

УДК 631.3

**Т. Рибак, докт. техн. наук; А. Бабій, канд. техн. наук;
П. Попович, канд. техн. наук**

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

ПРОГНОЗУВАННЯ РЕСУРСУ РОБОТИ МОБІЛЬНИХ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ МАШИН НА ОСНОВІ ТРИЄДИНОЇ МОДЕЛІ ОПТИМАЛЬНОГО КОНСТРУЮВАННЯ

Резюме. Запропоновано триєдину модель пошукового конструювання сільськогосподарських машин, яка передбачає створення нової і якісної техніки на трьох етапах. Наведено структуру кожного етапу та основні напрями їх реалізації. Такий підхід дозволить конструювати сільськогосподарські машини з прогнозованим ресурсом роботи й відповідно до ринкових вимог при жорсткій конкурентній боротьбі, забезпечуючи високі економічні ефекти нових розробок.

Ключові слова: пошукове конструювання, ресурс роботи, динамічне навантаження, деформівний стан, енергія деформації, критерії оцінювання, стержневі системи.

T. Rybak, A. Babiy, P. Popovich

PROGNOSTICATION OF RESOURCE OF WORK OF MOBILE AGRICULTURAL MACHINES IS IN BASIS OF TRIUNE MODEL OF OPTIMUM CONSTRUCTING

The summary. The triune model of the searching constructing of agricultural machines, which foresees creation of new and high-quality technique on three stages is offered in this work. The structure of every stage and basic directions of their realization is resulted. Such approach will allow to construct agricultural machines with the forecast resource of work and in accordance with market requirements at hard competitive activity, providing the high economic effects of new developments.

Key words: constructing, resource of work, dynamic loading, deformed state, energy of deformation, criteria of estimation, cored systems.

Вступ. Ринок сільськогосподарського виробництва вимагає ефективних і енергоощадних машин. Даної мети не можливо досягти без сучасного рівня машинобудування, яке має бути, перш за все, повною мірою забезпеченим принципами і підходами раціонального проектування.

Постановка проблеми. За виконанням технологічного процесу сільськогосподарські машини поділяють на три групи – стаціонарні, пересувні та мобільні. До стаціонарної групи відносяться машини, які на постійній основі встановлюються, наприклад, на токах, пунктах переробки урожаю чи підготовки насіння. Їх характерною особливістю є те, що матеріал для виконання технологічного процесу доправляється іншими технічними засобами. До таких машин можна віднести: устаткування заводів дражування насіння, транспортери складських приміщень зерна, сушарки, сортувальні машини тощо. Пересувні машини характеризуються наявністю ходової частини, яка приводить машину в рух у межах виконання технологічної операції, а до місця її виконання агрегуються іншими технічними засобами. Сюди відносимо: сімейство протруювачів насінних зернових культур (включаючи пасленові) і бульб картоплі, приготівлювачі різного виду робочих розчинів і т.д. Але машини мобільної групи сільськогосподарської техніки представляють найбільший інтерес, оскільки їх технологічний процес протікає під час руху. До даної групи відносяться:

машини для основного та поверхневого обробітку ґрунту; машини для внесення добрив; посівні та посадкові; машини для догляду за рослинами (штангові, вентиляторні обприскувачі та обпилювачі для хімічного захисту); збиральні комбайни та інші – всього понад 500 найменувань різного призначення й агрегатування, включаючи самохідні машини та знаряддя [1].

За характером збурення і наявністю реальних динамічних навантажень мобільна сільськогосподарська техніка, яка є наймасовішою групою, вирізняється складністю описання існуючих процесів, а відтак і точністю визначення фактичних значень динамічних показників, які є вихідними даними для розрахунків. Тому зосередимо увагу на даних проблемах. Стаціонарні та пересувні технічні засоби вважатимемо частковим випадком при прогнозуванні ресурсу їх роботи в контексті триєдиної моделі пошукового конструювання сільськогосподарських машин.

Аналіз останніх досліджень. Питання, що стосуються раціонального конструювання сільськогосподарських машин, розглядаються в багатьох працях, зокрема в [2–3]. Проте в них, як правило, закладені ще базові підходи «союзного» машинобудування, що не відповідає реальним потребам сучасності. Крім того, тут спостерігаються низькі економічні ефекти розробок, що є дуже суттєвим на даний час.

