

## ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ДИНАМІКИ ЛІКВІДАЦІЇ ПРИХОПЛЕНЬ КОЛОНИ УДАРНИМИ ПРИСТРОЯМИ

<sup>1</sup> Б.М.Малярчук, <sup>2</sup> П.І.Огородніков, <sup>1</sup> В.М.Світлицький

<sup>1</sup> ДК "Укргазвидобування", м. Київ e-mail: svetlitsky@gasdob.com.ua

<sup>2</sup> МНТУ, м. Київ, e-mail: ogorodnikov@mail.ru

*Рассмотрены теоретические основы динамики ликвидации прихватов колонны ударными устройствами. Обосновано решающее значение выбора компоновки над и под УПП (устройством ликвидации прихватов), а также типа самого устройства (вибрационный, ударный) в зависимости от глубины и формы (искривления) скважины; возможной причины аварии; геологических условий зоны прихвата, характеристик породы и т.д.*

*Theoretical bases of dynamics of column freeze liquidation by impact devices are studied. The authors accentuate on significant value of arrangement of the device for freeze liquidation: type of device (vibration, impact) depending on a depth and forms (curvatures) of well; possible reasons of failure; geological terms of area of freeze, descriptions of rock and etc.*

Боротьбу за зменшення аварійності можна проводити шляхом впровадження заходів з попередження аварій, або шляхом вдосконалення лувильного інструменту і методів ліквідації аварій. На основі досвіду бурових робіт у різних регіонах України і СНД було рекомендовано чимало заходів з попередження аварійності [1], однак аварійність, пов'язана з прихопленнями бурового інструменту, досі залишається дуже високою як у разі буріння нафтогазових свердловин, так і у разі геологічного буріння. Такий стан справ в бурінні змушує до вдосконалення технологій і інструментів для ліквідації прихоплення на базі вивчення динамічних процесів в бурильній колоні. Особливо це стосується ліквідації прихоплення у свердловинах з викривленим стовбуром. Успішний хід ліквідації прихоплення пов'язаний, головним чином, з правильним вибором технічних засобів, режиму їх роботи і компонувань над ПЛП (пристрій ліквідації прихоплення) і під ним, над головою прихоплення. Основним чинником, від якого

залежить вибір способу ліквідації прихоплення, параметри роботи ПЛП і його типу, є геологічні умови проводки свердловини і тип прихоплення.

Невірний вибір методики і механізмів призводить до ускладнення аварій. Науковий підхід до процесу ліквідації аварій і виконання необхідних техніко-організаційних заходів – запорука успіху під час ліквідації прихоплення та інших видів аварій.

Вибір компонувань над ПЛП і під ним і типу самого пристрою (вібраційний, ударний) буде залежати, в основному, від таких показників: глибина і форма (викривлення) свердловини; можлива причина аварії; геологічні умови зони прихоплення; стійкість та інші властивості порід, які складають стінки свердловини, а також інші обставини, які характеризують прихоплення: можлива кількість тлиму в свердловині, висота, на яку було піднято інструмент над

вибоєм під час прихоплення, наявність циркуляції тощо.

На теперішній час значною мірою вивчені явища, які виникають під час ліквідації прихоплення вібраційними методами. Процеси, які відбуваються в зоні прихоплення, з врахуванням яких хвильової енергії, ударними і ударно-вібраційними пристроями дослідженні недостатньо. Ефект взаємодії віброуючої поверхні прихопленої труби з породою, зумовлений ударним імпульсом, залежить від конкретних геологічних умов і фізико-механічних властивостей складу порід, які зумовили прихоплення.

Труби, які прихоплені сипучим матеріалом і знаходяться під дією ударно-вібраційного навантаження, призводять до зменшення сил взаємодії між окремими зернами породи. Це призводить до більшої рухомості частинок і маса породи навколо прихопленої труби стає схожою на в'язке середовище. Фізико-механічні властивості цього середовища характеризується коефіцієнтом вібров'язкості [2].

