утруднює використання програмних комплексів для прогнозування експлуатаційної надійності трубопроводів. Тим не менше, в практиці діагностування біжучого стану НДС та виникнення локальних ЗКН таких об'єктів використовуються методи, що базуються на визначенні коерцитивної сили  $H_C$  (А/см) нормально  $H_{\perp}$  та вздовж осі навантаження  $H_{\parallel}$  труби, співвідношення яких оцінюється розрахунковими коефіцієнтами  $a_1, a_2$  [4]

$$a_2 = \Delta H_C = H_{\perp} - H_{\parallel}; a_1 = \frac{H_{\perp} - H_{\parallel}}{H_{\perp} + H_{\parallel}} \quad (1)$$

У роботі [4,5] запропонований підхід, який дозволяє спрогнозувати НДС та розвиток ЗКН, а також оцінити інформаційну спроможність методу непрямих магнітних спостережень за розрахунковим коефіцієнтом  $a_1$ . Проте не наведені: 1. Коректне обґрунтування статистичного підходу до модельного опису зв'язку між коефіцієнтними показниками коерцитивної сили та напруженим станом матеріалу; 2. Не розкриті умови перенормування вихідних даних для створення фізично-імовірнісної моделі загального виду  $a_i = f(H_{j,k}; \sigma_n)$ , де  $a_i$ ,  $i = 1,2$  – відповідні коефіцієнти;  $H_{j,k}$  – відповідне значення коерцитивної сили нормально та вздовж осі труби виміряні при  $\sigma_n$  напруженні у стінці стендової труби; 3. Не вказані статистично надійні поля достовірності модельного опису.

**Мета роботи** полягає в обґрунтуванні можливості використання фізично – імовірнісних моделей, створених на базі розрахункового коефіцієнту  $a_2$ , для прогнозування величини НДС трубної оболонки, що знаходиться під різним внутрішнім тиском, визначенні інформаційної спроможності таких моделей.

**Виклад основного матеріалу.** За основу прийняті результати вимірювань показників коерцитивної сили та розрахункового коефіцієнта  $a_2$  (рис. 1.2) для трубних матеріалів на випробувальному стенді за методикою викладеною попередній роботі [4].

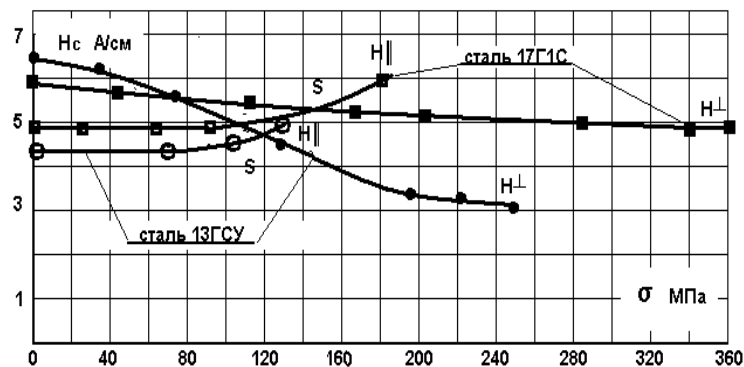


Рис. 1. Залежність коерцитивної сили  $H_c$  при вимірюванні відносно головних площин напружень. (позначення у тексті)

Розраховані кореляційні моменти для даних матеріалів

$$\eta^2 = \frac{\sum_{i=1}^m (\bar{y}_{\text{int}} - \bar{y})^2}{(n-1)S^2}, \quad (2)$$

де  $\bar{y}_{\text{int}}$  – відповідно значення коефіцієнту  $a_2$  для даного інтервалу задавання зусилля навантаження;  $\bar{y}$  – усереднене за масивом  $n$ - даних значення цього коефіцієнту;  $S^2$  – дисперсія дослідних даних становлять: сталь 13ГСУ:  $\eta_{H_{\perp}} = 0,44$ ,  $\eta_{H_{\parallel}} = 0,40$ ; сталь 17Г1С:  $\eta_{H_{\perp}} = 0,194$ ,  $\eta_{H_{\parallel}} = 0,78$  і демонструють нелінійний характер зміни магнітних характеристик матеріалу при зростанні НДС, а ніж вказано у [2].

