

С.С. Була, А.Б. Пелех, О.М. Бадло, П.О. Лесюк, Б.І. Мальків  
Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра будівельних конструкцій та мостів

## ОСОБЛИВОСТІ РОЗПОДІЛУ ТЕМПЕРАТУРИ У ЗАЛІЗОБЕТОННОМУ ПЕРЕРІЗІ ЗА ДІЇ МІСЦЕВОГО НАГРІВАННЯ

© Була С.С., Пелех А.Б., Бадло О.М., Лесюк П.О., Мальків Б.І., 2009

**Описано результати досліджень розподілу температури у залізобетонному перерізі за дії місцевого нагрівання. Виконане порівняння отриманих експериментальних даних з теоретичними, що були отримані за допомогою методу скінченних елементів.**

**This article describes the results of investigating the temperature distribution in reinforced concrete elements during local heating. The results were compared with theoretical figures.**

**Постановка проблеми.** Сьогодні існує достатня кількість наукових праць, у яких досліджено особливості та закономірності розподілу температури при дії загального нагрівання. Однак питання розподілу температурних полів за дії місцевого нагрівання є маловивчені та потребують свого вирішення.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Вирішення двовимірної температурної задачі, отримане у працях багатьох учених [4–8], проте отримані розв’язки є доволі громіздкими для практичних інженерних розрахунків.

**Мета та задачі досліджень.** Мета роботи – отримати експериментальні дані щодо розподілу температури у залізобетонному прямокутному перерізі за дії місцевого нагрівання та порівняти отримані результати із теоретичними, отриманими за допомогою програмного комплексу ELCUT.

**Експериментальні дослідження** Для реалізації поставленої мети була запропонована така методика досліджень (рис. 1). Місцеве нагрівання дослідного зразка проводилось за допомогою муфельної пічки 8, що попередньо нагрівалася до 900–1000 °С, яка через спеціально сконструйований перехідник контактувала з зовнішньою поверхнею зразка.

Розрахунковий розподіл температур в часі у досліджуваних точках був виконаний за допомогою програмно-обчислювального комплексу ELCUT (рис. 2), що дає змогу вирішувати двовимірні плоскі та осесиметричні задачі теплопровідності за допомогою методу кінцевих елементів. Внаслідок місцевого нагрівання залізобетонних зразків були отримані експериментальні дані з розподілу температур у перерізі зразка.

Контроль температури здійснювався за допомогою хромель-алюмелевих термопар 9, що були закладені по висоті перерізу колони та на поверхні зразка (рис. 3). Температура нагрівання бетону та арматури вимірювалась за допомогою інтелектуального вимірювального перетворювача ПВІ-0298 10, що передає інформацію про вимірювальні величини до персонального комп’ютера 11. Під час експерименту додатково вимірювались деформації бетону та арматури. За допомогою хромель-алюмелевої термопари, розміщеної у перехіднику, додатково контролювали температурний режим середовища на відстані 2 см від нагрітої поверхні зразка.

Для отримання повної картини розподілу температури необхідно розв’язати тривимірну температурну задачу за швидкого нагрівання обмеженої області (тепловий удар як вид місцевого нагрівання) у нелінійній постановці. Досвід проведених досліджень [1, 2] показує, що розподіл температури на поверхні бетону за місцевого нагрівання є фактично симетричним стосовно осі, перпендикулярної до поверхні нагрівання.

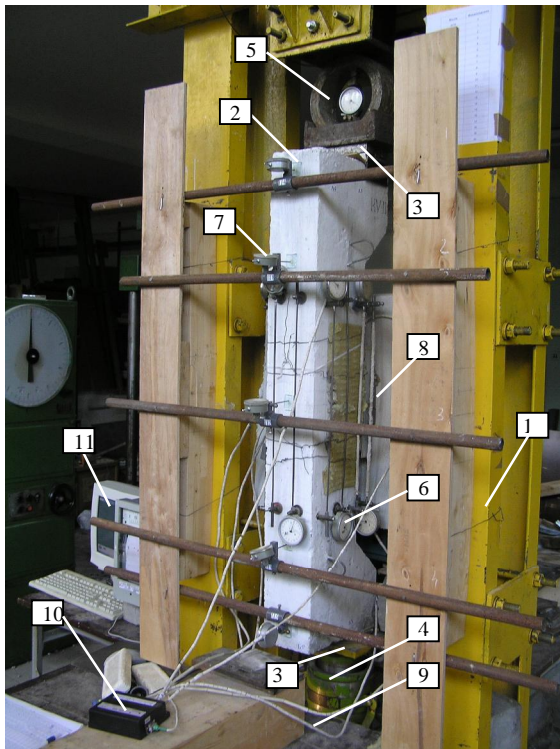


Рис. 1. Стенд для випробувань залізобетонної колони, за дії місцевого нагрівання з боку стиснутої зони бетону:

