

## ГЕОТЕХНОЛОГІЯ

УДК 622.235

### ДИНАМІКА ФОРМУВАННЯ СВЕРДЛОВИННИХ ЗАРЯДІВ ВИБУХОВИХ РЕЧОВИН У ПОЛІМЕРНИХ ОБОЛОНКАХ

*В.С. Прокопенко, канд. техн. наук (ЗАТ "Техновибух")*

*Построена физико-математическая модель динамического процесса формирования скважинных зарядов взрывчатых веществ в полимерных оболочках в условиях сухой скважины. Выполнен анализ влияния физических параметров на динамику движения и скорость заполнения скважинных зарядов.*

Одним з напрямків здешевлення і підвищення ефективності буропідричних робіт є збільшення коефіцієнта корисного використання енергії вибуху. Досягти цього можна впровадженням нових технологій у буропідричних комплексах. Однією з перспективних є технологія заряджання свердловин з формуванням зарядів вибухових речовин (ВР), що мають сипучу зернисту структуру, у плівкових оболонках (рукавах) [1]. Діаметр цих рукавів менший за діаметр свердловин, що забезпечує наявність зазору між стінками свердловини та зарядом. Як показали результати математичного моделювання процесу вибуху та відповідних натурних експериментів, саме цей фактор є причиною збільшення зони дроблення порід у процесі вибуху сформованих таким чином зарядів [1].

Використання зазначеної вище технології вимагає дослідження динаміки процесу формування свердловинних зарядів ВР у полімерних рукавах з метою організації технічного забезпечення цих робіт та оптимізації характеристик процесу.

У цій праці розглядаються сухі свердловини, які можуть бути як вертикальними, так і похилими з кутом  $\alpha$  між віссю свердловини і вертикаллю до поверхні породи. Схему заряджання таких свердловин сипучою зернистою ВР з формуванням зарядів у поліетиленових рукавах, які опускаються у свердловину безпосередньо з пристрою подачі рукава, наведено на рис. 1. Пристрій має таку конструкцію, що поліетиленовий рукав під дією завантаженої в нього ВР зісковзує з гальмуванням. Сила гальмування поліетиленового рукава розраховується на певну величину стартової маси тіла і змінюється залежно від швидкості руху цього рукава-тіла. У процесі завантаження ВР і формування поліетиленового рукава-тіла не вся частина висипаної ВР складає те, що можна назвати тілом. Тілом надалі називається лише область рукава, суцільно заповнена ВР. Саме для цієї області можна

коректно записати динамічне рівняння руху. У випадку вертикальної свердловини деяка частина завантаженої ВР летить у повітрі всередині рукава, а у випадку похилої свердловини – ковзає всередині рукава вздовж плівки-стінки. З метою спрощення схеми задачі нехтується можливим рухом гранул ВР одна відносно іншої і утворюваними при цьому силами тертя, які описуються неньютонівськими законами.

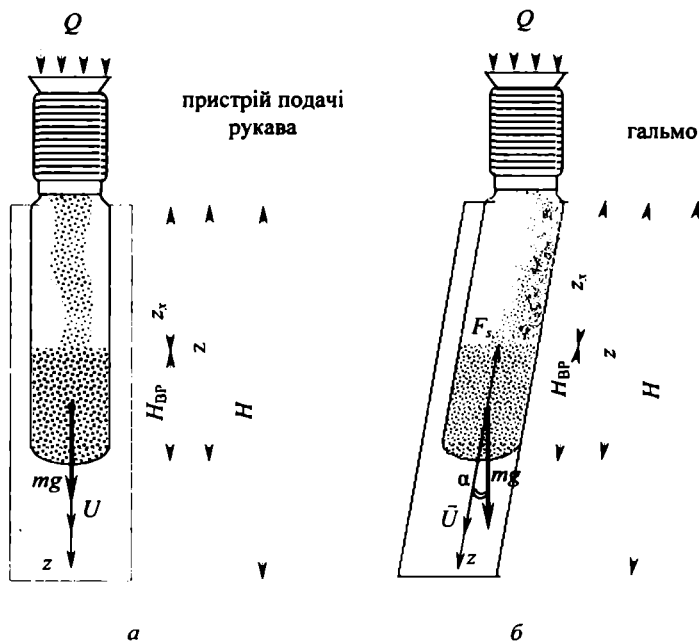


Рис. 1. Схема формування та руху свердловинного заряду ВР: *а* – вертикальна свердловина; *б* – похила свердловина

