

УДК 62-278

Ю. О. ЦИБРІЙ<sup>1</sup>, Г. Г. ГРАБОВСЬКИЙ<sup>2</sup>, П. Л. НОСКО<sup>1</sup><sup>1</sup>Національний авіаційний університет, Україна<sup>2</sup>Державна науково-виробнича корпорація «Київський інститут автоматики», Україна

## АНАЛІЗ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ МЕМБРАНИ ГІДРАВЛІЧНОГО МЕМБРАННОГО МЕХАНІЗМУ ПРИВОДУ ВИТЯГУВАННЯ З ЗЛИВКУ КРИСТАЛІЗАТОРА

*Проведено чисельне моделювання напружено-деформованого стану сталевий мембрани гідравлічного мембранного механізму. Отримані діапазон допустимих значень геометричних параметрів мембрани при заданому ресурсу напруження мембрани та залежність максимального напруження мембрани від її геометричних параметрів. Запропоновано раціональні геометричні параметри мембрани.*

**Ключові слова:** гідравлічний мембранний механізм, мембрана, напружено-деформований стан, геометричні параметри, ресурс роботи

**Вступ.** Сьогодні для виплавки високоякісних сплавів на основі тугоплавких та високореакційних металів, а особливо на основі титану, окрім класичного вакуумно-дугового переплаву [1] також використовують прогресивні методи спеціальної металургії - електронно-променевої та плазмовий переплави [2]. Такі методи у порівнянні з вакуумно-дуговим переплавом забезпечують отримання зливоків вищого ступеня очищення сплаву від нітридів, карбідів та інших шкідливих домішок, дають можливість активно впливати на час технологічного процесу та ін.[1; 2]. Однак вищезазначені методи мають недоліки, серед них – незадовільна якість поверхні отримуваних зливоків, наявність гофрів та каверн [3; 4], що утворюються в результаті сприйняття зливком додаткових сил тертя початку руху при витягуванні [5]. Для усунення цих дефектів, готовий зливок необхідно оброблювати спеціальним дорогим інструментом по обробці титану на спеціальному обладнанні, при цьому можлива втрата маси зливку до 10% [3].

З метою боротьби з дефектами, що виникають при безперервній розливці сталі, в роботі [6] пропонується подавати на кристалізатор додаткові коливання через важільний механізм за синусоїдним та несинусоїдними законами. Подібні методи боротьби з дефектами поверхні можуть бути використані і при виплавці сплавів методом електронно-променевої та плазмової плавки. Однак у випадку електронно-променевої плавки подача коливань на кристалізатор є важкою для реалізації, оскільки, такий різновид плавки відбувається в глибокому вакуумі, де об'єм плавильної камери обмежений, усі приводи механізмів повинні знаходитися поза камерою, а до всіх ущільнень ставляться підвищені вимоги. Тому ймовірно розміщення приводу коливання кристалізатора в плавильній камері значно збільшить її розміри, а надійно та якісно ущільнити увесь стіл хитання кристалізатора є складною та дорогою задачею.

Авторами запропоновано замість подачі коливань на кристалізатор подавати коливання на зливок через шток 6 (рис. 1) механізму витягування [7], при цьому гідравлічні мембранні механізми (ГММ), що використовуються в якості приводу подачі коливань, мають невеликий хід (до 3 мм), в них відсутні витоки, а також завдяки їх використанню разом з пропорційною гідравлікою та промисловим контролером можуть позиціонувати жорсткий центр, з'єднаний з мембраною з

точністю до 0,1 мм [8]. Також такі приводи мають невеликі габарити і можуть бути встановлені на штоку витягування зливку з кристалізатора (рис. 1) для подачі на нього додаткових коливань за необхідним законом.

