

## МЕТОДИ І ЗАСОБИ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

УДК:535.3:620.179.16

### ОПЕРАТИВНИЙ АКУСТИКО-ЕМІСІЙНИЙ КОНТРОЛЬ ДЕФЕКТНОСТІ РЕЗЕРВУАРА ДЛЯ ЗБЕРІГАННЯ НАФТИ

© Скальський В.Р., Плахтій Р.М., Сулим Р.І., 2005

Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, м. Львів

© Коваль П.М., Сташук П.М., 2005

Державний дорожний науково-дослідний інститут ім. М.П. Шульгіна, м. Київ

*Методом акустичної емісії проведений оперативний контроль процесу зародження та розвитку тріщиноподібних дефектів. Розроблена методика оцінки ступеню їх небезпеки під час проведення гідровипробувань резервуару для зберігання нафти ємністю 75000 м<sup>3</sup>. За відповідними критеріальними оцінками класифіковано джерела акустичної емісії за ступенем їх небезпеки*

В даний час майже в усіх виробничих сферах запроваджуються нові матеріали і технології, досвід використання яких в умовах інтенсивних навантажень і дії агресивного робочого середовища є недостатнім. Саме тому за об'єктами, для виготовлення яких використовували нові матеріали чи технології, потрібен моніторинг, щоб забезпечити їх належну експлуатацію. З цієї метою застосовуються нові прогресивні методи та засоби діагностування міцності та довговічності згаданих виробів, конструкцій і споруд.

Досвід останніх десятиріч показав великі потенційні можливості методу акустичної емісії (АЕ). Особливо доцільне його застосування в умовах, коли неможливий візуальний контроль а появою та просуванням тріщин через їхнє тунелювання всередині матеріалу або коли надзвичайно ускладнений доступ до об'єкту контролю (ОК). Дистанційність контролю, висока чутливість, можливість виявлення дефектів на відстанях, які на порядки перевищують їх розміри, незалежність отримання інформації від форми та розмірів ОК, реєстрація розвитку руйнування в реальному масштабі часу тощо – це ті переваги, які поставили метод АЕ на чільне місце серед відомих перспективних методів неруйнівного контролю (НК).

Друга половина двадцятого століття дала потужний поштовх розвитку та застосуванню явища АЕ для НК і технічної діагностики (ТД) різного роду виробів [1-6].

Прогрес у галузі мікроелектроніки і, особливо, у розробці теоретичних основ методу АЕ сприяв інтенсифікації його застосування. Використання

52-х каналної АЕ апаратури для оцінки стану ракетних двигунів [7] показало, що за критеріальними підходами дефекти можна розділити на три групи: безпечні, такі, що потребують вивчення і явно небезпечні. Відомі публікації, де показано ефективне застосування методу АЕ для контролю якості виробів стрижневої форми [8,9], під температурним та механічним навантаженням [10-12], у газових потоках [13] тощо. Не втратили своєї актуальності не тільки дослідження характеристик конструкційних матеріалів, зокрема тріщиночутливості за сигналами АЕ [14,15], а і методики локалізації дефектів [16,17], визначення їх орієнтації [18], особливо в умовах експлуатації об'єкту [19], при їх роботі під тиском [20]. Для цього здебільшого застосовують ефект Кайзера, оскільки сигнали АЕ (САЕ) виникають тільки під час безпосереднього росту тріщини. Тобто їх фіксують або під час первинного створення тиску в ємності, або за повторного навантаження вище від максимально досягнутого попереднього рівня. Під час таких випробувань суттєвий вклад у реєстрацію САЕ вносять завади від витікання із ємностей рідин і газів. Навіть за незначного витікання рідини чи газу АЕ, що супроводжує цей процес, може бути вища від АЕ, що фіксується від росту тріщини. Тому під час виявлення витікання необхідно його ліквідувати і проводити після цього подальший АЕ-контроль об'єкту. У такий спосіб перевіряли, наприклад, стан камер глибоководного занурення [20]. У монографії [21] описано застосування методик АЕ-контролю для різноманітного промислового обладнання, конструкцій та споруд.