Слід відзначити, що та частина засипаної маси ВР, яка на фіксований момент не складає масу тіла, а знаходиться "в дорозі" до нього, безпосередньо впливає на рух тіла. У випадку вертикальної свердловини цей вплив обумовлений передачею тілу з боку падаючої маси надлишку її кількості руху. У випадку похилої свердловини на рух тіла впливає, крім того, ще й додаткова сила опору – сила тертя частини плівкового рукава, навантаженої зісковзуючим шаром ВР, об стінку свердловини. Останнє обумовлене тим, що сама плівка, всередині якої просковзує "по дорозі" до тіла шар ВР, рухається разом з тілом вниз, ковзаючи по стінці свердловини.

В процесі руху описаної вище системи маса тіла при неперервному завантаженні зростає, тому для опису динаміки його руху використовується рівняння Мещерського для точки змінної маси [2]

$$m \frac{dU}{dt} = mg \cos \alpha + F_s + U_c \frac{dm}{dt}, \quad (1)$$

де  $m(t)$  – маса тіла;  $U$  – швидкість його руху;  $F_s$  – сила опору руху тіла;  $U_c = U_g - U$  – відносна швидкість маси, яка в процесі руху тіла приєднується до його маси (в момент контакту) з швидкістю  $U_g$ ;  $g$  – прискорення сили тяжіння;  $t$  – час.

Для опису руху тіла вздовж осі  $z$ , яка збігається з віссю вертикальної свердловини або паралельна осі похилої свердловини, необхідно у рівнянні (1) задати величини  $U_g(t)$ ,  $F_s$  та закон зміни маси  $dm/dt$ . Ці величини визначаються технологією заряджання та фізичними характеристиками середовища.

У схемі задачі приймається, що заряджання ВР у поліетиленовий рукав відбувається на рівні поверхні породи. Стримуюча сила гальмівної кільцевої пружини розрахована так, що вона відповідає величині маси тіла  $m_0$  в момент початку руху з  $U = 0$ . Довжина тіла в початковий момент відома і дорівнює  $l$ . Приймається режим неперервного завантаження з витратою ВР в одиницю часу  $Q$  (кг/с).

Для опису процесу необхідно ввести величини  $z_*(t)$  – віддаль від поверхні породи до заднього торця тіла (див. рис. 1) і  $t_*(t)$  – час, протягом якого частинка ВР перебуває "в дорозі" до тіла. Ці величини вираховуються в процесі розв'язання задачі і необхідні для визначення таких важливих параметрів задачі, як швидкість зміни маси тіла  $\frac{dm}{dt}$  та довжина тіла  $H_{ВР}$ :

$$H_{ВР} = l + \frac{Q(t - t_*)}{\rho_{ВР} R^2},$$

де  $R$  – радіус поліетиленового рукава;  $\rho_{ВР}$  – щільність ВР.

Динаміка заряджання вертикальних і похилих свердловин має свої особливості, які розглядаються нижче.

### Вертикальна свердловина

У випадку вертикальної свердловини частинки ВР падають вниз під дією сили тяжіння. Якщо знехтувати силою опору повітря, шлях, пройдений кожною з них за час  $t$ , визначається як

$$z = V_0 t + \frac{1}{2} g t^2,$$

де  $V_0$  – початкова швидкість частинок ВР при  $z = 0$ . Тоді в момент їх підльоту до тіла

$$z_* = V_0 t_* + \frac{1}{2} g t_*^2. \quad (2)$$

З іншого боку, величина  $z_*$  визначається як різниця між координатою носика тіла та довжиною тіла. Хоч центр ваги тіла знаходиться всередині поліетиленового рукава в точці на осі руху з координатою  $z = \frac{1}{2} H_{\text{ВР}}$ , його рух зручно описувати як рух точки, що знаходиться в носіку тіла. Отже, координата носика тіла завжди буде  $z(t)$ . Тоді

$$z_* = z - H_{\text{ВР}} = z - l - \frac{Q(t - t_*)}{\pi \rho_{\text{ВР}} R^2}. \quad (3)$$