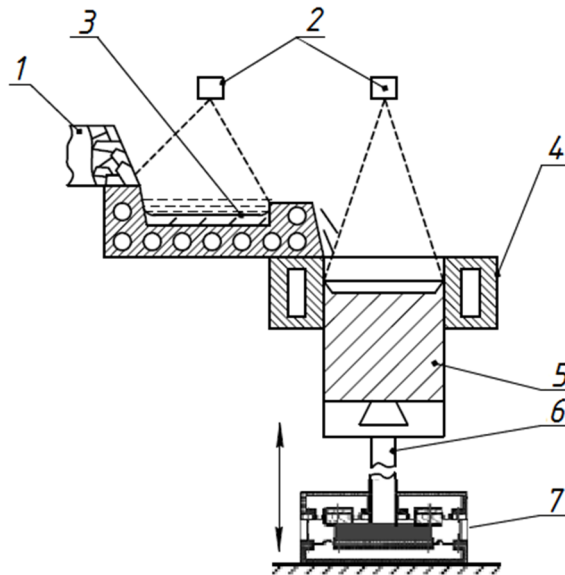


Рис. 1. Принципова схема електронно-променевої плавки: 1 – бункер з шихтою; 2 – електронно-променеві гармати; 3 – проміжна ємність; 4 – кристалізатор; 5 – зливоч; 6 – шток; 7 – гідравлічний мембранний механізм приводу витягування зливку з кристалізатора

Розроблена конструкція ГММ закріплюється на штоку і використовується в поєднанні з гвинтовою передачею (існуюча частина). Коливання подаються на зливоч через шток, затиснений між двома мембранними механізмами, які в свою чергу закріплені на конструкції із ще одним штоком [7]. Таким чином на зливоч постійно подаються коливання і відслідковується рівень розплаву в кристалізаторі. При збільшенні рівня розплаву в кристалізаторі вмикається електродвигун і через редуктор та гвинтову передачу витягує зливоч на фіксовану величину.

Однак, як свідчить досвід експлуатації, для мембранних механізмів найбільш підвразливою руйнуванню деталлю є мембрана, оскільки вона забезпечує робочий хід жорсткого центру ГММ і усуває перекоси навантаження, а також постійно перебуває в деформованому стані та під тиском робочої рідини гідроприводу. Тому вибір раціональних геометричних параметрів мембрани потребує подальшого дослідження її напружено-деформованого стану (НДС).

**Постановка задачі.** Метою даного дослідження є проведення аналізу НДС мембрани та визначення її раціональних геометричних параметрів, які забезпечать заданий ресурс роботи ГММ при необхідних амплітуді коливань та навантаженні.

Для розрахунку НДС одногофрової мембрани була запропонована система лінійних неоднорідних диференціальних рівнянь [8]. Однак розв'язок такої системи рівнянь неможливо отримати у вигляді елементарних функцій. В розглянутій роботі проводиться тільки спрощений статичний розрахунок для точки затиснення мембрани між корпусом та кришкою ГММ, оскільки приймається, що вона сприймає максимальні напруження.

Розрахунок НДС мембран проводився вирішенням плоскої симетричної задачі в пружній постановці з використанням чисельних методів та САЕ програм

ANSYS та COMSOL Multiphysics [9], які забезпечують необхідну точність розрахунків в кожній точці досліджуваного об'єкту, а також дають можливість проведення циклу випробувань об'єктів моделювання зі зміною вхідних геометричних та силових параметрів. До геометричних параметрів мембрани, які впливають на НДС, належать (рис. 2):  $R$  – радіус дуги мембрани ( $R = 0.02 \dots 0.04$  м);  $r$  – радіус спряження дуги мембрани з площиною мембрани ( $r = 0.002 \dots 0.004$  м);  $t$  – товщина мембрани ( $t = 0.0001 \dots 0.001$  м);  $D$  – відстань від осі мембрани до центра дуги мембрани ( $D = 0.09 \dots 0.15$  м);  $A$  – амплітуда коливання мембрани, при моделюванні приймалось  $A = 1$  мм.

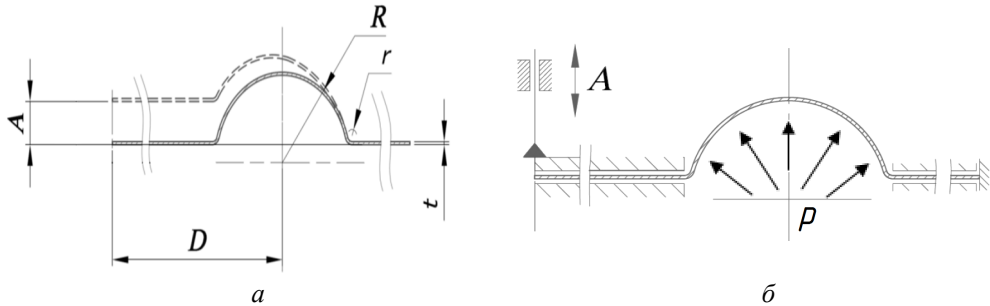


Рис. 2. Мембрана ГММ: *а* – геометрична принципова схема; *б* – кінематична схема.

