

## ВИЗНАЧЕННЯ КООРДИНАТ ДЖЕРЕЛ ЗА ОБ'ЄМНОЇ ЛОКАЛІЗАЦІЇ ДЕФЕКТІВ МЕТОДОМ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ

© Марасанов В., Шарко А., 2016

Запропоновано математичне забезпечення побудови моделей визначення координат джерел акустичної емісії та алгоритмів пошуку дефектів. Подано опис схем розташування датчиків. Запропоновано розрахункові формули визначення координат просторової локалізації джерел акустичної емісії. Описано процедуру неруйнівного контролю і технічної діагностики металоконструкцій.

**Ключові слова:** неруйнівний контроль, акустична емісія, локалізація, координати дефектів.

**The mathematical providing of construction of models of determination of co-ordinates of sources of acoustic emission and algorithms of search of defects is offered. Description of layout of sensors charts is given. The calculation formulas of determination of co-ordinates of spatial localization of sources of acoustic emission are offered. Procedure of non-destructive control and technical diagnostics of metal of constructions is described.**

**Key words:** non-destructive control, acoustic emission, localization, co-ordinates of defects.

### Постановка проблеми

Загальна постановка проблеми локалізації дефектів у створенні систем технічної діагностики і неруйнівного контролю зводиться до виявлення сигналу на фоні перешкод, вимірювання його параметрів і їх класифікації. Акустична емісія термінологічно визначається як механічні коливання, спричинені динамічною перебудовою структури матеріалу. Для односточкової приймальної антени вибір робочих параметрів приймального тракту акустичної емісії ґрунтується на оптимальній фільтрації сигналів. Такий підхід пов'язаний з принциповою нерозрізненністю сигналів від джерела дефекту, що розвивається, і сигналів шумів. В разі багатоточкової приймальної антени з'являється можливість аналізувати сукупність відгуків рознесених у просторі приймачів на сигнал акустичної емісії. При цьому акустичні сигнали від дефекту набувають додаткових інформативних ознак. Проте досі не встановлені залежності оцінки довжини і локалізації дефектів під час навантаження матеріалів. Відсутність єдиних методичних прийомів у локалізації дефектів методом акустичної емісії вносить свою частку невизначеності в інтерпретацію результатів. Аналітичні оцінки дальності виявлення джерел акустичної емісії за різних конфігурацій розташувань датчиків – одне із актуальних завдань діагностики металоконструкцій.

### Аналіз останніх досягнень та публікацій

Визначаючи координати дефектів, датчики встановлюють у певній комбінації. Алгоритми розрахунку координат дефектів ґрунтуються на визначенні різниці часу приходу фронту акустичної хвилі до декількох приймачів акустичної емісії [1]. За лінійної схеми сигнал з будь-якої точки зони контролю повинен сприйматися мінімум двома датчиками [2, 3]. Площинні схеми потребують для реєстрації сигналів акустичної емісії розміщення на поверхні конструкції трьох приймачів. При цьому вимірюються дві незалежні різниці часу приходу хвилі напруги [4, 5]. Використовуючи їх, можна побудувати дві гіперболи, у фокусах яких розташовані приймачі. Їх перетин дає положення джерела. Проте для криволінійної поверхні двох різниць часу приймачів сигналів недостатньо. Для цього необхідне використання трьох різниць часу прийому акустичних сигналів, тобто розміщення на контрольованій поверхні мінімум чотирьох датчиків акустичної емісії [6]. Введення четвертого приймача дає можливість вимірювати три різниці часу приходу імпульсів, що зменшить неоднозначність у визначенні координат. Тому глибше вивчення питань точності визначення координат джерел сигналів становить не лише науковий, а й практичний інтерес.

**Метою роботи** є визначення координат дефектів, що розвиваються, під час моніторингу напружено-деформованого стану просторових об'єктів.

### Виклад основного матеріалу

Фізична природа виникнення акустичної емісії в матеріалі пов'язана з процесами його пластичної деформації та руйнування. Послідовність руйнування матеріалу представляється рухом дислокацій, утворенням субмікротріщин, їх злиттям у загальну тріщину і її просуванням. Феноменологічно це пояснюється так. Прикладене навантаження призводить до виникнення у матеріалі конструкції полів напруг і деформацій, за рахунок яких зароджуються і розвиваються дефекти. При цьому в матеріалі перерозподіляється внутрішня енергія, що викликає появу акустичної емісії. До труднощів впровадження методу акустичної емісії належать значні спотворення, яких зазнає акустичний сигнал, поширюючись від місць генерації до точки прийому. Вони залежать від місця розташування перетворювача, від конфігурації поверхні й матеріалу виробу [7, 8].