Метою даної роботи є розроблення методики і проведення оперативного АЕ-контролю для виявлення моменту зародження та розвитку тріщиноподібних дефектів з оцінкою ступеню їх небезпеки під час проведення гідровипробувань резервуару для зберігання нафти ємністю 75000 м<sup>3</sup>.

Для реєстрації САЕ застосовували двоканальну АЕ-систему (програмно-технічний комплекс „АКЕМ”, що дозволяла проводити оцінку стану ОК за певними АЕ-критеріями [22]. Комплекс „АКЕМ” є мобільним і забезпечує оперативну обробку зареєстрованої інформації та її відповідне відображення після закінчення АЕ-випробувань.

Для проведення досліджень використовували первинні перетворювачі сигналів АЕ (ПАЕ) з робочим діапазоном частот 100...1200 кГц. Їх фіксували безпосередньо на ОК за допомогою магнітних утримувачів. Амплітудно-частотні характеристики ПАЕ показано на рис. 1.

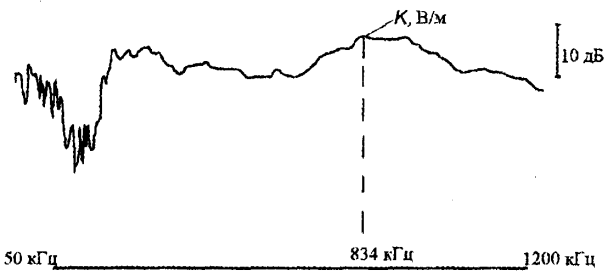


Рис. 1. Амплітудно-частотні характеристики ПАЕ, що використовувались під час проведення АЕ-контролю

Як контактне середовище для ПАЕ використовували хімічно неактивне мастило „Рамзай”, що забезпечувало ефективний акустичний зв'язок ПАЕ з ОК. У місці встановлення ПАЕ відповідно підготувляли (механічною обробкою) поверхню матеріалу.

Враховуючи попередні обстеження резервуару іншими методами НК, була розроблена методика оперативного АЕ-контролю тільки найнебезпечніших з точки зору ймовірності руйнування місць ОК. Розрахунки та наявний досвід проведення АЕ-контролю на інших об'єктах показали, що такими місцями у даному випадку є придонні шви корпусу та місця заварювання фланців, зачисних люків тощо. Виходячи з цього, встановлення ПАЕ на ОК здійснювали якомога ближче до вказаних місць.

Враховуючи габаритні розміри конструкції резервуару згідно ДСТУ 4227-2003 [23], було прийнято рішення здійснювати багатоканальний АЕ-контроль. Під час випробувань резервуару використовували 4 канали АЕ-системи „АКЕМ”. Перед початком вимірювань, виходячи з вимог

стандарту європейської робочої групи з АЕ та вимог національних стандартів України, проводили тарування чутливості АЕ-тракту всіх каналів, використовуючи джерело Гсу [24]. Таким таруванням налаштовували канали АЕ-апаратури на однакову чутливість щодо сприйняття пружних коливань з місць зародження та розвитку дефектів типу тріщин (рис. 2).

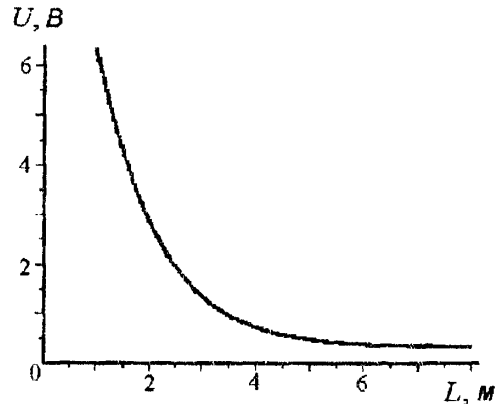


Рис. 2. Залежність зміни амплітуди пружних хвиль АЕ від відстані генерування АЕ джерелом Гсу

Виходячи з цього, під час гідровипробувань з одночасним заповненням зовнішнього та внутрішнього корпусів резервуару ПАЕ розташовували на діаметрально протилежних боках споруди на відмітці +1,7 м на зовнішньому корпусі так, як показано на рис 3.