Кінематика руху мембрани наступна (рис. 2, б): периферія нерухомо закріплена між корпусом та кришкою, а центральна частина закріплена між жорстким центром та плунжером і може переміщуватися тільки в вертикальному напрямку.

Мембрана складається з декількох спресованих тонших мембран [8]. Матеріал мембран – Сталь 12Х18Н10Т ГОСТ 5949-75, яка має високу межу текучості, ударну в'язкість та пластичність у порівнянні з феритними сталями. Підвищена пластичність матеріалу забезпечує високий ресурс роботи ГММ.

В роботі [10] проводилися дослідження матеріалу мембрани на втомну міцність при симетричному циклі навантаження в умовах чистого згину. Для задачі, яка розглядається при ресурсі роботи мембрани  $10^6$  циклів допустиме напруження складає  $[\sigma_{-1}] = 340$  МПа.

При чисельному розрахунку мембрани приймалися наступні припущення: деформація в мембрані відбувається згідно кінематичної схеми; кожна з чотирьох мембран пакету сприймає  $1/4$  загального тиску рідини; напруження мембрани залежить від значення амплітуди по модулю; тертя між мембранами відсутнє.

**Результати чисельного моделювання НДС мембрани.** Проведено моделювання залежності напруження від товщини мембрани при різних тисках та радіусах дуги та спряження дуги з площиною мембрани. Як приклад на рис. 3, *а* представлено графік залежності максимального напруження від товщини при різних тисках для  $R = 0.2$  м та  $r = 0.002$  м. Аналіз отриманих результатів показав, що залежність максимального напруження від товщини при різних тисках  $\sigma = f(t, p = \text{var})$  можна розбити на два інтервали: для першого інтервалу  $t = 0.0001 \dots 0.0003$  м – тиск суттєво впливає на максимальне напруження в мембрані; в другому інтервалі  $t = 0.0003 \dots 0.001$  м – криві практично збігаються. Враховуючі, що практичне значення має другий діапазон (наявність сортаменту відповідної товщини), то для подальших чисельних розрахунків приймається,

що тиск несуттєво впливає на максимальне напруження в мембрані в діапазоні  $t = 0.0003 \dots 0.001$  м; тиск приймається  $p_{ном} = 0.5$  МПа.

В результаті моделювання встановлено, що зміна радіуса спряження дуги з площиною мембрани  $r$  впливає на максимальне напруження несуттєво і для подальших моделювань приймається, що  $r = 0.002$  м (рис. 3, б).