1 – випробувальний стенд, 2 – залізобетонна колонна, 3 – опорний шарнір, 4 – гідравлічний домкрат, 5 – кільцевий динамометр, 6 – індикатор годинникового типу з ціною поділки 0.001 мм, 7 – те ж, з ціною поділки 0.01 мм, 8 – муфельна піч, 9 – хромель – алюмелеві термомпари, 10 – вимірювальний перетворювач ПВІ – 0298, 11 – персональний комп'ютер.

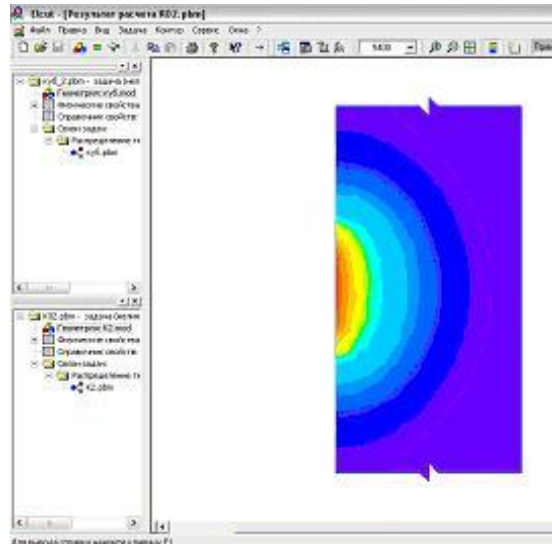


Рис. 2. Розподіл температури в перерізі дослідних зразків, отриманих за допомогою ЕОМ, на основі методу кінцевих елементів під час випробування зразків-колон

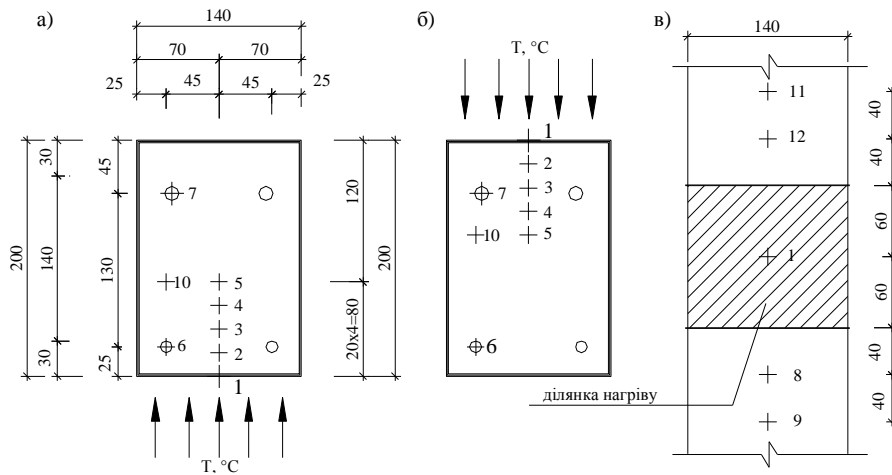


Рис. 3. Схема розміщення термомпар у зразках першої серії:

А – по висоті перерізу зразка за нагрівання з боку розтягнутої зони бетону;  
б – те саме, за нагрівання з боку стиснутої зони бетону; в – на поверхні зразка; 1÷12 – контрольні точки вимірювання температури хромель-алюмелевими термомпарами

Отже, наявну тривимірну задачу у зв'язку із її осесиметричністю можна розв'язати як двовимірну осесиметричну, з достатньою для практичних розрахунків точністю. Рівняння Фур'є в такому випадку записується у вигляді [3]:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( I(T) r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( I(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right) = -q(T) - c(T) r \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (1)$$

де  $T$  – температура;  $t$  – час;  $\lambda(T)$ ,  $c(T)$  – теплопровідність та питома теплоємність;  $q(T)$  – питома потужність тепловиділення;  $\rho$  – густина.