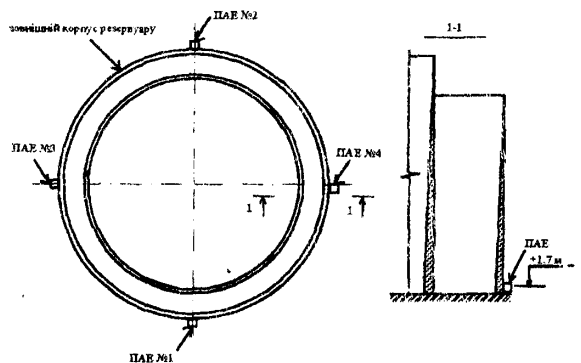


Рис. 3. План-схема розташування ПАЕ під час гідровипробувань зовнішнього корпусу резервуару

У випадку гідровипробувань внутрішнього корпусу резервуару ПАЕ встановлювали на внутрішньому корпусі резервуару за схемою, що показана на рис. 4. В усіх варіантах випробувань АЕ-апаратура знаходилася поза межами охоронної зони резервуару (приписи техніки безпеки).

Запис САЕ виконували 4-ма каналами під час зростання завантаження резервуару і витримки

навантаження на заданих рівнях ОК протягом 15 хвилин з технологічними перервами по 4 хвилини. Процес реєстрації АЕ-інформації проводили як неперервний моніторинг ОК. Під час зупинки заповнення резервуару водою час запису САЕ складав 5...6 год.

наповнення резервуару і здійснювали проведення дослідження природи джерела АЕ з оцінкою небезпеки продовження випробувань.

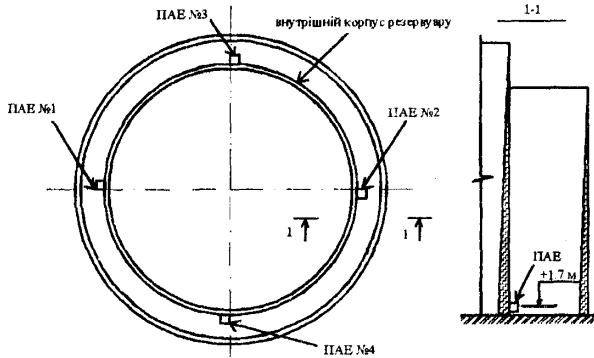


Рис. 4. План-схема розташування ПАЕ під час гідровипробувань внутрішнього корпусу резервуару

Заповнення зовнішнього резервуару проводилось згідно встановленого графіка випробувань (рис.5), а внутрішнього резервуару - згідно графіка, що показаний на рис.6.

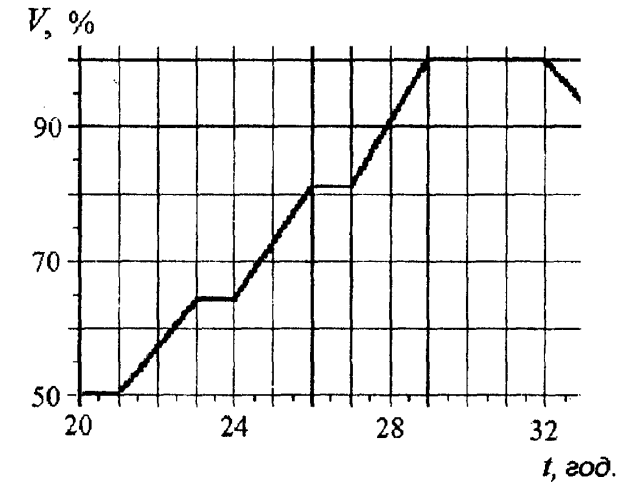


Рис.6. Графік гідровипробувань внутрішнього резервуару

Для класифікації джерел АЕ використовували такі критеріальні ознаки і процедури [21]:

1) коефіцієнт  $K_p$  виявлення сигналів АЕ від тріщин, який характеризує ступінь зміни густини енергії в зареєстрованому сигналі АЕ;