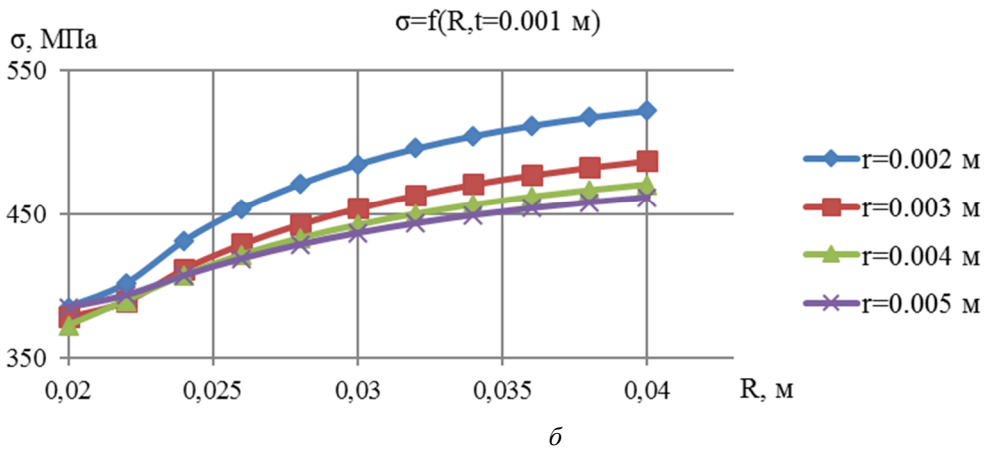
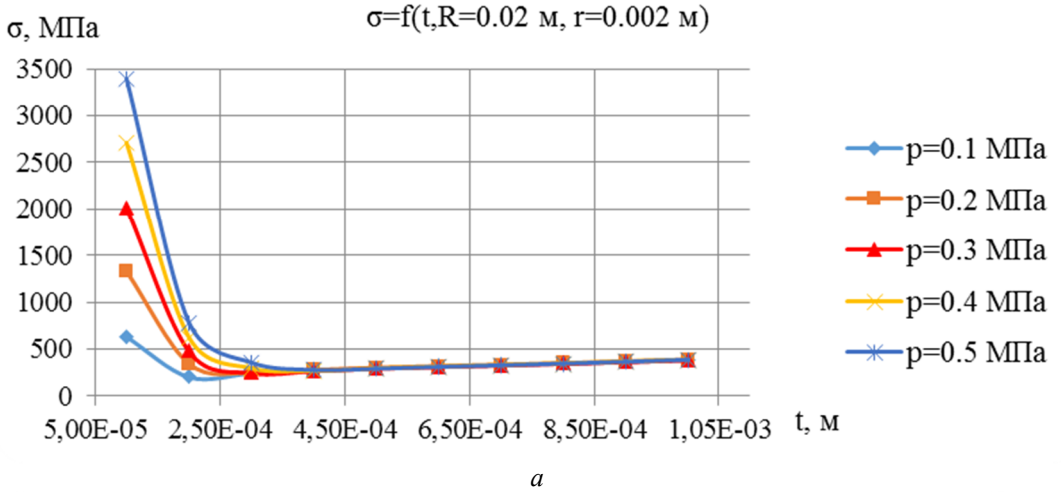


Рис. 3. Залежність максимального напруження від геометричних параметрів:  $a$  – від товщини мембрани при різних тисках;  $b$  – від радіуса дуги мембрани для різних радіусів спряження дуги

Проведено моделювання НДС мембрани ГММ зі зміною: товщини мембрани  $t$ ; відстані від осі мембрани до центра дуги мембрани  $D$ ; радіуса дуги мембрани  $R$ .

Отримані максимальні значення напруження мембрани були порівнянні з допустимим  $[\sigma_{-1}]$  і складено діапазон геометричних параметрів, які задовольняють вимоги по довговічності мембран при  $A = 0.001$  м (рис. 4).

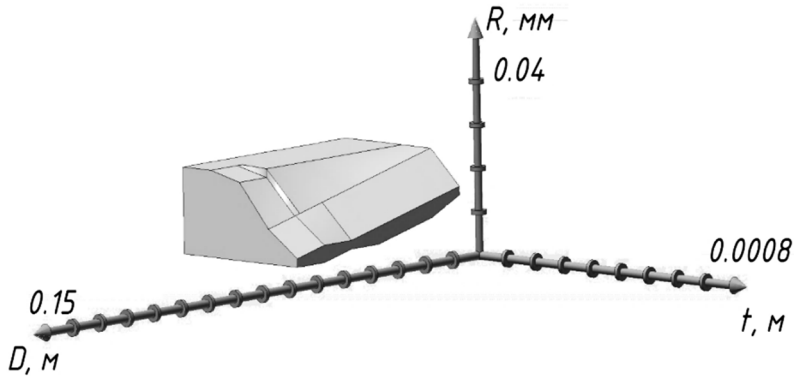


Рис. 4. Тіло з діапазоном допустимих значення геометричних параметрів мембрани

Аналіз отриманих залежностей, із врахуванням сортаменту листового прокату сталі 12ХН1810Т та габаритних і приєднувальних розмірів в області кріплення штоку дозволив встановити раціональні геометричні параметри мембрани для ГММ для  $A = 0.001$  м, а саме:  $t = 0.0005$  м,  $R = 0.025$  м,  $D = 0.13$  м.

Крім цього, діапазон допустимих значень геометричних параметрів мембрани апроксимовано з використанням методу найменших квадратів [11]. Отримана залежність після апроксимації має вигляд:

$$\sigma = 190 \text{ МПа} + 89300 \frac{\text{МПа}}{\text{м}} \cdot t + 1240 \frac{\text{МПа}}{\text{м}} \cdot R + 181 \frac{\text{МПа}}{\text{м}} \cdot D.$$

Область варіації геометричних параметрів  $t = 0.0003 \dots 0.0008$  м,  $R = 0.02 \dots 0.04$ ,  $D = 0.09 \dots 0.15$  м, а похибка апроксимації складає порядку 10%.