Подальший розрахунок модельних аналогів оцінювання НДС за коефіцієнтом  $a_2$  базується на наступних положеннях: 1. Надійність будь – якої системи є величиною імовірнісною, а тому будь – яка модель її коректного опису, базована на вибірці рандомізованих вимірювань з певною статистичною надійністю, є стохастичною і може бути строго викладена за відомими й прийнятними для досліджуваної системи імовірнісними законами, зокрема щільністю

розподілення. 2. Для експлуатованих технічних систем з незворотною зміною надійності процеси її втрати описуються класом експоненціальних розподілень; 3. Відповідно теорії Лапласа для тонких оболонки напруження в них є інваріантними до вектора прикладання навантаження, а еквівалентні напруження в таких оболонках, оскільки радіальна та меридіональна їх складові значно перевищують прикладене зусилля визначаються IV теорією міцності. 4. Результати вимірювань коерцитивної сили при навантаженні такої оболонки зовнішнім тиском є дуплетом з таким самим статистичним розкидом результатів. 5. Таким чином, стохастична функціональна залежність  $a_2 = f(\sigma)$  є симетрична відносно осі  $a_2$  і може бути приведена, шляхом перенормування, до стандартного центрально – симетризованого розподілення щільності ймовірності  $p(x)$  зміни напруженого стану матеріалу оболонки, що характеризується його магнітними властивостями і описується класом експоненціальних моделей виду [\*]

$$p(x) = \frac{\alpha}{2\lambda\sigma\Gamma(1/\alpha)} \exp\left(-\left|\frac{x-x_c}{\lambda\sigma}\right|^\alpha\right), \quad (3)$$

де  $\lambda = \sqrt{\frac{\Gamma(1/\alpha)}{\Gamma(3/\alpha)}}$  – гама – функція;  $\sigma$  – середнє квадратичне відхилення (с.к.в.);  $x_c$  – координата центру розподілення змінної  $x$ ;  $\alpha$  – характерна для даного розподілення постійна.

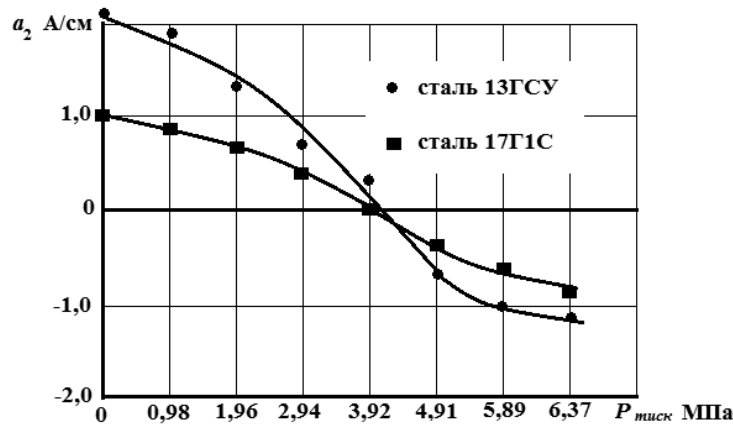


Рис. 2. Залежність розрахункового коефіцієнта  $a_2$  від внутрішнього тиску

Модель (3) спирається на основне розподілення математичної статистики – гама, що за фізичною моделлю, в даному випадку, визначає інтервал зміни навантаження на оболонку, необхідний для появи наступної  $\alpha$  – події (зміна коерцитивної сили) з умови їх незалежності та постійній їх інтенсивності  $\lambda$ . При  $\alpha \neq 1$  виконується умова розподілення Ерланга, фізична модель якого – розподіл (ширина інтервалу зміни зусилля навантаження на оболонку) між першою оцінкою стану оболонки за коерцитивною силою та наступною його оцінкою.

[\*] – список джерел для статистичного аналізу даних надано у [4].