Якщо зона прихоплення представлена породами, які мають тиксотропні властивості (прилипання труб до глинистої кірки, затискання в скупчених породах глинистого комплексу тощо), то дія вібраційного поля відрізняється. В зоні між стінками труби і породою під дією вібраційного (хвильового) поля, яке передає енергію в породу, відбувається руйнування структури і виділення вільної води гідратними оболонками. Навколо води виникає розріджений шар [2], який дає можливість збільшення прихопленої частини колони під дією попереднього статистичного навантаження. Відбувається зміна сухого тертя на гідродинамічне, що понижує опір переміщенню прихопленої колони.

У випадку, коли інструмент прихоплений за рахунок розклинювання труб великими шматками породи, коефіцієнт сухого тертя і сили зчеплення під дією післяударної вібрації інструменту між ними зменшуються, що полегшує вивільнення інструменту під дією попереднього натягу.

Таким чином, теоретично можна розглядати два випадки – дія на прихоплену зону колони сил в'язкого опору або дію тангенціальних сил сухого тертя.

Таким чином, прихоплена частина колони за умови надання їй деякої рухомості знаходиться в складному русі: на рух під дією натягнутої колони (переносний рух) накладається хвильовий рух, спричинений ударом ПЛП, що викликає зміну характеру взаємодії поверхні прихопленої труби з зовнішнім середовищем і поведінкою цього середовища.

Залежно від значення параметрів у системі прихопленої бурильної колони можна розглядати три типи переносного руху: регулярний – рух з постійною швидкістю (наприклад, під час встановлення нафтової ванни); прискорений – рух під дією вібрацій або хвильових процесів; і чисто коливний – коли рухомість прихопленої частини не реагує на прикладені статичні і динамічні навантаження.

Для визначення силових умов ліквідації прихоплення умовно поділимо систему на дві частини: нижню – до ПЛП і верхню – під ПЛП та врахуємо, що на нижню (прихоплену) частину діє рівнодійна сила

$$F(t) = Mg + P_0 + F(t), \quad (1)$$

де:  $M$  – маса прихопленої частини і компоновки між ПЛП і головою прихоплення;  $P_0$  – статистичний натяг;  $F(t)$  – ударна сила (синусоїдальний імпульс).

Тоді рівнодійна сила, прикладена до прихопленої частини (без врахування реакції) в післяударний період до затухання коливних процесів буде

$$F(t) = Mg + P_0 + \sigma(t), \quad (2)$$

де  $\sigma(t)$  – змінні сили, викликані хвильовим процесом в перетинах труб.

Розглянемо можливе переміщення прихоплених труб під дією тільки сили  $P_0$ . При цьому будемо виходити з лінійності залежності між контактними (дотичними) напруженнями  $\tau$  і осьовими переміщеннями  $u$  в поперечних перетинах прихопленої частини колони (рис. 1)

$$\tau = -ku, \quad (3)$$

де  $k$  – коефіцієнт дотичного опору породи прихоплення.

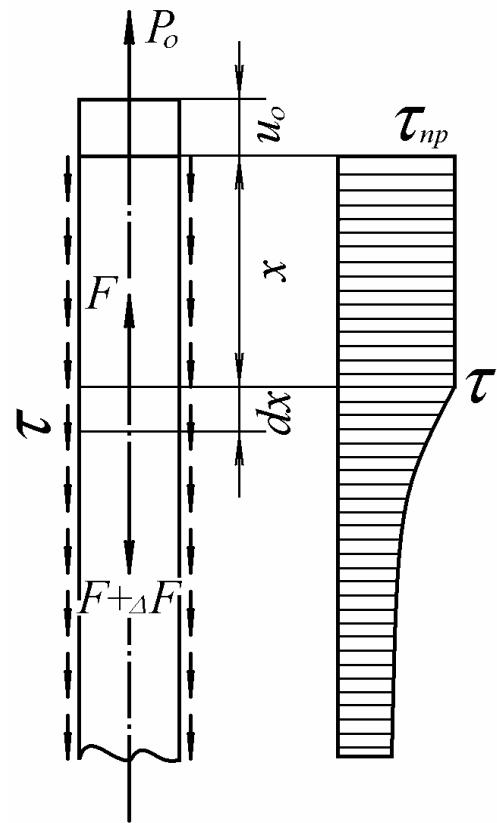


Рисунок 1

З умови рівноваги елемента  $dx$  довжини колони (прихопленої частини) і сумісності їх переміщення з породою, яка викликала прихоплення, отримаємо такий розв'язок:

$$\frac{du}{dx} = \frac{F}{E_n S}; \quad \tau \pi D = -\frac{dF}{dx}, \quad (4)$$