Розв'язки такого типу температурних задач вже застосовувалися для розрахунків під час обробки лазерним випромінюванням або електронним променем у таких прикладних задачах, як хіміко-термічна обробка матеріалів, вивчення теплофізичних коефіцієнтів, поверхневе термічне зміцнення, лазерне зварювання тощо. Над вивченням теплофізичних явищ, що при цьому відбуваються, працювали Коваленко В.С. [4], Рикалін Н.Н., [5], Григорьянц А.Г. [6] та ін. Вивченню місцевого нагрівання поверхні півпростору у лінійній постановці також приділено увагу у працях Г. Паркуса [7] та І.І. Гольденבלата [8].

У [4, 5] наведено теоретичні вирази для визначення розподілу температури від точкового або кругового температурного джерела раптової дії з гауссовим розподілом температури у ділянці нагрівання:

$$T(r, z, t) = \frac{q_m}{I_t} \left( \frac{a}{p} \right)^{1/2} \int_0^t \frac{p(t-t')}{(t')^{1/2} (4at' + r_0^2)} \exp\left(-\frac{z^2}{4at'} - \frac{r^2}{4at' + r_0^2}\right) dt', \quad (2)$$

де  $q_m$  – максимальна потужність джерела на одиницю площі в центрі гауссової плями;  $\lambda_t$  – коефіцієнт теплопровідності;  $a$  – коефіцієнт температуропровідності,

$$p(t-t') = q(t)/q_{\max}; \quad q(r) = q_0 \exp(-r^2 / r_0^2) \quad (3)$$

$r_0$  – радіус гаусового пучка.

Як бачимо з розв'язку задача розв'язана без врахування зміни теплофізичних параметрів матеріалу від температури, що призводить до значних похибок. Повніше, з врахуванням залежності теплофізичних параметрів від температури, розв'язана температурна задача у праці Н.Н. Рикаліна [5]. Розв'язок для першого наближення ітераційного процесу у безрозмірних величинах:

$$u_1(r; x; t) = C \frac{2}{\sqrt{p}} \int_0^{\sqrt{t/W}} \frac{\exp\left[-\left(\frac{r^2}{4x^2+1} + \frac{x^2}{4x^2+1}\right)\right]}{4x^2+1} dx \quad (4)$$

де  $r, x, t$  – безрозмірні величини координат та часу.

Значним недоліком під час застосування такого розв'язку задачі є громіздкість математичних перетворень та обчислень.

Тому для розв'язання цієї задачі використовувався програмний комплекс ELCUT – інтегрована діалогова система, що дає змогу розв'язувати двовимірні плоскі та осесиметричні задачі, зокрема лінійної та нелінійної стаціонарної та нестаціонарної теплопровідності за допомогою методу кінцевих елементів. Для розв'язання нелінійних задач у цьому комплексі використовується метод Ньютона–Рафсона, для розв'язку нестаціонарних задач – метод Ейлера з постійним часовим кроком та з початковими умовами (нульовими або наперед розрахованими), розв'язок лінійних рівнянь отримують з допомогою ітераційного методу [3].

При постановці задачі вводяться такі параметри: властивості середовища (ортотропні та ізотропні матеріали з залежними від температури теплопровідністю та теплоємністю), джерело поля (постійні та змінні об'ємні джерела теплової потужності), граничні умови (задана температура, заданий тепловий потік, умови конвекційного та радіаційного теплообміну, поверхні з постійною наперед невідомою температурою). Результатами розрахунку є температура, градієнт температури, щільність теплового потоку, інтегральні його значення через задані поверхні, графіки та залежності фізичних величин від часу.