При перенормуванні масиву – вибір масштабу системи координат для модельного опису полігону розподілення дослідних даних прийняте до уваги наступне: 1. При досягненні матеріалом оболонки труби напружень відповідних області пластичного течіння значення коерцитивних сил від радіальної та твірної складових напружень інваріантні до зростання випробовувального тиску до повного руйнування оболонки (рис. 1, 3). 2. Відповідно, незмінними лишаються описові коефіцієнти  $a_i$  співвідношення величин коерцитивних сил. 3. Мінімізація можливості утворення полігону розподілення дослідних даних, що описується моделлю з “важкими хвостами”. Останнє означає виникнення більших відхилень від середнього розподілення дослідних даних, яке, за суттю, є початковим базовим вимірюванням значень складових коерцитивної сили за векторами

напружень в стінці труби при ненавантаженому внутрішнім тиском стані (дійсні напруження лише від власної ваги та такі, що забезпечені попереднім технологічним впливом на матеріал і такі, що приладно фіксуються як магнітна передісторія матеріалу). 4. Розподілення з “важкими хвостами” не виключає, що створена на її підставі фізично – ймовірнісна модель опису зміни магнітних характеристик матеріалу оболонки під дією навантаження буде практично моделлю забруднення (модель грубих помилок) – розподіл даних являє собою суміш основного (дійсного) розподілення  $\phi(\sigma)$  з іншим забруднюючим розподіленням  $h(\sigma)$  тобто  $p_\varepsilon(\sigma) = (1 - \varepsilon)\phi(\sigma) + \varepsilon h(\sigma)$ , де  $\varepsilon$ - похибка моделі. Невиконання цієї умови вимагає застосування робастних методів обробки даних або залучення процедури аналізу результатів за зрізаним середнім.



а

б

в

Рис. 3. Руйнівні випробовування внутрішнім тиском труби (діаметр 300мм, товщина стінки 8 мм, матеріал сталь 17Г1С): а – приладна база коерцитиметри КРМ-Ц-К2М; б – деформування труби при виході за зону пропорційних напружень; в – руйнування при досягненні межі міцності та вичерпання запасу пластичності матеріалу

Аналіз набору дослідних даних та практика застосування запропонованого підходу зі створення фізично-ймовірнісних моделей демонструють, що для вибору системи координат достатньо використовувати такі умови: 1. Для кодування розрахункового коефіцієнту  $a_2^k$  – нульове його значення повинно бути максимально наближене до найменшої його дослідної величини в області експерименту, проте не менше максимального відхилення від максимального виміряного значення з урахування систематичної похибки приладної бази. Для кодування напружень  $\sigma_i^k$  ширина  $\Delta$  стовпців гістограми розподілення зміни напруженого стану стінки труби обирається з умови  $m_{\min/\max} = (0.55, 1.15)n^{0.4}$ , де  $n$  – число дослідних даних,  $m$  – кількість стовпців.

З урахуванням вищевикладеного проведена стандартна процедура статистичного оброблення даних результатів вимірювання коерцитивної сили для векторів напружень тіла труби та отримані модельні аналоги залежності розрахункового коефіцієнту  $a_2^k$  від зміни напруженого стану  $\sigma_i^k$ :

$$A) \text{ сталь 13ГСУ (рис.4) } a_2^k = 3.6 \exp \left[ - (0.25 \sigma_i^k)^2 \right], \quad (4)$$

де  $\sigma_i^k = \sigma_{\text{дослід}} / \Delta$ ,  $\Delta = 32 \text{ МПа}$  і відповідає ширині стовпців гістограми розподілення дослідних даних. Статистичні показники моделі: ентропійне відношення  $\gamma = 0,05$ ; коефіцієнт кореляції  $\theta = 0,996$ ; критерій Фішера  $F_p = 0,0085 \leq F_T = 3,7$ ,  $\alpha = 0,05$ ; ширина смуги невизначеності  $\Delta = \pm 0,231$ .

Звертає увагу вихід характеристичної точки  $\sigma_i^k = 4$  (128 МПа), яка належить області перевищення напружень в металі умові пропорційності та початку розвитку пружно – пластичного деформування [4].

$$B) \text{ сталь 17Г1С (рис.5) } a_2^k = 2,0 \exp \left[ - (0.214 \sigma_i^k)^{2.4} \right], \quad (5)$$

де  $\sigma_i^k = \sigma_{\text{дослід}} / \Delta$ ,  $\Delta = 49 \text{ МПа}$  і відповідає ширині стовпців гістограми розподілення дослідних даних. Статистичні показники моделі: ентропійне відношення  $\gamma = 0,0645$ ; коефіцієнт кореляції  $\theta = 0,994$ ; критерій Фішера  $F_p = 0,015 \leq F_T = 3,7$ ,  $\alpha = 0,05$ ; ширина смуги невизначеності  $\Delta = \pm 0,163$ .