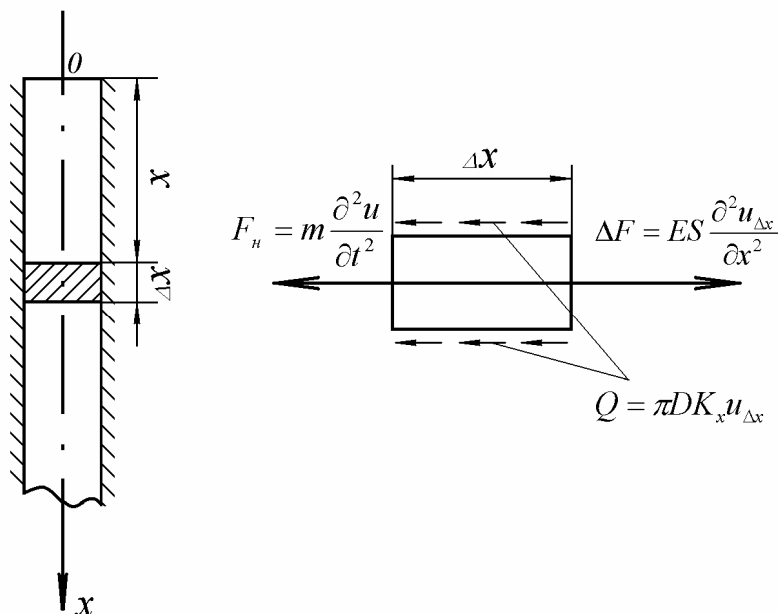


Рисунок 2

де:  $E_n$  – модуль пружності в перетині;  $S$  – площа перетину;  $D$  – діаметр труби.

З врахуванням (3) за  $n = \sqrt{\frac{k}{Dh}}$  отримаємо диференціальне рівняння

$$\frac{d^2 F}{dx^2} = n^2 F. \quad (5)$$

Розв’язання цього рівняння допоможе знайти осові зусилля

$$F = C_1 e^{nx} + C_2 e^{-nx}. \quad (6)$$

Розглянемо випадок, коли прихоплення по довжині значне (защемлення). У цьому випадку можемо вважати, що нижня частина прихоплення не дає зриву (по всій довжині). Тоді, приймаючи трубу як напівнескінченну ( $t = 0, C_1 = 0$ ), за  $x = 0, F_0 = P$

$$F = P \cdot e^{-nx}; \tau = \frac{nP}{\pi D} e^{-n}; u = \frac{P}{nE_n \cdot S} e^{-nx}. \quad (7)$$

Якщо  $F > P_{np} = \frac{T_0}{n}$ , де  $T_0 = \pi D \tau_{np}$ , то на ділянці  $l_0$ , яка дотикається до вільного кінця прихопленої частини труб, відбувається зрив

$$l_0 = \frac{P}{T_0} - \frac{1}{n}; \quad u_0 = -\frac{1}{2E_n F} \left( \frac{P^2}{T_0} + \frac{T_0}{n^2} \right). \quad (8)$$

Таким чином, під дією статичного (попереднього) натягу за визначених умов можливий зрив. У разі застосуванні ПЛП необхідно розрахувати вузол роз’єднання на остаточне навантаження, яке б забезпечувало зрив, що полегшує подальшу ліквідацію прихоплення.

Розглянемо поведінку прихопленої частини бурильної колони під впливом хвильового процесу, який виникає під дією ударного імпульсу.

Для цього вісь  $x$  спрямуємо вздовж осі труб і виділимо елемент труби  $dx$  на відстані  $x$  від початку координат (рис. 2). Позначимо переміщення цього елемента відносно зони прихоплення (відносно породи) через  $u(x, t)$ . Надалі таке переміщення будемо називати відносним. Припустимо, що взаємодія породи, що оточує трубу, лінійно залежить від переміщення труби під дією ударного імпульсу і післяударних коливань відносно породи, яка обумовила прихоплення

$$\tau = k_x u(x, t), \quad (9)$$

де:  $\tau$  – дотична поздовжня напруга на стінках труби;  $k_x$  – коефіцієнт пропорційності, що стосується перетину труби, який розглядається.