Мета дослідження. Розробити сучасну модель пошукового конструювання мобільних сільськогосподарських машин із прогнозованим ресурсом роботи, реалізація якої повною мірою задовольняла б вимоги ринку сільськогосподарського машинобудування.

Результати досліджень. У стратегічному плані концепція повинна бути сформульована таким чином: „Якісна і високотехнологічна сільськогосподарська машина може бути створена тільки при реалізації всіх етапів триєдиної моделі пошукового конструювання [4]: перший етап – зародження і розвиток ідеї розробки (вдосконалення) з відтворенням її в аналітичній моделі, яку можна реалізувати на ПК; другий етап – дослідження реальних динамічних процесів на дослідному зразку в натурних або імітаційних умовах експлуатації з виробленням критеріїв оцінювання конструктивних структур для оптимізування параметрів розробки та прогнозування ресурсу роботи; третій етап – автоматизована розробка технічної документації для впровадження у виробництво машини з наступною науково-консультативною підтримкою кадрів, які її експлуатують».

Дана концепція набуває певного ефекту при вирішенні на належному рівні таких аналітично-пошукових і експериментально-дослідницьких проблем:

1. Розвиток нових і систематизація існуючих аналітичних напрацювань з позиції розгляду ресурсу роботи конструктивних структур, виходячи з енергетичного балансу структури (1-го закону термодинаміки) з урахуванням стану матеріалу, його дефектності й усіх фізико-хімічних факторів, які діють на нього під час експлуатації машини. Вирішення завдань в динамічній постановці, враховуючи енергію деформації від депланації елементів конструкцій відкритого і замкненого профілів. Комплексний підхід до розв'язку нелінійних задач при збуренні динамічних процесів залежно від характеру ґрунтів, жорсткості підвіски сільськогосподарської техніки, динаміки руху робочих рідин в ємкостях, трубопроводах, ширини розгортки, наприклад, штангових обприскувачів, їх стабілізації при виконанні технологічних процесів тощо.

2. Визначення реальної динаміки навантаженості розгляданого об'єкта шляхом проведення ґрунтовних експериментальних досліджень у натурних умовах експлуатації машин на найхарактерніших рельєфах і кліматичних зонах, з вибором особливостей оброблюваних площ, що є найбільш трудомісткою, дороговартісною й енергонасиченою експериментально-дослідницькою проблемою. Наступною процедурою є статистичне опрацювання і систематизація отриманого цифрового фактажу за трикомпонентними динамічними характеристиками.

3. Створення відправної бази, тобто вироблення критеріїв оцінювання міцності, або як ще прийнято називати – “життєздатності” конструкцій. Зарубіжні фірми США, Англії, Італії, Франції, Німеччини з проектування і випуску сільськогосподарської техніки давно оцінюють довговічність і прогнозують ресурс роботи конструкцій при мало- і багатоциклового втомному руйнуванні з позицій циклічної тривкості конструкцій, виходячи з факторів їх дефектності, зокрема, зварних з’єднань їх елементів.

4. Видача оптимізованих параметрів конструкцій (відповідно ефективності вирішення проблеми, пункти 1, 2, 3) за геометрією поперечних перетинів їх елементів і побудовою принципів схем, з прогнозованим ресурсом роботи в цілому на графопобудову або верстати з ЧПК; формування (за необхідності) альбому робочих креслень у цілому машин, конструкції, деталі тощо.

Експериментально-аналітичне прогнозування надійності та ресурсу роботи конструкцій у процесі проектування машин, відповідно до наведеного, вимагає проведення системи цільових досліджень. При цьому розв’язуються дві основні задачі: створення моделі напружено-деформівного стану конструкції, який відповідає життєвому циклу машини; прогноз надійності конструкції за її напружено-деформівним станом. Ефективність розв’язання цих задач визначається об’єктом і достовірністю експериментальних даних, тому враховуючи, що дослідження напружено-деформівного стану і навантажень здійснюються, як правило, одночасно, необхідно дотримуватися загальних вимог до об’єкта дослідження й умов його експлуатації, тобто до створення необхідної моделі об’єкта.