2) класифікація джерел АЕ за ступенем небезпеки. З цією метою додатково результати АЕ-контролю представляли у вигляді переліку зареєстрованих АЕ-джерел, віднесених до того чи іншого класу в залежності від значення параметрів АЕ (сумарний підрахунок, число імпульсів, амплітуда чи амплітудний розподіл, енергія, швидкість рахунку, активність, концентрація джерел АЕ). У систему класифікації також входили параметри навантаження контрольованої споруди та час. Таку оцінку робили для кожного джерела АЕ, а оцінку стану досліджуваної конструкції здійснювали за наявності джерел АЕ того чи іншого класу. За аналогією з відомими підходами [25,26] виявлені джерела АЕ розділяли на чотири класи: I – пасивне; II – активне; III – критично активне; IV – катастрофічно активне. Кожний вищий клас джерела АЕ вимагає виконання всіх дій, визначених для джерел більш нижчих класів. Кінцева оцінка допустимості виявлених джерел АЕ під час застосування додаткових видів НК виконується із використанням параметрів дефектів на основі методів лінійної механіки руйнування, методик з розрахунку конструкцій на міцність та інших діючих нормативних документів;

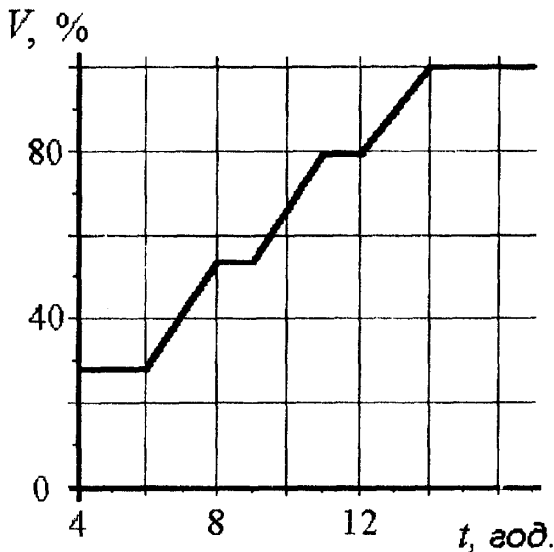


Рис.5. Графік гідровипробувань зовнішнього резервуару

АЕ критеріями, що бралися до уваги під час випробувань резервуару, було швидке наростання сумарного підрахунку імпульсів, їх сумарної енергії, амплітуди, що є показником прискореного росту дефектів, які можуть викликати руйнування. Якщо один з критеріїв досягав критичних значень, то тоді передбачали зупинку технологічного процесу

3) амплітудний критерій, який визначали як середню амплітуду  $A_p$ , не менше трьох імпульсів з індивідуальною амплітудою  $A_c$  для кожного джерела АЕ за обраний інтервал спостереження. Значення амплітуди  $A_c$  коригували з урахуванням загасання САЕ під час їх поширення у матеріалі;

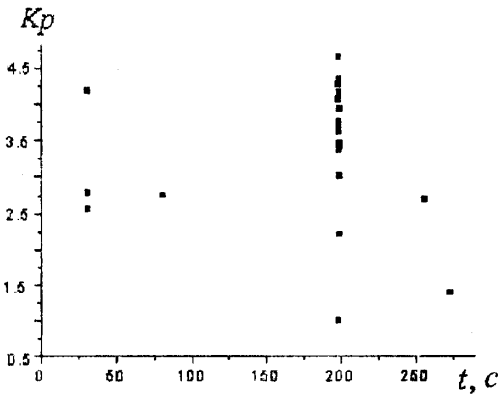
4) інтегральний критерій, який для кожної зони розраховували за відомою методикою [21,22] і який пов'язаний з активністю джерел САЕ;

5) локально-динамічний критерій, оцінку якого здійснювали у реальному масштабі часу з використанням наступних параметрів АЕ: числа імпульсів АЕ в наступній події, числа імпульсів у попередній події або енергетичних показників цих подій.

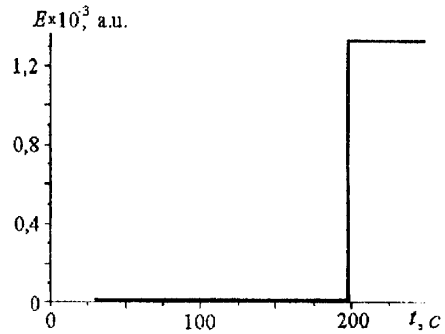
Після виконання НК об'єкта здійснювали

подальшу обробку та аналіз даних у повному обсязі на персональному комп'ютері, що входив у АЕ-систему „АКЕМ”.