З порівняння виразів (2) і (3) визначається залежність величини  $t_*$  від параметрів задачі у вигляді

$$t_* = -q + \sqrt{q^2 + p}, \quad (4)$$

де

$$q = \frac{1}{g} \left( V_0 - \frac{Q}{\pi \rho_{\text{ВР}} R^2} \right),$$

$$p = \frac{2}{g} \left( z - l - \frac{Q t}{\pi \rho_{\text{ВР}} R^2} \right).$$

Знаючи величину  $t_*$ , можна визначити характер зміни маси тіла в часі. З фізичних міркувань випливає, що маса тіла дорівнюватиме сумі початкової маси  $m_0$  і маси, вивантаженої за час  $t$  (тобто величини  $Q t$ ), зменшеної на масу ВР, яка знаходиться в процесі польоту (тобто на масу, вивантажену протягом відрізка часу  $t_*$ ).

Таким чином, зміна маси тіла відбувається відповідно до закону

$$m(t) = m_0 + Q(t - t_*) + m_{\text{н*}}(z - l),$$

де  $m_{\text{н*}}$  – маса одиниці довжини власне плівкового рукава, а відповідна складова маси  $m(t)$  – маса плівкового рукава, яка зійшла з пристрою подачі рукава на момент часу  $t$ .

Тоді

$$\frac{dm}{dt} = Q \left( 1 - \frac{dt_*}{dt} \right) + m_{\text{н*}} U,$$

оскільки  $U = \frac{dz}{dt}$ , а з (4)

$$\frac{dt_*}{dt} = \frac{1}{g(q^2 + p)^{1/2}} \left( U - \frac{Q}{\pi \rho_{\text{ВР}} R^2} \right).$$

Відносна швидкість  $U_c$  визначається як

$$U_c = V_0 + gt_* - U.$$

Сила опору руху тіла в даному випадку має лише одну складову – силу гальмування  $F_\delta$  пристрою подачі рукава, яка задається як функція швидкості руху тіла і є управляючим параметром задачі. Її можна задавати, наприклад, у вигляді

$$F_s = F_\delta = -a[1 - bU^{1/2}(c - U)], \quad (5)$$

де  $a$ ,  $b$  і  $c$  – управляючі константи, які підбираються такими, щоб  $F_\delta$  відповідала заданій величині стартової маси тіла і забезпечувала допустимий діапазон величин швидкості руху тіла.

Підставляючи вирази для  $m(t)$ ,  $dm/dt$ ,  $U_c$  у рівняння (1), одержимо вихідне рівняння для  $z(t)$ :

$$\begin{aligned} \frac{d^2 z}{dt^2} = & g \cos \alpha + [m_0 + Q_0(t - t_*) + m_{\text{н}}(z - l)]^{-1} \{ F_\delta + \\ & \times \left[ F_\delta + \left( V_0 + gt_* - \frac{dz}{dt} \right) \left[ Q \left( 1 - \frac{dt_*}{dt} \right) + m_{\text{н}} \frac{dz}{dt} \right] \right\} \end{aligned} \quad (6)$$

з відповідними початковими умовами

$$\left. \begin{aligned} z &= l \\ \frac{dz}{dt} &= 0 \end{aligned} \right\} \text{ при } t = 0. \quad (7)$$

Значення  $t_*$  і  $F_\delta$  у рівнянні (6) визначаються відповідно виразами (4) і (5).

Розв'язання рівняння (6) з початковою умовою (7) являє собою задачу Коші і виконується з використанням чисельного методу Рунге–Кутта [3]. Розв'язок даної задачі знаходиться в інтервалі  $l \leq z \leq H$ , де  $H$  – глибина свердловини.

### Похила свердловина

В даному випадку частинки ВР потрапляють на стінку плівкового рукава, який рухається, і по ній зісковзують вниз до тіла.

Розглянемо рух деякого елемента ВР з масою  $m_e$ , який ковзає всередині плівкового рукава "по дорозі" до тіла. На цей елемент, крім сили тяжіння, діятиме сила опору тертя об стінку плівки  $P_T$ . Отже, рух такого елемента для похилої свердловини описується рівнянням

$$m_e \frac{dV}{dt} = mg \cos \alpha + P_T. \quad (8)$$

Величина сили тертя визначається виразом

$$P_T = -k_s m_e g \sin \alpha,$$

де  $k_s$  – коефіцієнт тертя ВР об стінку плівкового рукава.