При такому припущенні рівнодійні сили взаємодії дорівнюватимуть

$$Q = \pm \pi D_3 k_x u(x, t) dx, \quad (10)$$

де  $D_3$  – зовнішній діаметр труб.

Поздовжня сила, яка виникає в трубі, дорівнюватиме  $\Delta = ES \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} dx$ , де  $E$  – модуль Юнга;  $S$  – площа перерізу труби.

Сила інерції для даного елемента труби записується як  $F_{in} = -m \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} dx$ .

Спроектувавши сили на вісь  $x$  і виконавши елементарні перетворення, отримаємо диференціальні рівняння коливань прихопленої частини труб бурильної колони

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \pm b^2 u = 0, \quad (11)$$

де  $b_u^2 = \frac{\pi D k_x}{m}$ ;  $m = \rho F$  – маса одиниці довжини труб.

Знак мінус за  $b_u^2$  зберігається в тому випадку, коли рух елемента труби спрямований від положення рівноваги, при зворотному русі береться – мінус. Для визначення максимальних значень вібронапружень і переміщень в трубах обмежимо розглядом третьої чверті періоду, а коефіцієнт  $b^2$  візьмемо зі знаком мінус.

Рівняння (11) не враховує розсіювання енергії в матеріалі труб.

Для кінцевого отримання рівняння коливань прихопленої частини труб представимо  $\tau$  в більш загальній формі  $\tau = \phi(u)$ .

Тоді дотична рівнодійних сил взаємодії між стінками труби і породу запишеться

$$Q = \phi(u)dx, \quad (12)$$

де  $\phi(u)$  – деяка функція, яка залежить від переміщення і фізико-механічних властивостей прихоплення – прилеглої зони контакту між трубою і породу.

В цьому випадку, більш узагальнене рівняння буде виглядати так:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \frac{E}{m(x)} - \frac{\partial}{\partial x} \left[ x \frac{\partial u}{\partial x} \right] + \frac{1}{m(x)} \phi(u) = 0. \quad (13)$$

Рівняння (13) являє собою загальне рівняння коливань прихопленої частини бурильної колон. Воно враховує зміну перетинів труб прихопленої частини компонування, істинний опір породи, а також розсіювання енергії в матеріалі труб.

Рівняння (13) можна спростити, якщо прийняти гіпотезу Фохта для врахування розсіювання енергії в матеріалі труб, сили взаємодії труби і породи пропорційними першому ступеню зміщення, а площу поперечного перетину прийняти постійною по довжині прихопленої ділянки труби, тоді (13) запишеться

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - a_\tau^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + 2n \frac{\partial u}{\partial t} \pm b^2 u = 0, \quad (14)$$

де  $a_\tau^2 = \frac{ES}{m}$ .

Таким чином, ми отримали відоме телеграфне рівняння. Тоді дослідження умов ліквідації прихоплення ударним способом для прихопленої частини колони зводиться до розв'язання лінійного диференціального рівняння в часткових похідних за відповідних початкових умов із врахуванням процесів, які виникають в граничних зонах між стінками труби і породу.

Для розв'язання рівняння (11) використаємо метод Фур'є [3]. При цьому розкладемо функцію  $u(x, t)$  за власними функціями

$$u(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} u_n(t) v_n(x), \text{ де } v_n(x) \text{ – власні функції}$$

поздовжніх коливань прихопленої частини колони нижче ударного пристрою, які визначають задовільнення закріплень на кінцях.

Отримане телеграфне рівняння дає можливість використати імпедансний метод, для подальших досліджень який застосовується в теорії

довгих електричних ліній [4]. При цьому використовуємо електромеханічну аналогію [5]. Необхідно відмітити, що при розповсюдженні струму по кабелю виникає магнітне поле, яке аналогічно протидії породи руху труб в прихопленій зоні, в деякій мірі протидії розповсюдженню струму по кабелю. Таким чином теорія прихопленої частини бурильної колони, в після ударний період, як довгого стрижня, ідентична теорії електричної лінії. Рівняння електричної лінії відповідно до рівняння (11) після елементарних перетворень запишеться

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + \frac{\partial u}{\partial t} + r_2 u_2, \quad (15)$$

де  $r_1 = RC - GL; r_2 = RG; C^2 = \frac{1}{LG}$ .