Завдання розрахунку координат дефектів ґрунтуються на визначенні різниці часу приймання сигналів акустичної емісії на датчиках п'єзоантенни з подальшим розв'язанням системи нелінійних рівнянь. У цьому разі розрахунок координат дефектів буде достовірний, якщо дотримано таких умов:

- швидкість поширення акустичних хвиль  $v$  однакова у всіх напрямках;
- акустичний сигнал від дефекту в будь-якій точці контрольованого об'єкта дійде до кожного датчика, не зустрічаючи на своєму шляху будь-яких перешкод типу зварних швів, отворів, порожнин тощо;
- похибка у визначенні різниці часу прийому сигналів акустичної емісії на відповідні датчики п'єзоантенни має бути мінімальна.

Під час контролю різних тіл з товстою оболонкою приймачі треба розташовувати на поверхні так, щоб прями, які з'єднують будь-яку точку контрольованої області з кожним з приймачів групи, проходили по товщі об'єкта і не пересікали порожній простір.

Мінімальна відстань між двома точками на контрольованій поверхні  $x_0, y_0, z_0$  і  $x_1, y_1, z_1$  дорівнює довжині відрізка, що сполучає їх:

$$R = \sqrt{(x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2 + (z_0 - z_1)^2}.$$

Система рівнянь для визначення координат джерела акустичної емісії у товстостінному об'єкті має вигляд:

$$(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2 = (R + r_i)^2 \quad i = \overline{0,4},$$

де  $r_i = v \cdot \Delta t$  – різниця часу приходу акустичного сигналу відносно приймача, який зареєстрував сигнал першим.

Віднімаючи від кожного з подальших рівнянь перше, отримаємо:

$$xx_i + yy_i + zz_i + Rr_i = \frac{x_i^2 + y_i^2 + z_i^2 - r_i^2}{2} \quad i = \overline{0,4},$$

де  $x_i, y_i, z_i$  – координати приймачів;  $x, y, z$  – координати джерела;  $Rr_i$  – відстань між приймачами.

Розв'язком системи є координати джерела акустичної емісії.

Нижче розглянуто окремі випадки знаходження координат джерела акустичної емісії у разі розташування приймачів на поверхні різних тіл з товстою оболонкою.

1. Контроль стінки об'єкта, що має форму паралелепіпеда (рис. 1).

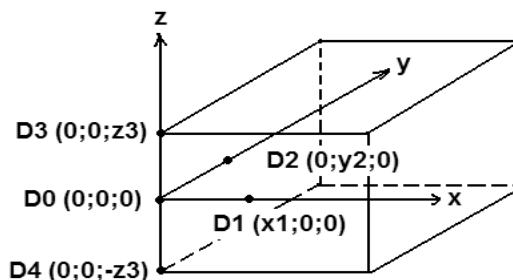


Рис. 1. Розташування приймачів для контролю стінок об'єкта з формою паралелепіпеда

Обчислення координат дефекту, що розвивається, для цього випадку можна виконувати за такими робочими формулами:

$$2R = \frac{(2z_3^2 - r_3^2 - r_4^2)}{r_3 r_4};$$

$$x = \frac{(x_1^2 - r_1(r_1 + 2R))}{2x_1};$$

$$y = \frac{(y_2^2 - r_2(r_2 + 2R))}{2y_2};$$

$$z = \frac{(z_3^2 - r_3(r_3 + 2R))}{2z_3}.$$

2. Розміщення приймачів і формули для визначення координат джерела акустичної емісії у разі контролю об'єкта, що має форму порожнистого циліндра (рис. 2).

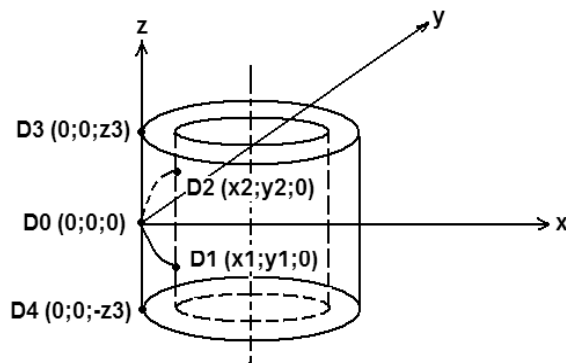


Рис. 2. Розташування приймачів для контролю стінок об'єкта, що має форму порожнистого циліндра

Обчислення координат дефекту, що розвивається, для цього випадку можна виконувати за такими робочими формулами:

$$2R = \frac{2z_3^2 - r_3^2 - r_4^2}{r_3 r_4};$$

$$x = \frac{2x_1^2 + y_1^2 - r_1(r_1 + 2R) - r_2(r_2 + 2R)}{4x_1};$$

$$y = \frac{(r_2 - r_1) \cdot (r_2 + r_1 + 2R)}{4y_1};$$

$$z = \frac{z_3^2 - r_3(r_3 + 2R)}{2z_3}.$$

3. Розміщення приймачів і формули визначення координат джерела акустичної емісії для контролю об'єкта, що має форму порожнистої сфери (рис. 3).