Основою для створення статистичних моделей напруженого і деформівного стану конструкцій є натурні й напівнатурні експерименти на зразках, переважно взятих з реальних елементів машин. Основні вимоги до методики проведення напівнатурних досліджень включають обґрунтований і правильний вибір схеми навантаження та режиму досліджень. Вони повинні забезпечити відтворення характеру і виду руйнувань типових для конкретного елемента конструкції, що відповідають експлуатаційним руйнуванням. При цьому не завжди відтворюють повністю весь експлуатаційний характер навантаження, оскільки об’єкт, що досліджується, завжди може бути аналогічно зруйнований і без повного відтворення експлуатаційної навантаженості, тобто при імітації його навантаженості. Це дозволяє набагато простіше здійснювати вибір схеми навантаження, ширше використовувати універсальне дослідне обладнання. Підтвердженням цьому є побудова емпіричних автомоделей подібності.

При виборі параметрів режиму циклічного навантаження натурних деталей або елементів конструкцій необхідно дотримуватися відповідних принципів та враховувати деякі особливості:

- експлуатаційний характер руйнування при лабораторних дослідженнях може бути виявлений при відповідному виборі схеми навантаження, причому важливе значення має режим навантаження за величиною та частотою їх прикладання; зміна навантаженості призводить до зміни механізму руйнування;

- чим вище значення перевантаження відносно границі витривалості матеріалу, тим менший ефективний коефіцієнт концентрації напружень, що, в свою чергу, може дати помилкову уяву про фактичну дію того чи іншого концентратора напружень у випадку роботи деталі протягом тривалого часу;

- руйнування від корозійності при підвищенні частоти досліджень і рівня діючих зусиль зростає разом зі збільшенням бази циклічної навантаженості.

Завдяки напівнатурним дослідженням маємо можливість з максимальною вірогідністю й точністю визначити фактичну міцність і встановити ресурс критичних елементів основних несучих конструкцій. Це зумовлено тим, що натурні вузли (деталі) у більшості випадків відрізняються незначно від малогабаритних зразків, виготовлених

чи безпосередньо вирізаних із тих же профілів; інфлюєнт розподілу, а також напрям дії сил залишаються без змін. Не змінюється і градієнт механічних властивостей в перетині у зв'язку з такою технологією виготовлення зразків [5].

Аналогічно, як і в натурних конструкціях, витривалість вирізаних із них (чи виготовлених) малогабаритних зразків значною мірою залежить від сумарної (одночасної) дії таких факторів: напруженого стану, який викликаний умовами навантаження; нерівномірністю розподілу і концентрації напружень; впливу масштабного фактора; стану поверхневого шару і дією залишкових напружень; частоти навантаження і т.п.

Для оцінювання характеру напруженого стану елементів конструкції і визначення шляхів пошуку оптимальних параметрів їх геометрії й матеріалу важливе значення має теоретичний підхід до визначення силових факторів у перерізі елемента за повним напруженим станом. При розробленні теоретичних засад, особливо мобільних сільськогосподарських машин, досить ефективним є метод, основою якого є принцип мінімуму потенціальної енергії деформації [5, 6]. Особливий ефект отримано при модифікації цього методу з урахуванням лише енергії деформації від депланації

$$U_{\omega} = \sum_i \int \frac{B_{\omega}^2 ds}{2EI_{\omega}} \quad \text{при системі рівнянь} \quad \frac{\partial U_{\omega}}{\partial B_{\omega_i}} = 0, \quad (1)$$

де B_{ω} – згинально-крутний бімомент, $H \cdot M^2$;

I_{ω} – секторіальний момент інерції, M^6 ;

E – модуль пружності першого роду, Па.

Розроблення на цій основі комбінованого методу, що поєднує в собі варіаційний принцип Лагранжа, узагальнений принцип додаткової енергії Холінгена-Рейснера, метод кінцевих елементів, теорему Кастиліано, теорему про найменшу роботу, правило Лейбніца з диференціювання підінтегральних функцій можна використовувати для статичного і динамічного розрахунку. Розглянутий варіаційний принцип розповсюджується на динамічні задачі, враховуючи сили інерції.

У зв'язку з доступністю модифікованого методу мінімуму потенціальної енергії формування виразів підінтегральних функцій, якими описуються технічні, технологічні, механічні та інші процеси і явища, традиційністю визначення означених інтегралів, вдалося розв'язати цілий клас інженерних задач у динамічній постановці для плоских і просторових конструктивних структур. Тут можна виділити: розрахунок коливань тонкостінних стержневих систем; розрахунок транспортерів бурякозбиральних та інших с/г машин; розрахунок функціонально-несучих систем обприскувачів.