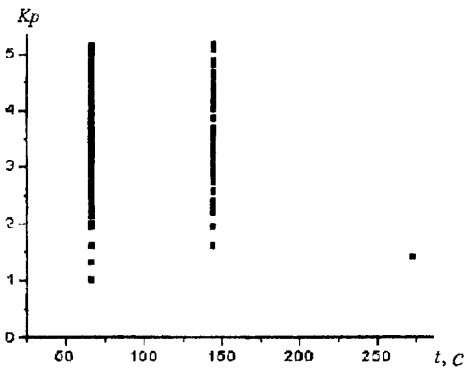
Результати АЕ-контролю були наступними. Під час гідровипробувань на 1-му та 2-му етапах (зовнішній та внутрішній резервуари) було зафіксовано момент різкого зростання амплітуди САЕ. Апаратними засобами було визначено критерій, що вказував на появу руйнування в місці заварювання зачисного люка. Після прийняття певних рішень представниками відповідних служб було проведено візуальний огляд вказаного місця генерування САЕ. В результаті цього виявлено дефект, який після тестування іншими методами НК привів до запинки наповнення резервуару водою і заміни люка.



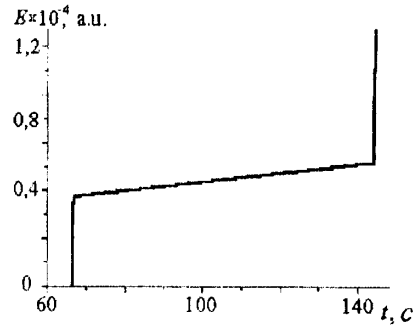
a)



b)



c)



d)

Рис. 7. Часова залежність коефіцієнта  $K_p$  (a,c) та енергії САЕ (b,d) під час заповнення резервуару з відмітки +13,94 до +13,95 м (a,b) та з відмітки +13,95 до +13,96 м (c,d)

Після цього, згідно з графіком заповнення резервуару водою, продовжували безперервний АЕ-контроль резервуару. На відмітці +13,94 м САЕ були в межах фонового рівня. За подальшого наповнення резервуару вище відмітки +13,95 м зареєстровано зростання інтенсивності АЕ (рис. 7 a,b). Цей процес спостерігався до відмітки

заповнення резервуару +13,97 м (рис. 7 c,d). Зафіксоване збільшення інтенсивності АЕ тривало протягом 45 хвилин. Після проведених зупинки подачі води та додаткових обстежень і відповідних консультацій було встановлено, що причиною цього є різке збільшення подачі води в резервуар (до 1000 м<sup>3</sup>/год), що і вплинуло на фоновий рівень САЕ.

Після зменшення швидкості подачі води до попереднього рівня (500 м<sup>3</sup>/год) зафіксовано САЕ, які знаходились в межах попереднього (безпечного) фонового рівня.

Під час заповнення внутрішнього резервуару водою спостерігалися САЕ, що не перевищували фонового рівня. Обробка їх за критеріальними оцінками показала, що вони відносяться до джерел I-го класу, тобто пасивних, які в процесі безперервного моніторингу не проявляли динаміки

розвитку, хоча в певні моменти часу і зафіксували поодинокі зростання інтенсивності САЕ, які також не становили ніякої небезпеки. На відмітках +17,62 м та +18,39 м зафіксовано також САЕ з дещо збільшеною енергією, які були кваліфіковані як джерела 2-го класу.