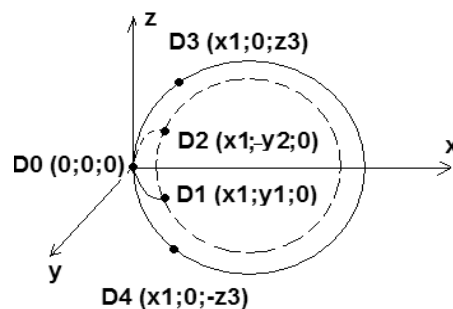


Рис. 3. Розташування приймачів для контролю стінок об'єкта, що має форму порожнистої сфери

У цьому випадку координати джерела можна визначити за такими формулами

$$2R = \frac{r_4^2 + r_3^2 - r_2^2 - r_1^2}{r_1 + r_2 - r_3 - r_4};$$

$$x = \frac{2(x_1^2 + y_1^2) - r_1(r_1 + 2R) - r_2(r_2 + 2R)}{4x_1};$$

$$y = \frac{(r_2 - r_1) \cdot (r_2 + r_1 + 2R)}{4y_1};$$

$$z = \frac{(r_4 - r_3) \cdot (r_3 + r_4 + 2R)}{4z_3}$$

Запропоновані розрахункові формули визначення координат просторової локалізації джерел акустичної емісії, у разі реалізації у вигляді методичного забезпечення, можуть бути використані як для моніторингу, тобто безперервного спостереження за розвитком дефектів у часі, так і для періодичного контролю металопродукції з визначення зони виявлення і розмірів дефектів.

Розроблений на основі отриманих формул алгоритм визначення координат джерел у разі об'ємної локалізації дефектів методом акустичної емісії наведено на рис. 4.

Апаратне забезпечення вимірювань сигналів акустичної емісії потребує подолання труднощів, пов'язаних з різномірністю вирішуваних завдань, відсутністю принципів класифікації апаратури, нормативних документів і стандартів на методики вимірювань. Аналіз досвіду впровадження методу акустичної емісії для неруйнівного контролю металоконструкцій показує, що під час створення нових зразків вимірювальної техніки прагнуть не до вдосконалення якого-небудь параметра процесу з покращуваними характеристиками приладів, а віддають перевагу пошуку нових інформативних параметрів та розробленню нових методичних прийомів вивчення явища.

Основну інформацію про локалізацію і характер розташування дефекту можна отримати, аналізуючи зміни інтенсивності й амплітуди сигналів акустичної емісії в процесі навантаження матеріалу. Тому параметрами, що будуть реєструватися, вибирають інтенсивність і активність акустичної емісії. При цьому під амплітудою розуміють максимальне значення огинаючого акту емісії, під активністю – кількість актів акустичної емісії за одиницю часу, під інтенсивністю – кількість перетворень встановленого порога дискримінації за одиницю часу на виході приймальної системи. Вивчаючи характеристики дефектів, що розвиваються, для прогнозування руйнування необхідно мати якнайповніші відомості про джерело акустичної емісії, тобто звести до мінімуму пропуски корисної інформації за наявності флуктуаційних шумів. Оскільки для неруйнівного контролю становить інтерес процес виникнення і розвитку дефектів, що супроводжується дискретною акустичною емісією, приймальна апаратура реалізації зв'язку параметрів акустичної емісії з кінетикою руйнування матеріалу блоково-модульного виконання може будуватися за схемою, зображеною на рис. 5.

Вхідні ланцюги приймального пристрою мають резонансні властивості, що приводить до формування на виході основного підсилювача радіоімпульсу, який загасає. Сигнали з чотириточкової антени посилюються передпідсилювачами і надходять у блоки аналогової обробки сигналів, в яких зазнають подальшого посилення, двонапівперіодного детектування й амплітудної дискримінації, що характеризує безпеку дефектів.