В електричній лінії протяжністю від  $x = 0$  до  $x = l$  будуть наступні постійні, віднесені до одиниці довжини:  $R$  – опір,  $L$  – індуктивність,  $C$  – ємність,  $G$  – провідність витікання НМ, всі величини стосуються одиниці довжини.

Для прихоплення труб, як стрижня, диференціальне рівняння запишеться

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + r_1 \frac{\partial u}{\partial t} + r_2 u, \quad (16)$$

де  $r_1 = RK + GM; r_2 = RG; C^2 = \frac{1}{MK}$ ;

$M$  – маса;  $K$  – піддатливість;  $R$  – опір втрат,  $G$  – провідність демпфування.

При складанні рівняння відрізка прихопленої колони виходячи з електромеханічної аналогії можна записати

$$u_2 - u_1 = \frac{\partial u}{\partial x} \delta x = -M \delta x \frac{\partial u}{\partial t} - R \delta x \cdot v. \quad (17)$$

При обчисленні стиснутого елемента стрижня можна нехтувати змінною сили із-за інерціальної реакції, і тоді

$$\frac{\partial u}{\partial x} = -k \frac{\partial u}{\partial t} - Gu, \quad (18)$$

де  $G$  – провідність демпфування.

У випадку періодичних зміни  $\partial / \partial t = j\omega$  і рівняння (17) та (18) приймають вигляд

$$-\frac{\partial \tilde{u}}{\partial x} = (R + j\omega M)v; \quad (19)$$

$$-\frac{\partial \tilde{v}}{\partial x} = \left( G + j\omega \frac{1}{(MK)^{-2}} \right). \quad (20)$$

Отже,

$$\frac{\partial \tilde{u}}{\partial x} = (R + j\omega M) \left( G + j\omega \frac{1}{(MK)^{-2}} \right) \tilde{u} = \quad (21)$$

$$j\omega M \cdot j\omega \frac{1}{(MK)^{-2}} \left( 1 - j \frac{R}{\omega M} \right) \left( 1 - j \frac{G}{\omega \frac{1}{(MK)^{-2}}} \right) \tilde{u}$$

або

$$\frac{\partial^2 \tilde{u}}{\partial x^2} = -k^2 \tilde{u}, \quad (22)$$

де

$$-k^2 = (R - j\omega M) \left( G + j\omega \frac{1}{(MK)^{-2}} \right) \quad (23)$$

і

$$k = \sqrt{-(R - j\omega M) \left( G + j\omega \frac{1}{(MK)^{-2}} \right)} = \sqrt{\omega^2 M \frac{1}{MK} \left( 1 - j \frac{1}{MK} \right) \left( 1 - j \frac{G}{\omega \frac{1}{MK}} \right)} = \sqrt{\omega^2 L \frac{1}{MK} \left( 1 - \frac{j\eta}{2} \right)} = k_0 \left( 1 - \frac{j\eta}{2} \right), \quad (24)$$

де  $k_0 = \frac{\omega}{1/MK}$ ;  $k = ES$  і  $\eta = \frac{R}{\omega L} + \frac{G}{\omega \frac{1}{MK}}$  –

квадрат малих величин.

При вилученні квадратного кореня необхідно брати знак плюс, оскільки тільки в цьому випадку, ми отримаємо хвилі амплітуди, яких зменшуються з віддалю. Загальним рівнянням хвильових рівнянь (15), (16) буде [5]

$$\tilde{\sigma} = \tilde{A} \cos \tilde{k}x + \tilde{B} \sin \tilde{k}x = \tilde{\sigma}_S \cos \tilde{k}x + \tilde{B} \sin \tilde{k}x; \quad (25)$$

$$\tilde{v} = \tilde{C} \cos \tilde{k}x + \tilde{D} \sin \tilde{k}x = \tilde{v}_S \cos \tilde{k}x + \tilde{D} \sin \tilde{k}x, \quad (26)$$

де  $\tilde{\sigma}_S$  і  $\tilde{v}_S$  – сила і швидкість на голові прихоплення при  $x = 0$ .