Тоді рівняння (8) набирає вигляду

$$\frac{dV}{dt} = g(\cos \alpha - k_s \sin \alpha)$$

з розв'язком

$$V = V_0 + g_* t,$$

де

$$g_* = g(\cos \alpha - k_s \sin \alpha).$$

Для  $z(t)$  масмо

$$z = V_0 t + \frac{1}{2} g_* t^2. \quad (9)$$

Як і в попередній задачі, для опису руху тіла необхідно визначити величину  $t_*$ . Знову вводиться величина  $z_*$ , яку в даній задачі можна подати у вигляді

$$z_* = z_{*1} + z - z_{t_*}, \quad (10)$$

де  $z_{*1}$  – шлях, пройдений елементом маси ВР всередині плівкового рукава за час  $t_*$ , а  $z_{t_*}$  – шлях, пройдений тілом на момент часу  $t - t_*$ . Вираз (10) для  $z_*$  враховує той факт, що елемент маси ВР рухається всередині плівкового рукава, який, в свою чергу, також рухається разом з тілом.

З іншого боку, як і у випадку вертикальної свердловини,  $z_*$  визначається виразом (3). Враховуючи, що з (9)

$$z_{*1} = V_0 t_* + \frac{1}{2} g_* t_*^2,$$

порівняння виразів для  $z_*$  з (3) та (10) дозволяє знайти значення  $t_*$ :

$$t_* = -q_1 + \sqrt{q_1^2 + p_1}, \quad (11)$$

де

$$q_1 = \frac{1}{g_*} \left( V_0 - \frac{Q}{\pi \rho_{\text{ВР}} R^2} \right),$$

$$p_1 = \frac{2}{g_*} \left( z_{t_*} - l - \frac{Qt}{\pi \rho_{\text{ВР}} R^2} \right).$$

Величина  $m(t)$  у даному випадку визначається виразом

$$m(t) = m_0 + Q(t - t_*) + \frac{m_{n*} Q(t - t_*)}{\pi \rho_{\text{ВР}} R^2}, \quad (12)$$

відповідно

$$\frac{dm}{dt} = Q \left( 1 + \frac{m_{n*}}{\pi \rho_{\text{ВР}} R^2} \right) \left( 1 - \frac{dt_*}{dt} \right).$$

Враховуючи, що величина  $z_{t_*}$  є функцією від  $t - t_*$ , для величини  $dt_* / dt$  має місце вираз

$$\frac{dt_*}{dt} = \frac{1}{g_* (q_1^2 + p)^{1/2}} \left[ \frac{dz_{t_*}}{d(t - t_*)} - \frac{Q}{\pi \rho_{\text{ВР}} R^2} \right] \left[ 1 + \frac{1}{(q_1^2 + p_1)^{1/2}} \frac{dz_{t_*}}{d(t - t_*)} \right]^{-1}. \quad (13)$$

Відносна швидкість  $U_c$  в даному випадку визначається безпосередньо з розв'язку для  $V(t)$ :

$$U_c = V_0 + g_* t_*.$$

Коефіцієнт тертя  $k$ , задається на підставі експериментальних даних і визначається фізичними характеристиками ВР та поліетиленової плівки рукава.

При русі поліетиленового рукава-тіла у свердловині з'являється додаткова сила опору – сила тертя  $F_\tau$  як тіла, так і тієї частини рукава, вздовж якої рухається маса ВР, що ковзає по стінці свердловини "по дорозі" до тіла. Ця сила може бути подана у вигляді

$$F_\tau = -[mg + m_{n*}(z - H_{\text{ВР}}) + Qt_*] k_\tau \sin \alpha, \quad (14)$$

де  $k_\tau$  – коефіцієнт тертя завантаженого плівкового рукава об стінку свердловини.

Гальмівна сила  $F_\delta$ , як і раніше, задається виразом (5).