**Висновки.** Проведене чисельне моделювання НДС мембрани ГММ при його роботі в якості приводу витягування зливку з кристалізатора з подачею на нього додаткових коливань за заданим законом.

За результатами моделювання встановлено діапазон геометричних параметрів, при яких максимальне напруження менше допустимого, що відповідає заданій кількості спрацювань ГММ. З використання методу найменш квадратів отримана залежність максимального напруження мембрани від її геометричних параметрів.

Отримані залежності НДС мембрани ГММ та запропоновані раціональні геометричні параметри в межах її заданого ресурсу роботи.

#### Список літератури

1. Электронно-лучевая плавка титана / [Патон Б.Е., Тригуб Н.П., Ахонин С.В., Жук Г.В.]. – К.: Наукова думка, 2006. – 248 с.
2. Минакова А.В. О структуре производства титановой продукции: мировой опыт и реализация в Украине / Минакова А.В., Минаков В.Н., Минаков Н.В., Трефилов В.И. –К: 1998, – (Препр./НАН Украины. Ин-т пробл. материаловедения им. И.Н. Францевича, 98-4), – 22 с.
3. Грабовський Г.Г. Механотронна система керування плавкою титану. / Г.Г. Грабовський, Ю.О. Цибрій // Промислова гідравліка та пневматика. – 2012. – № 1 (35). – С.101–105.
4. Петров А.К. Получение слитков электроннолучевого переплава с качественной поверхностью / Петров А.К., Мовчан Б.А., Антропов О.Ф., Сапко А.И. // Проблемы специальной металлургии. (Сборник статей) – К., Наукова думка, 1975. – С. 66. – 69.

5. Римен. В.Х. Усилия вытягивания крупных слитков из кристаллизатора при электроннолучевом переплаве / Римен. В.Х., Галентовский Г.Г. // Специальная электрометаллургия – 1982. – № 49. – С.73–76.
6. Смирнов А. Н. Непрерывная разливка стали / А. Н. Смирнов, С. В. Куберский, Е. В. Штепан. – Донецк: ДонНТУ, 2011. – 482 с.
7. Патент № 91889 України. МПК F16H 43/00. Гідравлічний мембранний виконавчий механізм двосторонньої дії / Грабовський Г.Г., Цибрій Ю.О.; заявники та правласники Грабовський Г.Г., Цибрій Ю.О. – № 2013 13334, заявл. 15.11.2013, опубл. 25.07.2014, бюл. Бюл.№ 14, 2014 р.
8. Беляев Ю. Б. Методы и устройства силовой настройки автоматизированных систем управления прокатных станов: теория и практика [Текст] : Дис... д-ра техн. наук: 05.13.08 / Беляев Юрий Борисович ; Научно-производственная корпорация "Киевский ин-т автоматики", Государственное НПП "Автоматизированные информационные системы и технологии". - К., 1997. - 267 с.
9. Берендеев Н. Н. Применение системы ANSYS к оценке усталостной долговечности / Н. Н. Берендеев. – Н. Новгород: Изд-во НГУ, 2006. – 84 с.
10. Бубнов В. А. Механизм упрочнения аустенитных сталей при пластической деформации / В. А. Бубнов, С. Г. Костенко. // Известия вузов. МАШИНОСТРОЕНИЕ. – 2008. – №6. – С. 63–70.
11. Лоусон Ч. Численное решение задач метода наименьших квадратов / Ч. Лоусон, Р. Хенсон. – М.: Наука, под редакцией Тыртышников Е.Е., 1986. – 232 с.

Стаття надійшла до редакції 28.08.2017.

**Цибрій Юрій Олександрович** – зав. лаб. кафедри машинознавства Національного авіаційного університету, Київ, Україна.

**Грабовський Георгій Геннадійович** – д.т.н., професор, заступник директора Державної науково-виробничої корпорації «Київський інститут автоматики» з наукової роботи, Київ, Україна.