З рівняння (19) отримуємо співвідношення

$$-\tilde{u} \tilde{k} \sin \tilde{k}x + \tilde{B} \tilde{k} \cos \tilde{k}x = (R + j\omega M) (\tilde{i}_S \cos \tilde{k}x + \tilde{D} \sin \tilde{k}x). \quad (27)$$

Оскільки це співвідношення має виконуватись за всіх значень  $x$ , коефіцієнти при синусах і косинусах в правій і лівій частині мають співпадати:

$$\tilde{\sigma}_S = \tilde{D} \frac{R + j\omega M}{\tilde{k}} = j\tilde{Z}\tilde{D}; \quad (28)$$

$$\tilde{B} = -\tilde{v}_S \frac{R + j\omega M}{\tilde{k}} = j\tilde{v}_S \tilde{Z}, \quad (29)$$

де характеристичний імпеданс стрижня (прихопленої частини колони)

$$\tilde{Z}_C = j \frac{R + j\omega M}{\tilde{k}} = \sqrt{\frac{R + j\omega M}{G + j\omega \frac{1}{MK}}}. \quad (30)$$

У разі набуття колоною рухомості, зовнішнє “тертя” між стінками прихоплених труб і породою незначні, то характеристичний імпеданс прихоплених труб, які звільняються, має вигляд

$$\bar{Z}_C = \sqrt{M\sigma\lambda_E} \left[ 1 + j \frac{\eta_k}{2} \right] = M_C. \quad (31)$$

Тоді рішення може бути записане в такому вигляді:

$$\bar{\sigma} = \bar{\sigma}_S \cos \bar{k}x + j\tilde{v} \bar{Z}_C \sin \bar{k}x \quad (32)$$

та

$$\bar{v} = \tilde{v}_S \cos \tilde{k}x + \frac{\tilde{u}_0}{j\bar{Z}_C} \sin \bar{k}x. \quad (33)$$

Найбільш важлива величина – вхідний імпеданс  $Z_S$  стрижня (труб), замкнутих на імпеданс навантаження  $\bar{Z}_l$  (наприклад, прихоплення долота, амортизатор над долотом чи вибійного двигуна, який знаходиться нижче зони прихоплення):

$$\begin{aligned} \frac{\tilde{\sigma}_l}{\tilde{v}} = \bar{Z}_l &= \frac{\bar{v}_S \cos \bar{k}l - j\tilde{v}_S \sin \bar{k}l}{\bar{v}_S \cos \bar{k}l + (j\tilde{v}_S / \bar{Z}_C) \sin \bar{k}l} = \\ &= \frac{(\tilde{\sigma}_S / \tilde{v}_S) - j\bar{Z}_C \operatorname{tg} \bar{k}l}{1 + (\tilde{v}_S / j\tilde{v}_S) (1 / \bar{Z}_C) \operatorname{tg} \bar{k}l} = \\ &= \frac{\bar{Z}_C - j\bar{Z}_C \operatorname{tg} \bar{k}l}{1 - j(\bar{Z} / \bar{Z}_C) \operatorname{tg} \bar{k}l}. \end{aligned} \quad (34)$$

Це дає можливість використовувати імпедансний метод для розв’язання задач динаміки ліквідації прихоплень ударними пристроями.

### Література

- 1 Ветров А.К., Коломеец А.В. Аварии в разведочном бурении и способы борьбы с ними. – М.: Недра, 1969. – 178 с.
- 2 Быховский И.И. Основы теории вибрационной техники. – М.: Машиностроение, 1969. – 257 с.
- 3 Дёч Г. Руководство к практическому применению преобразования Лапласа. – М.: Изд. физ.-матем. Лит., 1960. – 207 с.
- 4 Римский-Корсаков А.В. Электроакустика. – М.: Связь, 1973. – 272 с.
- 5 Скучик Е. Простые и сложные колебательные системы. – М.: Мир, 1971. – 557 с.