З урахуванням наведених вище результатів рівняння руху тіла в похилій свердловині набуває вигляду

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} = mg(\cos \alpha - k_\tau \sin \alpha) - k_\tau [m_{n*}(z - H_{\text{ВР}}) + Qt_*] g \sin \alpha + \\ + F_\delta + (V_0 + g_* t_*) Q \left( 1 + \frac{m_{n*}}{\pi \rho_{\text{ВР}} R^2} \right) \left( 1 - \frac{dt_*}{dt} \right), \quad (15)$$

де  $m(t)$  визначається виразом (12),  $t_*$  – виразом (11),  $F_{\delta}$  – виразом (5),  $dt, l/dt$  – виразом (13) і  $H_{\text{ВР}}$  – як у випадку вертикальної свердловини.

Початкові умови рівняння (15) мають вигляд (7).

Розв'язок рівняння (15) знаходиться чисельно методом Рунге-Кутта, як і у випадку вертикальної свердловини.

Для ілюстрації одержаних результатів було виконано розрахунки руху тіл для випадку похилих свердловин при  $R = 0,13$  м,  $m_0 = 25$  кг,  $\alpha = 0,0175$  і  $0,35$ ,  $l = 0,52$  м,  $H = 3; 5; 10; 15; 20$ ,  $\rho_{\text{ВР}} = 900$  кг/м<sup>3</sup>,  $k_T = 0,44$ ,  $k_* = 0,75$ ,  $V_0 = 0$  та параметрах гальмівної сили  $a = 192$  і  $243$ ,  $b = 7$ ,  $c = 0,08$  для різних значень витрати  $Q$  за одиницю часу. На рис. 2 наведено результати розрахунку таких характеристик руху, як зміна в часі глибини занурення тіла в свердловину  $z$ , рівень завантаженості ВР (довжина тіла)  $H_{\text{ВР}}$ , швидкість руху тіла  $U = dz/dt$ . На рис. 3 показано характер зміни гальмівної сили  $F_{\delta}$  в процесі руху тіла, для  $H = 10$  м,  $Q = 5$  кг/с і  $\alpha = 0,0175$ . Всі названі характеристики монотонно зростають.

Після досягнення тілом дна свердловини рух його припиняється і далі йде процес завантаження нерухомого поліетиленового рукава до потрібного рівня.

Головними параметрами для оцінки процесу завантаження сухих свердловин є витрата ВР в одиницю часу, довжина завантаженої частини поліетиленового рукава-тіла в момент досягнення ним дна (пропорційна його масі в цей момент) та швидкість тіла в процесі руху. Якщо величина  $Q$  характеризує швидкість заряджання свердловини ВР і тому бажано вибирати її максимальне значення, то на величину  $U$  існують обмеження технологічного характеру. При великій швидкості руху тіла зі зростанням сили гальмування на пристрої подачі рукава виникає можливість розриву поліетиленового рукава.

Крім того, при ударі з великою швидкістю тіла об дно свердловини можливий розрив плівкової оболонки, що призведе до небажаного завантаження ВР зазору між тілом і стінкою свердловини. Тому режим опускання тіла у свердловину повинен бути таким, щоб унеможливити подібні ситуації. Для цього необхідно на підставі розв'язків рівнянь (6) та (15) підбирати такі параметри  $m_0$ ,  $R$ ,  $a$ ,  $b$ ,  $c$ , які б забезпечували недосягнення критичних значень швидкості руху тіла  $U_{\text{кр}}$ , за яких стає можливим обрив плівкового рукава на пристрої подачі рукава або розрив плівкової оболонки тіла в момент його удару об дно.

Про величину швидкості руху тіла в момент досягнення ним дна  $U_k$  залежно від глибини свердловини  $H$  та для різних значень  $Q$  можна робити висновки з результатів, наведених на рис. 4 для  $3 \leq H \leq 20$  м,  $R = 0,13$  м,  $m_0 = 25$  кг,  $\alpha = 0,35$ ,  $l = 0,52$  м,  $k_T = 0,44$ ,  $k_* = 0,75$ ,  $a = 192$ ,  $b = 7$ ,  $c = 0,08$ . Зі збільшенням  $Q$  при незмінних інших параметрах має місце зростання швидкості  $U_k$ , причому зростання тим більше, чим більше  $Q$ .