Отже, до основного диференційного рівняння теплопровідності (1) були додані початкові та граничні умови і введені теплофізичні властивості бетону:

§ коефіцієнт теплопровідності та питомої теплоємності бетону (при  $\rho = 2280$  кг/м<sup>3</sup>,  $W = 2.3$  %) прийнятий згідно з дослідженнями [9]:

$$\lambda(T) = 1,2 - 0,0003T \text{ Вт/м}^\circ\text{С}, C(T) = 0,72 + 0,002T \text{ кДж/}^\circ\text{С}, \quad (5)$$

§ початкові умови

$$T(x, y, 0) = T_0(x, y), \quad (6)$$

§ гранична умова на поверхні нагрівання

$$T(0, y, t) = T_1 = \text{const}. \quad (7)$$

Відповідно до умов та режиму нагрівання були складені граничні та початкові умови:

початкові умови (6),

$$q_x = -l \frac{\partial T}{\partial x} = -a(T - T_0), \quad (8)$$

граничні умови на гранях

$$q_y = -l \frac{\partial T}{\partial y} = -a(T - T_0), \quad (9)$$

де  $a$  – коефіцієнт теплообміну на поверхнях, що враховують конвекційний та радіаційний теплообмін;  $T$  – температура зовнішнього середовища;  $T_0$  – початкова температура.

Коефіцієнт конвекційного теплообміну приймався:

для поверхонь, що обігріваються

$$a_c = 29 \text{ Вт/м}^2\text{ }^\circ\text{С}; \quad (10)$$

для поверхонь, що не обігріваються

$$a_c = 1.5 \sqrt{T - 20} \text{ Вт/м}^2\text{ }^\circ\text{С}. \quad (11)$$

Коефіцієнт теплообміну від випромінювання:

$$a_r = \frac{5.67}{e_{red}(T_{cp} - T)} \left[ \left( \frac{T_{cp} + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{T + 273}{100} \right)^4 \right], \quad (12)$$

де  $e_{red} = 0,56$  (для системи “обігріваюче середовище – бетонна поверхня”, приведений ступінь чорноти),  $e_{red} = 0,63$  (для системи “повітря – бетонна поверхня, що не обігрівається”) – приведений ступінь чорноти.

Розрахункове значення функції кривої нагрівання приймалося на основі експериментальних даних з показів термопари, що розташовувалася в пічці на віддалі 2 см від нагрітої поверхні зразка.

Порівняння експериментальних результатів розподілу температур в контрольних точках перерізу з результатами, отриманими теоретичним шляхом, показало (рис. 4) їх добру збіжність. Похибка не перевищувала  $\delta < 12$  %.

На рис. 5 зображений розподіл температури у поздовжньому перерізі зразка за нагрівання розтягнутої та стиснутої зони бетону відповідно.

За нагрівання з боку розтягнутої зони бетону розтягнута арматура за весь час нагрівання прогрівалася до температури  $(372 \div 388)$   $^\circ\text{С}$ , стиснута арматура досягала температури  $(42 \div 45)$   $^\circ\text{С}$ , температура бетону стиснутої зони цих зразків не перевищувала  $100$   $^\circ\text{С}$ . За нагрівання з боку стиснутої зони бетону стиснута арматура досягала температури  $(249 \div 278)$   $^\circ\text{С}$ , за рахунок більшого захисного шару бетону. Температура розтягнутої арматури становила  $(36 \div 37)$   $^\circ\text{С}$ , уся стиснута зона бетону знаходилася в діапазоні температур  $(667 \div 100)$   $^\circ\text{С}$ . На рис. 4 можна спостерігати відмінність між показами термопар, що пов’язані з неоднаковим нагріванням у контрольних точках (8, 9 та 11, 12), які розміщені на однаковій відстані від ділянки нагрівання. Це пояснюється тим, що за нагрівання зразків у вертикальному положенні через перехідник пічки вгору шляхом конвекції виділялося тепло, що приводить до швидшого нагрівання шарів бетону, що знаходяться над ділянкою нагрівання.