Результати обробки сигналів АЕ з найбільшою інтенсивністю за інтегральним та локально-динамічним критерієм наведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Класифікація зареєстрованих джерел АЕ

Період реєстрації сигналів АЕ	Кількість джерел за класами											
	Інтегральний критерій (W=0,1)				Інтегральний критерій (W=0,01)				Локально-динамічний критерій			
	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV
Зовнішній резервуар	0	10	4	0	6	8	0	0	3	2	8	0
Внутр. резервуар 20–24 доба	0	9	0	0	2	7	0	0	0	1	0	0
24–27 доба	0	41	0	0	12	29	0	0	-	-	-	-
27–29 доба	0	31	0	0	11	20	0	0	-	-	-	-
29–33 доба	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Отже результати проведеного АЕ-контролю показали, що зростання інтенсивності САЕ в певні моменти навантаження викликані технологічними факторами: наявністю технологічних тріщин зварного з'єднання, які розвивалися під час навантаження, збільшенням швидкості подачі води в резервуар, релаксацією напружень в стінках резервуару. Після усунення дефектів на всіх етапах навантаження параметри САЕ не перевищували фонового рівня.

Таким чином, приведені вище результати дозволяють стверджувати, що метод АЕ є ефективним для оцінки дефектності резервуарів для зберігання нафти у великих об'ємах, особливо під час їх гідровипробувань. Його можна також застосовувати для НК різноманітних виробів і конструкцій. Однак в кожному окремому випадку необхідно мати порівняльні характеристики руйнування матеріалів, встановлені при випробуваннях у лабораторних умовах. Це дозволить краще класифікувати механізми зародження та стадії розвитку тріщин у матеріалах реальних ОК.

1. Акустическая эмиссия и ее применение для неразрушающего контроля в атомной энергетике / Под ред. К. Б. Вакара. – М.: Атомиздат, 1980. – 216 с. 2. Green A., Lockman C. and Steek R. Acoustic verification of structural integrity of polaris Chambers // Modern Plast. – 1964, July. - P.137 - 139, 178, 180. 3. Drouillard T. Acoustic

emission: A Bibliogr. with abstr.- New York - ect.: IFU/PLENUM - 787 p. 4. Tatro C. A., Liptai R. G. and Harris D. O. Acoustic emission technique in materials research. // Int. J. Nondestr. Testing. – 1971. - 3, №3. - P.215 - 275. 5. Шнейдерман Я. А. Новые неразрушающие методы контроля качества и технической диагностики. Обзор. // Зарубежная радиоэлектрон. – 1974. - №5. - С.74 - 82. 6. Green J. S. and Toney B. W. Acoustic monitoring of airframe structural proof testing. // J. Environmental Sci. – 1972. - 15, №1. - P.20 - 23. 7. Kishi T. and Mori Y. Evaluating the severity of rocket motor case during burst test using acoustic emission // Acoust. Emiss. Monit. Pressure. Syst. Ft. Lauderdale, Fla. – 1979. – P.131 - 148. 8. А.с. 905781 СССР. МКИ: G01N29/04. Акустический эмиссионный способ контроля изделий стержневой и трубчатой формы / Машичков В. В., Муравин Г. Б. - Оубл. 1982 г.-Бюл. № 6. 9. Green E. J. and Rogers L. M. Location of discrete sources of acoustic emission in complex tubular joints / Non-Dest. Test.: Proc 4th Europ. Conf., London, 13-17 sept. 1987. – P.2984-3000. 10. А.с. 905777 СССР. МКИ: G01 N 29/04. Способ контроля качества изделий / Рапопорт Ю. М.- Оубл. 1982 г., Бюл. № 6. 11. А.с. 954875 СССР. МКИ: G01 N29/04. Способ определения параметров наибольшего термического воздействия, перенесенного изделием. / Зарецкий-Феоктисов Г. Г., Рапопорт Ю. М.- Оубл. 1982 г. Бюл. № 32. 12. А.с. 1599758, СССР. МКИ: G01 N29/04. Способ контроля нарушения сплошности при термическом воздействии на сплавы / В.М. Андронов, В.Ф. Кор.-