При реалізації триєдиної моделі пошукового конструювання особливу увагу приділено машинам для хімічного захисту рослин, зокрема обприскувачам. Для реалізації цієї моделі на першому етапі серед інших підходів розроблено ефективну математичну модель контактної взаємодії бандажів, опор у вигляді ложементів, робочої рідини з урахуванням дії динамічних сил і додаткового тиску з обичайкою бака обприскувача, що ґрунтується на основі теорії пологих оболонок типу Тимошенка та побудові числових розв'язків при послідовнісному підході до узагальнених розв'язків крайових задач теорії оболонок методом Фур'є [7].

Отримано кінцеві залежності для визначення змінної товщини (жорсткості) опор при забезпеченні оптимальних умов контакту з обичайкою бака обприскувача.

Загальною особливістю описаних аналітичних методик є те, що їх теоретична частина приведена до такого вигляду, в якому вони легко реалізуються на ПК у певному пакеті прикладних програм. А це означає, що вже конструктори середньої

ланки можуть проводити аналітичні дослідження, моделюючи віртуальні вузли сільськогосподарських машин. Інакше кажучи, підставляючи вихідні дані в розроблені моделі, отримують кінцевий результат у вигляді напружень, переміщень тощо. Вся проблема зводиться до підстановки реальних (правдивих) вихідних даних, які аналітично описуються досить складно, вимагають ряд припущень і спрощень, не враховують випадкових процесів або враховують із великим запасом, через що і кінцевий результат не є точним. Тобто тут слід розуміти, що навіть при використанні найточніших теорій в поєднанні з неточними вихідними даними, результат прямо буде залежати від останніх.

Тому другий етап при реалізації пропонованої триєдиної моделі пошукового конструювання сільськогосподарських машин є не менш важливим, оскільки він передбачає знаходження відправної бази до розрахунку будь-якої конструкції.

Звичайно, що реальні вихідні навантаження на розглядувані вузли чи деталі машини знаходяться в ході проведення експериментальних досліджень. Крім правильного планування експерименту, потрібно ще використати технічні засоби, які його результати зафіксують. Така вимірювальна система (рис. 1) розроблена і використовується на кафедрі технічної механіки і сільськогосподарського машинобудування Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя.

Універсальна вимірювальна система призначена для виконання комплексних досліджень динаміки сільськогосподарських машин, вимірювання експлуатаційних параметрів і енергетичного оцінювання сільськогосподарської техніки при її випробуваннях.

Склад системи: вимірювальний блок; набір спеціальних динамометрів для реєстрації трикомпонентних динамічних характеристик в реальних умовах експлуатації, датчики кутових швидкостей і віброприскорень, динамометричні тяги триточкової тракторної навіски, тензорезистори, пристрої для енергетичного оцінювання машин; програмне забезпечення.

Універсальна реєструюча система працює в автономному режимі при реєстрації інформації на flash-диск, у системі із зовнішнім комп'ютером при зв'язку через LPT-порт.

Основні технічні характеристики універсальної реєструючої системи:

- загальне число вимірювальних каналів – 8;
- використання каналів комбіноване;



а)



б)

Рисунок 1. Принципова схема (а) та загальний вигляд блока (б) універсальної вимірюваної (реєструючої) системи

- частота дискретизації на канал – 1-2000 Гц;
- час реєстрації інформації в автоматичному режимі при максимальній частоті дискретизації – 52 хв.

Тестування системи в лабораторних умовах представлено на рис. 2а, в натурних умовах – на рис. 2б.



а)

б)

Рисунок 2. Тестування системи: а – в лабораторних; б – в натурних умовах

Комплексні дослідження можуть проводитися для зернозбиральних комбайнів, бурякозбиральних комплексів, тракторів, культиваторів, сівалок, плугів, машин для хімічного захисту у рослинництві та іншої мобільної і стаціонарної сільськогосподарської техніки, а також для автомобільного та залізничного транспорту при постановці на виробництво нової чи удосконаленні або модернізації існуючої техніки з видачею енергетичних характеристик машин і рекомендацій з прогнозування їх довговічності та ресурсу роботи у відповідності з сучасними вимогами до висновків державних випробувальних станцій.