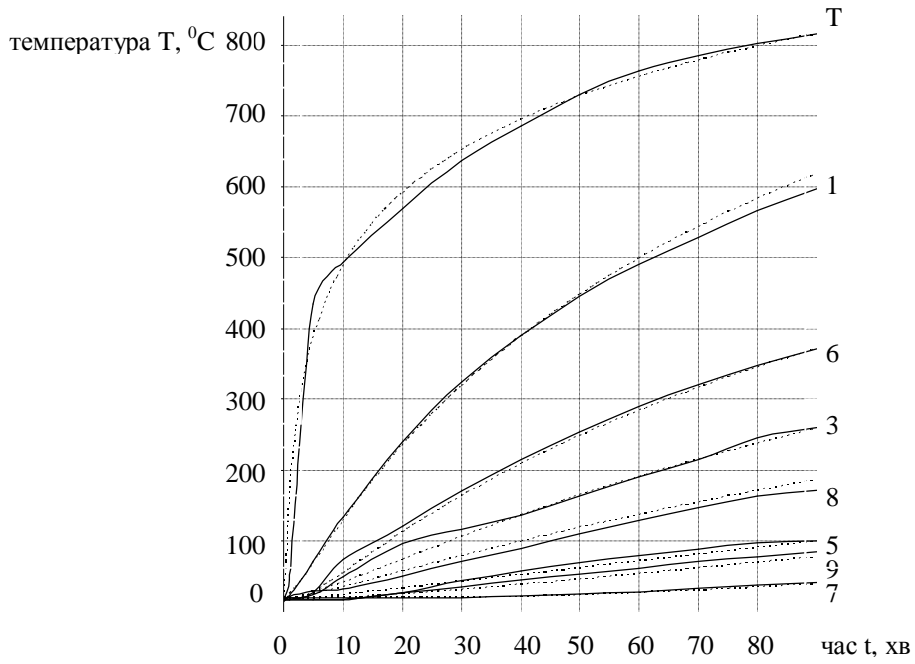


Рис. 4. Криві розподілу температур в перерізі зразка;  
 ----- теоретичні криві ————— експериментальні криві;  
 T, I÷9 – контрольні точки вимірювання температури