шак, Р.И. Кузнецова, В.В. Нерубенко - Оубл. 1990, Бюл. № 38. 13. А.с. 911324 СССР. МКИ: G01 N29/04. Способ неразрушающего контроля поверхностных дефектов изделий / Нечаев Ю. А. - Оубл. 1982 г. Бюл. № 9. 14. Nakasa H. Application of acoustic emission techniques to structural integrity assessment /Acoust. Emis. Pap. Meet., Bad Nauheim - Apr. 1979 - Oberursel, 1980. - P.311 - 325. 15. Yamaguchi K. and Oyaizu H. Distributed fracture monitoring system by high speed processing of acoustic emission microdata // Non-Destruct. Test.: Proc. 4th. Eur. Conf., London, 13-17 Sept., 1987, V.4. - Oxford etc., 1988. - P.1819 - 1825. 16. Tirbonod B. and Hanacek L. Some properties of acoustic emission signals measured in the vicinity of a crack during the cyclic pressure loading of a vessel. // Ibid - P.2943-2950. 17. Андрейкив А. Е., Лысак Н. В. Метод акустической эмиссии в исследовании процессов разрушения.- Киев: Наук. думка. - 175 с. 18. Ohtsu M. Determination of crack orientation by acoustic emission // Mater Eval.- 1987. - 35, №9. - P.1070 - 1075, 1082. 19. Acoustic emission detection of crack presence and crack advance during flight. / S. L. McBride, A.N. Pollard, J.D. McPhail, P.S. Bowman and O. T. Peters // Rep. Progr. Quant. Nondestruct. Eval --

1988. -- 8, В. - P.1819 - 1825. 20. Коллакот Р. А. Диагностика повреждений. - М.: Мир, 1989. - 512 с. 21. Скальський В.Р., Коваль П.М. Акустична емісія під час руйнування матеріалів, виробів і конструкцій. Методологічні аспекти відбору та обробки інформації. - Львів.: Сполом, 2005. - 396 с. 22. Филоненко С.Ф. Акустическая эмиссия. Измерения, контроль, диагностика. - К: КНУЦА, 1999. - 304 с. 23. Національний стандарт України ДСТУ 4227-2003. Настанови щодо проведення акустико-емісійного діагностування об'єктів підвищеної небезпеки. - Чинний від 2003 - 12 - 01. 24. The EWGAE AE Code for acoustic emission examination of sources of discrete acoustic events // NDT Int. - 1981. - 14, №8.- P. 181 - 183. 25. Watanabe T., Huchirizaki S., Arita H. A. Metod of evolution the harmfulness of flaws in structures using acoustic emission techniques // Four the acoust.emis. symp. - Tokyo, 1978. - P. 5 - 59. 26. Acoustic emission testing of spherical pressure vessel made of high tensile strength steel and classification of test results // NDIS - 2412. - 1980. - P. 6 - 8.

УДК 620.179.1

## МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ КОЛОНЫ НАСОСНО-КОМПРЕССОРНЫХ ШТАНГ С УЧЕТОМ ВИНТОВОЙ КОНФИГУРАЦИИ ОСИ В ПРЯМОЛИНЕЙНОЙ СКВАЖИНЕ

© Хашиханов И.Г., 2005

Івано-Франковський національний технічний університет нафти і газу

*Приведена математична модель процесу деформування колони насосно-компресорних штанг з урахуванням гвинтової конфігурації її осі, проведені тестові розрахунки для модельного об'єкта. Встановлені залежності між кількістю витків спіралі, рівнем напружень і зміною довжини колони, приведені аналіз отриманих результатів*

Оценка механического состояния колонны насосно-компрессорных штанг является актуальной научно-технической задачей, поскольку указанные объекты труднодоступны для диагностической аппаратуры, а высокая стоимость проведения ремонтных мероприятий, связанных с ликвидацией последствий возможных аварий, требует создания эффективных методов, позволяющих получать объективные характеристики исследуемой системы на основании ограниченной информации о её параметрах. Такая информация содержит, как правило, данные о длине колонны штанг, глубине и пространственной конфигурации скважины, геометрические характеристики штанг, жесткость

поперечного сечения штанги.

Исследования деформации проводилось методами математического моделирования [1], были получены формулы для общего случая процесса деформирования колонны [2] с учётом результатов исследования процесса деформации колонны статистическими методами [3]. Установлено, что сжатая часть колонны после потери прямолинейной формы устойчивости укладывается в скважине по спирали, что приводит к существенному перераспределению действующих в материале напряжений. Для их количественной оценки необходимо построить модель процесса деформи-