Звертає увагу, що характеристична точка  $\sigma_i^k=4$  (236МПа), яка належить області перевищення напружень в металі умови пропорційності та початку розвитку пружно – пластичного деформування знаходиться на границі області невизначеності.

На прикладі модельного опису для даної сталі проведена топографічна класифікація виду розподілення дослідних даних за характеристичними параметрами – контрексес  $\xi$  та ентропійний коефіцієнт  $\kappa$ . Їх розрахунок, з урахування поправок Шепарда, демонструє  $\xi = 0,606 \pm 0,311$ ;  $1,126 \leq \kappa \leq 1,99$ , що за верхню границю для ентропійного коефіцієнта перевищує умову  $\kappa_{\text{крит.}} = 1,87$ , яка коректно описує верхню межу топографічної області існування правдивих експоненціальних розподілень. Таким чином, можна зробити висновок, область даних експерименту містить в собі рівномірно розподілену складову, тобто являє композиційне розподілення, що складається з експоненційного та рівномірного. Для оцінки внеску рівномірного розподілення використаний коефіцієнт співвідношення с.к.в.  $S_p$  рівномірної складової композиції та с.к.в.  $S_e$  її експоненційної складової, а саме  $C_p = \frac{S_p}{S_e} = 1,1 \leq C_{p_{\text{крит.}}} = 5$  і демонструє незначний вплив постійних складових магнітної передісторії матеріалу на величину отриманих показників коерцитивної сили.

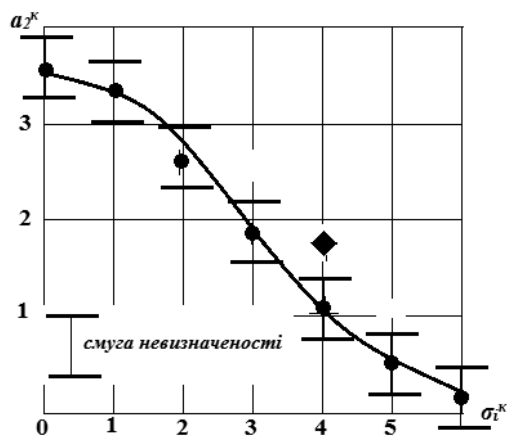


Рис. 4. Графічне уявлення моделі реакції  $a_2$  – коефіцієнту на зміну НДС матеріалу конструкції – сталь 13ГСУ;  $\blacklozenge$  – критична точка відповідна виходу за межу пропорційності

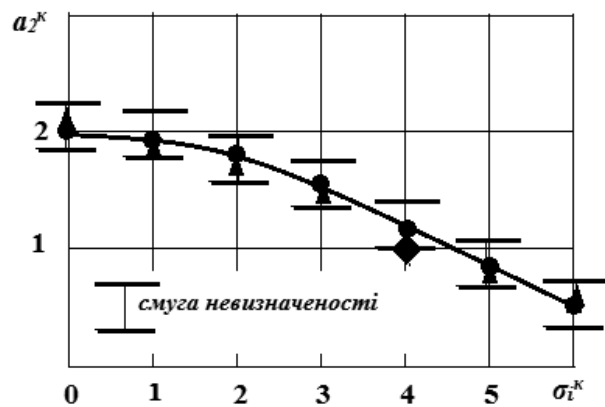


Рис. 5. Графічне уявлення моделі реакції  $a_2$  – коефіцієнту на зміну НДС матеріалу конструкції – сталь 17Г1С;  $\blacklozenge$  – критична точка відповідна виходу за межу пропорційності

Інформаційна здатність фізично-ймовірнісних моделей розрахована за виведеною в [4, 5] формулою (рис. 6)

$$I = -(1/C^\alpha \sigma_{ik}^{\alpha-1}) - P(a_k) - \ln P(a_{k \max}), \quad (6)$$

де  $C$  – параметр масштабу моделі.