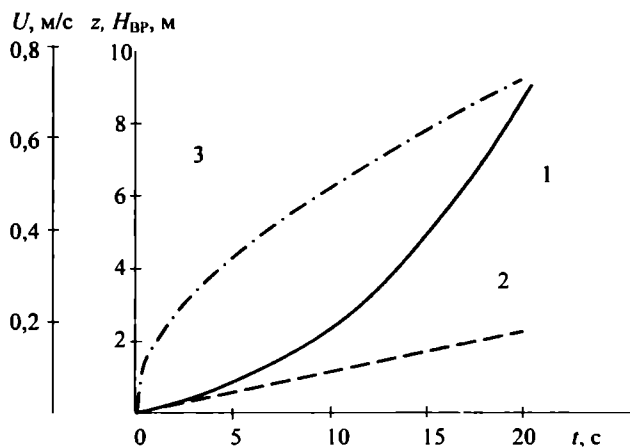


Рис. 2. Зміна в часі глибини занурення тіла в свердловину  $z$  (1), рівня завантаження ВР  $H_{BP}$  (2) та швидкості занурення тіла  $U$  (3)

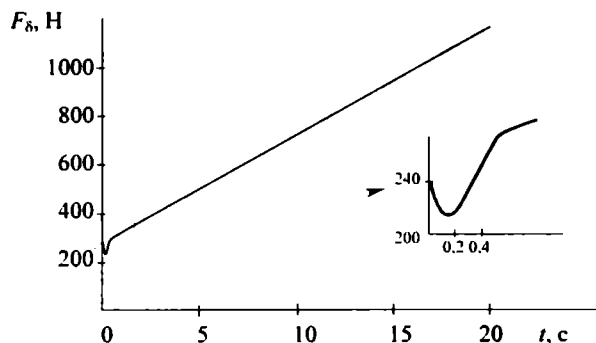


Рис. 3. Зміна в часі гальмівної сили  $F_{\delta}$  в процесі занурення тіла в свердловину

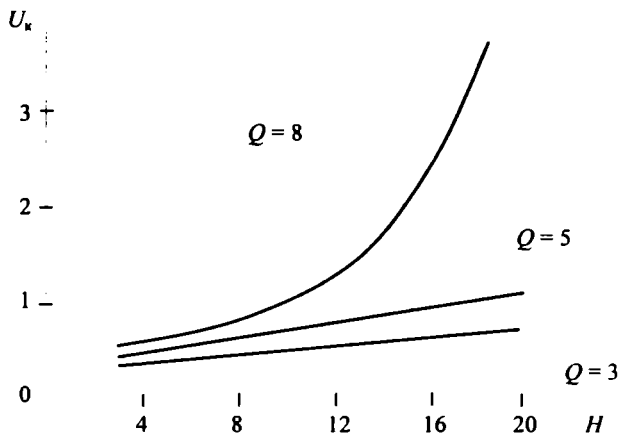


Рис. 4. Залежність швидкості тіла  $U_k$  в момент досягнення ним дна свердловини від її глибини  $H$

Такого роду залежності слід використовувати при виборі величини  $Q$  для заданої глибини свердловини  $H$  та кута нахилу  $\alpha$ . З виразу для складової сили тертя  $F_T$  видно, що зі зростанням кута нахилу  $\alpha$  свердловини ця сила зростає пропорційно  $\sin \alpha$ . Отже, при інших однакових параметрах задачі для більш похилих свердловин можлива реалізація заряджання свердловини з більшою витратою  $Q$  в одиницю часу.

В загальному випадку, залежно від глибини свердловини  $H$  для заданого кута її нахилу  $\alpha$  чисельним моделюванням процесу на основі рівняння (6) або (15) визначається необхідна комбінація параметрів гальмівної сили  $F_g$  та величини  $Q$ , яка забезпечує виконання заданої умови  $U \leq U_T$ , де  $U_{\max}$  – максимально допустима технологією заряджання швидкість руху тіла з ВР всередині свердловини, менша  $U_{кр}$ .

1. Прокопенко В.С. Обґрунтування ефективності вибуху свердловинних зарядів у полімерних оболонках // Вісник Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут", серія "Гірництво": Збірник наукових праць. – Київ: НТУУ "КПІ" : ЗАТ "Техновибух", 1999. – Вип. 1. – С. 52–67.

2. Савин Г.Н., Кильчевский Н.А., Пулята Т.В. Курс теоретической механики. – Киев: ГИТЛ, 1957. – 358 с.

3. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. – М: Наука, ГРФМЛ, 1973. – 831 с.