Дискримінатор виробляє імпульси фіксованої амплітуди в кількості, що дорівнює кількості перетинів детектованим сигналом порогового рівня. Кількість перетинів порога на виході 2 істотно перевищуватиме кількість зареєстрованих імпульсів на виході 1 (рис. 5). За такої локалізації дефектів кількість подій за одиницю часу на виході 1 характеризує активність акустичної емісії, а кількість перетинів порога дискримінації за одиницю часу на виході 2 характеризує інтенсивність акустичної емісії. Ці параметри взаємозв'язані.

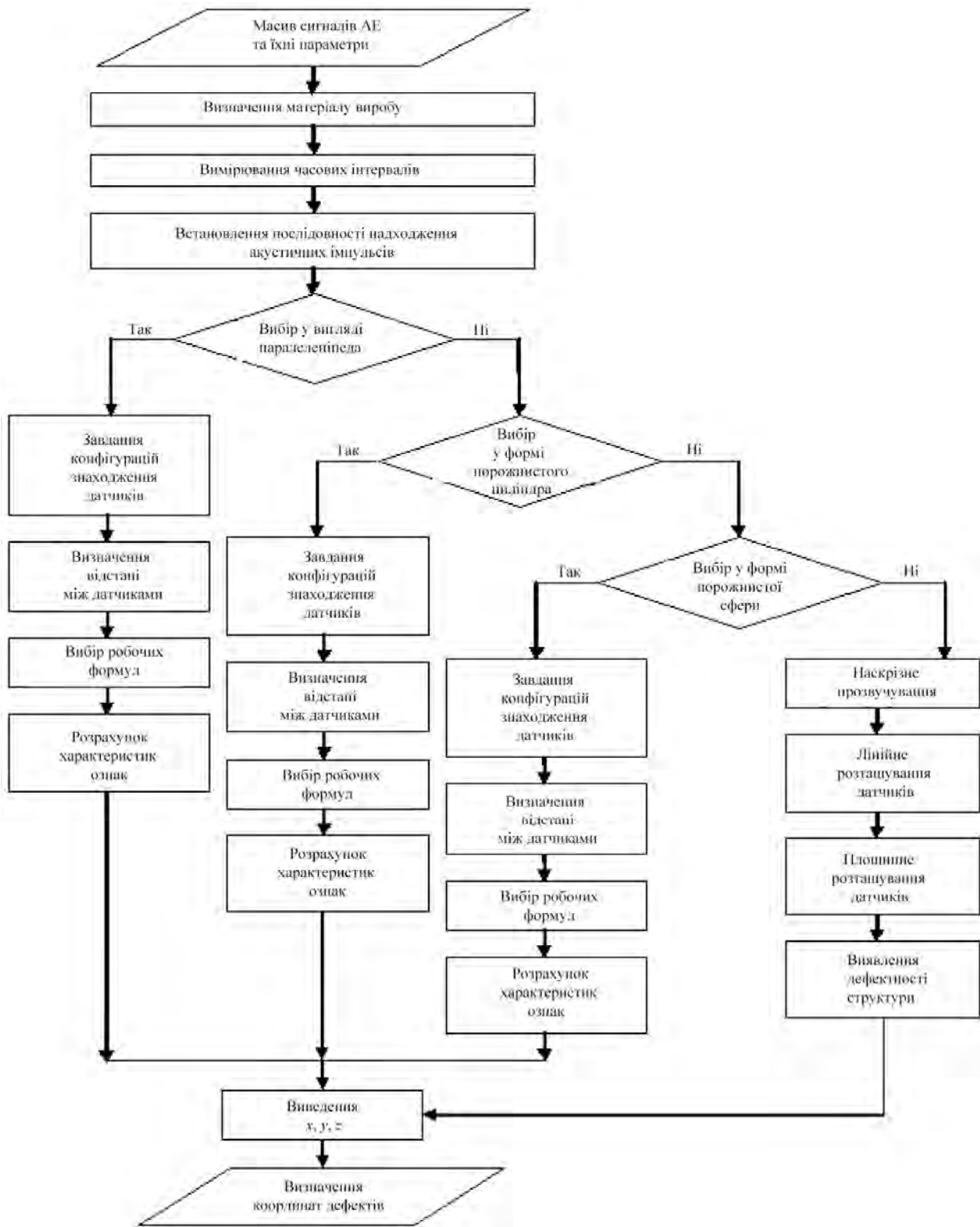


Рис. 4. Алгоритм знаходження координат джерел методом акустичної емісії

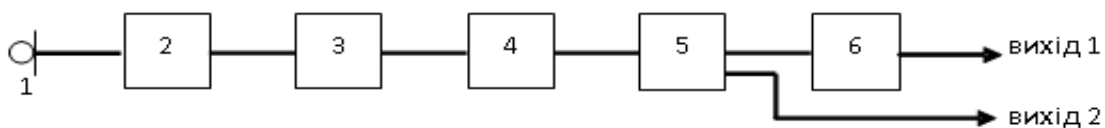


Рис. 5. Структурна схема пристрою для вимірювання параметрів акустичної емісії:  
 1 – в'єсоперетворювач; 2 – попередній підсилювач; 3 – блок фільтрів;  
 4 – основний підсилювач; 5 – дискримінація; 6 – детектор