Для сталі 17Г1С він становить 4,673 та сталі 13ГСУ відповідно 4,0.

Якщо визначити градієнти зміни інформаційної здатності  $grad I/\sigma_i^k$  для встановленої критичної точки  $\sigma_i^k=4$  переходу матеріалу стінки у пружно-пластичну область деформування то для сталі 17Г1С – 0,345 1/МПа і для сталі 13ГСУ – 0,330 1/МПа та є співмірними з оцінним коефіцієнтом  $a_1$  розглянутим у роботі [4,5].

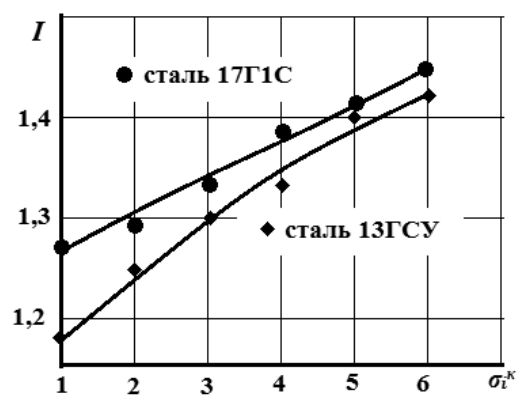


Рис. 6. Залежність інформації про НДС матеріалу від напружень у стінці труби

Дослідження критичної точки  $\sigma_i^k = 4$ , виразної для будь-якого модельного опису  $a_i = f(H_{j,k}; \sigma_n)$ , а також з урахуванням смуг невизначеності та інформаційної здатності свідчить, що їй відповідає 80 % квантиль всіх вимірювань центрально-симетризованого розподілення, де присутня найбільша чутливість методу вимірювання коерцитивної сили, описана модельними аналогами для відповідних розрахункових коефіцієнтів.

**Висновки.** 1. Числові значення розрахункового коефіцієнту  $a_2$ , який відбиває реакцію магнітних характеристик матеріалу на зміну напруженого стану, можуть бути, шляхом перенормування вихідних даних, представлені полігоном щільності розподілення зміни НДС, представленого через реакцію магнітних властивостей матеріалу. 2. Статистично коректна аналітична фізично-ймовірнісна модель розподілення являє композиційне експоненціальне розподілення, рівномірна складова котрого, з рештою рівних умов, представляє магнітну передісторію матеріалу. 3. Модель дозволяє, через свої статистично надійні (рівень достовірності  $Q = 0,95$ ) смуги невизначеності, передбачати область НДС матеріалу при переході у пружно-пластичне деформування (перевищення порогу напружень пропорційності) з формуванням ЗКН. 4. Інформаційна здатність моделі знаходиться, за порядком величин, співмірною з розрахунковим коефіцієнтом  $a_1$ . 5. Запропоновані модельні уявлення можуть бути використані у розробленні стандартів та методик на повірку приладної бази та для діагностування НДС трубних конструкцій.

1. <http://www.digaz.ru/doklad>. 2. Оценка напряженно-деформированного состояния линейной части магистральных трубопроводов Родионов Н. В., Суховерхов Ю. Н. (ЗАО “Дигаз”); 3. Наука и технологии // *Транспортировка и хранение. Влияние усталостной повреждаемости на магнитные характеристики разнородных сварных соединений нефтегазовых трубопроводов.* Кузьо И. Р., Наумкин С. А., Пояркова Е. В. 4. Білобородченко В. І. Інформаційна здатність магнітостатичних методів діагностування напружено-деформованого стану (НДС) трубопроводів. Частина 1 // *Збірник наукових праць “Вісник” НУ “Львівська політехніка” “Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні”.* – Львів, 2010. – № 679 (2010) – С. 7–12. 5. Білобородченко В. І. Фізично-імовірнісні моделі напружено-деформованого стану магистральних трубопроводів за оцінкою магнітостатичними методами. / Білобородченко В. І. // *Збірник тез 11-го Міжнародного симпозіуму українських інженерів-механіків у Львові (МСУІМЛ-11) (Львів, 15—17 травня 2013 р.).* – Львів, 2013. – С. 176–177.