**Носко Павло Леонідович** – д.т.н., професор, професор кафедри машинознавства Національного авіаційного університету, Київ, Україна.

*I. O. TSIBRIY, H. H. GRABOVSKIY, P. L. NOSKO*

### **ANALYSIS OF STRESS-STRAIN STATE OF HYDRAULIC MEMBRANE MECHANISM OF INGOT'S PULLING-OUT DRIVE FROM CRYSTALLIZER**

A numerical simulation of the stress-strain state of the steel membrane of the hydraulic membrane mechanism is made. The range of values of membrane's geometric parameters at the given membrane's working resource and the dependence of the maximum membrane's stress on its geometric parameters are obtained. The rational geometric parameters of the membrane are proposed.

**Key words:** hydraulic membrane mechanism, membrane, stress- strain state, geometric parameters, work life

#### **References**

1. Elektronno-luchevaya plavka tytana / [Paton B.E., Tryhub N.P., Akhonyan S.V., Zhuk H.V.]. – K.: Naukova dumka, 2006. – 248 s.
2. Mynakova A.B. O strukture proyzvodstva tytanovoy produktsyy: myrovoy opit y realizatsyya v Ukrainy / Mynakova A.B., Mynakov V.N., Mynakov N.V., Trefylov V.Y. –K: 1998, – (Prepr./NAN Ukrainy. Yn-t probl. materyalovedenyya ym. Y.N. Frantsevycha, 98–4), – 22 s.
3. Hrabovskyy H.H. Mekhanotronna systema keruvannya plavkoyu tytanu. / H.H. Hrabovskyy, Yu.O. Tsybriy // Promyslova hidravlika ta pnevmatyka. – 2012. – # 1 (35). – S.101–105.
4. Petrov A.K. Poluchenye slytkov elektronoluchevoho pereplava s kachestvennoy poverkhnost'yu/ Petrov A.K., Movchan B.A., Antropov O.F., Sapko A.Y. // Problemi spetsyal'noy metallurhyy. (Sbornyk statey) – K., Naukova dumka, 1975. – S. 66. – 69.
5. Rymen. V.Kh. Uslyyya vityahyvannya krupnykh slytkov yz krystalizatora pry elektronoluchevom pereplave / Rymen. V.Kh., Halentovskyy H.H. // Spetsyal'naya elektrometalurhyya – 1982. – # 49. – S.73–76.
6. Smyrnov A. N. Neprerivnaya razlyvka staly / A. N. Smyrnov, S. V. Kubersky, E. V. Shtepan. – Donetsk: DonNTU, 2011. – 482 s.
7. Patent # 91889 Ukrainy. MPK F16H 43/00. Hidravlichnyy membranny vykonavchyy mekhanizm dvostoronn'oyi diyi / Hrabovskyy H.H., Tsybriy Yu.O.; zayavnyky ta pravovlasnyky Hrabovskyy H.H., Tsybriy Yu.O. – # 2013 13334, zayavl. 15.11.2013, opubl. 25.07.2014, byul. Byul.# 14, 2014 r.
8. Belyaev Yu. B. Metodi y ustroystva sylovoy nastroyky avtomatyzirovannikh system upravlenyya prokatnykh stanov: teoryya y praktyka [Tekst] : Dys... d-ra tekhn. nauk: 05.13.08 / Belyaev Yuryy Borysovykh ; Nauchno-proyzvodstvennaya korporatsyya "Kyevs'ky yn-t avtomatyky", Hosudarstvennoe NPP "Avtomatyzirovannye ynformatsyonnye systemi y tekhnolohyy". – K., 1997. – 267 s.
9. Berendeev N. N. Prymenenyye systemi ANSYS k otsenke ustalostnoy dolhovechnosty / N. N. Berendeev. – N. Novhorod: Yzd-vo NHU, 2006. – 84 s.
10. Bubnov V. A. Mekhanyzm uprochnenyya austenitnykh staley pry plastycheskoy deformatsyy / V. A. Bubnov, S. H. Kostenko. // Yzvestyya vuzov. MASHYNOSTROENIYE. – 2008. – #6. – S. 63–70.
11. Louson Ch. Chylennoe reshenye zadach metoda naymen'shykh kvadratov / Ch. Louson, R. Khenson. – M.: Nauka, pod redaktsyye Tirtishnykova E.E., 1986. – 232 s.