Тимчасові інтервали між датчиками акустичної емісії у чотириточковій схемі контролю вимірюють так. Сигнал, що прийшов першим, запускає відлік часу в трьох каналах, що залишилися, який продовжується доти, доки на ці канали не надійдуть інші сигнали цієї групи. Якщо за час максимального очікування  $T = \frac{B}{v}$ , який визначається найбільшою відстанню між перетворювачами

$B$  і швидкістю поширення акустичних хвиль  $v$ , хоч би один з сигналів, що залишилися, не прийде, відбувається загальне скидання відліку часу в всіх каналах.

Отже, процедура неруйнівного контролю і технічної діагностики металоконструкцій методом акустичної емісії складається з таких етапів:

- визначають послідовність приходу акустичних імпульсів до датчиків системи і вимірюють часові інтервали між ними;
- використовуючи отримані вирази для розташування конфігурацій датчиків, записують систему рівнянь, що зв'язують різниці відстаней на поверхні між джерелами акустичної емісії та рознесеними на поверхні приймачами акустичних сигналів;
- визначають найкоротший шлях між приймачами на ділянці поверхні контрольованої конструкції;
- спільно розв'язують систему рівнянь найкоротшого шляху від джерела сигналу і розташування конфігурацій датчиків;
- за лічильником різниць часу приходу фіксують координати джерела дефектної структури у відповідному масштабі.

### Висновки

Параметрами, що визначають координати джерел акустичної емісії за об'ємної локалізації дефектів, є відстань від джерела емісії до приймачів у координатах різниці часу надходження імпульсів і найкоротший шлях між джерелами на контрольованій поверхні.

Відстань між перетворювачами в чотириточковій антені можна вибирати відповідно до вимог досягнення необхідної точності локалізації за заданої площі огляду, а також з умов поширення сигналу в реальній конструкції. Зменшення базової відстані між п'єзоперетворювачами призводить до зменшення просторового розрізнення системи.

Максимізація цільової функції досягається зменшенням значень відстаней між приймачами і відстаней від джерела акустичної емісії до датчика. Похибка вимірювання координат джерел акустичної емісії пропорційна до похибки вимірювання часу проходження акустичного сигналу.

1. Jiang XU. Space-time evolution rules study on acoustic emission location in rock under cyclic loading/ Jiang XU, Xiaojun TANG, Shuchun LI, Yunqi TAO, Yongdong JIANG // *Frontiers of Architecture and Civil Engineering in China*. – 2009. – No 3(4). – P. 422–427.
2. Неразрушающий контроль: справочник: в 7 т. / под общ. ред. Клюева В. В. Т. 7: в 2 кн. Кн. 1: Иванов В. И., Власов И. Э. Метод акустической эмиссии. – М.: Машиностроение, 2005. – 829 с.
3. Серьезнов А. Н. Диагностика объектов транспорта методом акустической эмиссии / А. Н. Серьезнов, Л. Н. Степанова, В. В. Муравьев. – М.: Машиностроение. 2004. – 392 с.
4. Бунина Н. А. Исследование пластической деформации металлов методом акустической эмиссии / Н. А. Бунина. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1990. – 176 с.
5. Полесская Л. М. Об определении координат дефектов в конструкциях с произвольной поверхностью / Полесская Л. М., Гричук В. В., Балабанов А. А., Марасанов В. В. // *Дефектоскопия*. – 1978. – № 7. – С. 50–56.
6. Бондаренко А. Н. Методы определения времени начала импульса акустической эмиссии и их сравнение / А. Н. Бондаренко, С. Ю. Петров // *Контроль. Диагностика*. – 2005. – № 9. – С. 29–33.
7. Букетов А. В. Влияние изменения дислокационной структуры на акустические характеристики материалов / А. В. Букетов, В. Д. Нигалатий, С. А. Рожков, А. В. Шарко // *Наукові нотатки*. – Луцьк: ЛНТУ. – 2015. – Вип. 48. – С. 220–224.
8. Степанов Г. В. Упругопластичное деформирование и разрушение материалов при импульсном нагружении. – К: Наукова думка, 1991. – 292 с.