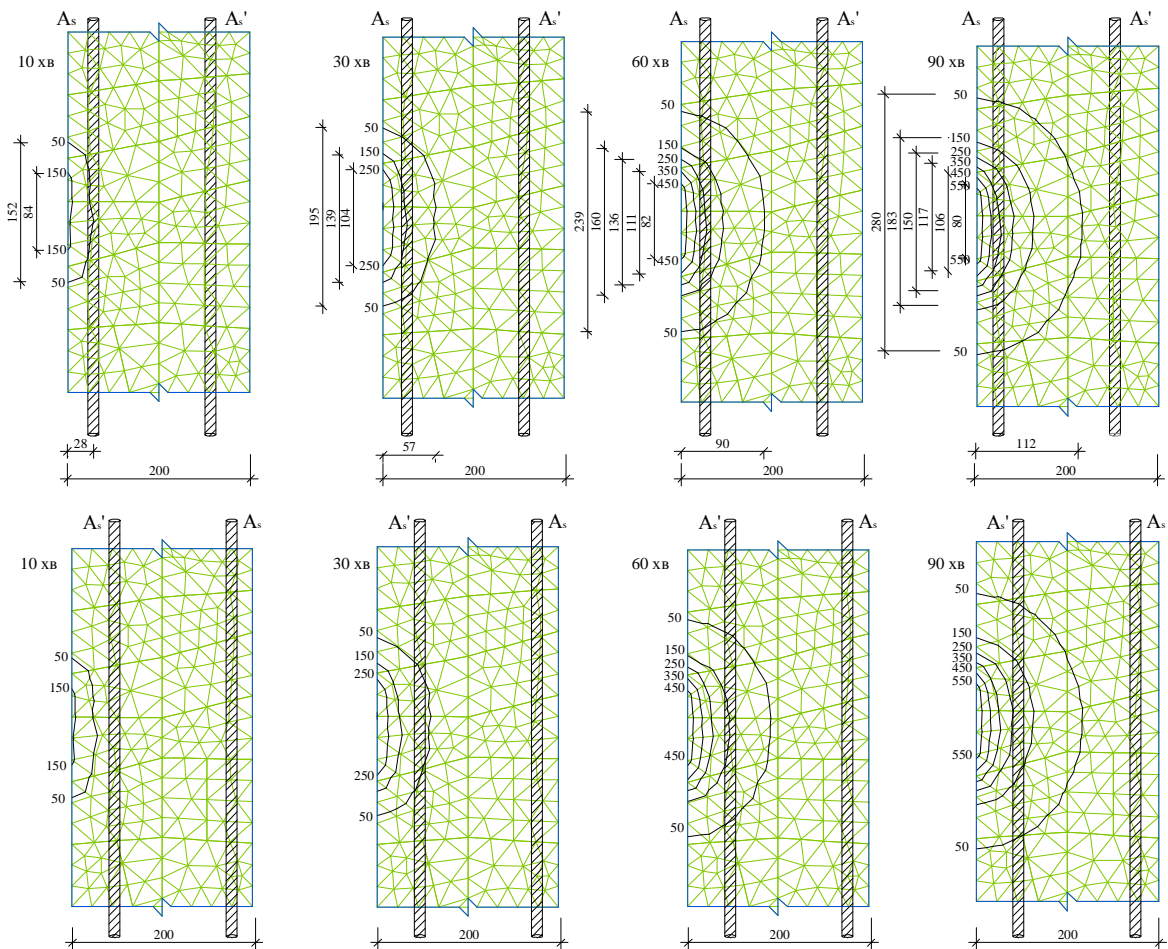


Рис.5. Розподіл температури по перерізу зразка (теоретичні дані):  
 а – за нагрівання розтягнутої зони бетону; б – за нагрівання стиснутої зони бетону;  
 сітка кінцевих елементів

Через це в т. 11, 12 спостерігалось розходження з теоретичними кривими прогріву та з показами температури у т. 8, 9. За подальшого аналізу НДС це явище було враховане. Аналіз зміни температури у т. 10 та у т. 5 показав, що по ширині перерізу відбувається відносно рівномірний розподіл температури. Місцеве нагрівання зразків супроводжувалося випаровуванням вологи на поверхні ненагрітих граней бетону.

На рис. 4 бачимо ділянки сповільнення прогрівання бетону внаслідок витрат тепла на випаровування вологи та дифузії пари по мікропорах в діапазоні температури 100 °С. Теоретичні криві нагрівання найбільше відхилення від експериментальних мають саме на цій ділянці.

На рис. 5 бачимо еліпсоподібну форму ізотерм в повздовжньому перерізі зразка. Таку форму поширення температурних полів за місцевого нагрівання можна пояснити сповільненням нагрівання у середині перерізу внаслідок витрат тепла на нагрівання суміжних шарів бетону.

**Висновки** В результаті проведених досліджень встановлено особливості розподілу температурних полів за дії місцевого нагрівання в перерізі залізобетонного зразка та встановлено, що отримані експериментальні значення мають задовільну збіжність з розрахунковими величинами. Це дає змогу застосовувати цей програмний комплекс у подальших дослідженнях.

1. Кархут І.І., Була С.С. Аналіз розподілу температур в бетоні від точкового короткотермінового температурного навантаження // Вісник Донбаської державної академії будівництва та архітектури. Будівельні конструкції, будівлі та споруди. – Макіївка, 2004. – Вип. 2004-2(44). – С.75–79. 2. Кархут І.І., Була С.С. Особливості температурних полів у конструкційному бетоні під впливом точкового лазерного нагріву // Zeszyty naukowe Politechniki Rzeszowskiej. Budownictwo i inzynieria srodowiska. – Rzeszow, 2004. – z.37.– С. 151–158. 3. Моделирование двумерных полей методом конечных элементов ELCUT. Руководство пользователя. ПК TOP., С-П. – 2003. – 252 с. 4. Коваленко В.С. Лазерная технология. К., “Вища школа”.- 1989. – 254 с. 5. Рыкалин Н.Н., Углов А.А., Смуров И.Ю. Пространственные нелинейные задачи нагрева металлов излучением лазера. – М.: Физика и химия обработки метереалов. – 1979. – № 2. – С. 3–12. 6. Григорьянц А.Г., Соколов А.А. Лазерная обработка неметаллических материалов.- М 1988. -190с. 7. Паркус Г. Неустановившиеся температурные напряжения. – М.: Гос.из-во физ-мат. лит., 1963. 8. Гольденблат И.И. Расчеты на прочность, устойчивость и колебания в условиях высоких температур. – М.: Машиностроение, 1965. – 510 с. 9. Милованов А.Ф. Стойкость железобетонных конструкций при пожаре. – М.: Стройиздат, 1998. – 304 с.