Критеріальне оцінювання міцності та прогнозування ресурсу роботи металоконструкцій сільськогосподарських машин складається з теоретичної та

експериментальної частин [6, 8]. Складність вироблення критеріїв оцінювання міцності й прогнозування ресурсу роботи полягає, перш за все, у різнопрофільному наборі складових елементів цих конструкцій та специфіки їх з'єднань між собою. Оптимізувати такі конструкції складно через відсутність фактичних характеристик їх циклічної дефектостійкості зі структурною зміною матеріалу в біляшовній зоні відповідно до конкретної технології виготовлення, особливо складних зварних стикових з'єднань, а також геометрії поперечних перетинів тонкостінних елементів, відкритого та замкненого профілів.

Реалізація методики вироблення критеріїв оцінювання міцності й прогнозування ресурсу роботи конструкцій умовно проводиться у такій послідовності:

- дослідження кінетики розвитку дефектності натурних елементів конструкцій, наприклад, лонжеронів рам;
- отримання аналітичних залежностей для визначення коефіцієнтів інтенсивності напружень (КІН), у даному випадку відкритих або замкнених тонкостінних профілів [5];
- визначення характеристик дефектності матеріалу профілів та їх з'єднань;
- побудова діаграми руйнування натурних профілів, наприклад, лонжеронів рам із концентраторами, і гладких;
- отримання відповідної залежності для прогнозування довговічності з урахуванням специфіки конструкцій;
- отримання теоретичної залежності визначення КІН тонкостінних відкритих і замкнених профілів елементів конструкцій з урахуванням залишкових напружень від додаткових силових факторів;
- побудова емпіричної автомоделі подібності.

В даній постановці задачі КІН для реальних конструкцій (наприклад, відкритого профілю типу швелера) з дефектністю визначається

$$K_1 = \frac{M}{I} \cdot (H + 2 \cdot b)^{\frac{3}{2}} \cdot F(\varepsilon), \quad (2)$$

де M – згинальний момент у перетині як функція від зовнішніх навантажень;

I – момент інерції поперечного перетину;

H, b – відповідно висота стінки і ширина полиці швелера;

$F(\varepsilon)$ – функція поправки при $\varepsilon = \frac{l}{H + 2 \cdot b}$;

l – довжина (глибина) дефекту.

Для замкненого прямокутного профілю з наскрізним кутовим дефектом КІН визначається

$$\begin{cases} K_{I(1)} = \sigma_{\omega} \sqrt{a \cdot \varepsilon_1} \cdot F_1^{(B_{\omega})}(\varepsilon_1), \\ K_{I(2)} = \sigma_{\omega} \sqrt{b \cdot \varepsilon_2} \cdot F_2^{(B_{\omega})}(\varepsilon_2); \end{cases} \quad (3)$$

$$F_1^{(B_{\omega})}(\varepsilon_1) = \frac{(b-a)(S_1 + S_2)}{(a+b)S_2} \begin{pmatrix} 1.058 + 4.684\varepsilon_1 + 9.126\varepsilon_1^2 - \\ - 25.254\varepsilon_1^3 + 40.602\varepsilon_1^4 \end{pmatrix}; \quad (4)$$

$$F_2^{(B_{\omega})}(\varepsilon_2) = \frac{(b-a)(S_1 + S_2)}{(a+b)S_1} \begin{pmatrix} 1.193 + 9.099\varepsilon_2 + 126.653\varepsilon_2^2 - \\ - 704.649\varepsilon_2^3 + 1864.595\varepsilon_2^4 - \\ - 2234.832\varepsilon_2^5 + 1019.341\varepsilon_2^6 \end{pmatrix}, \quad (5)$$

де σ_{ω} – нормальні секторіальні напруження при стисненому крученні, МПа;

a і b – ширина горизонтальної та вертикальної стінки профілю, м;

$$\varepsilon_1 = \frac{l}{a}, \varepsilon_2 = \frac{l}{b}, S_1 = a \cdot \delta_1, S_2 = b \cdot \delta_2,$$

δ_1, δ_2 – відповідні товщини профілю;

$F_1^{(B_\omega)}(\varepsilon_1, \varepsilon_2), F_2^{(B_\omega)}(\varepsilon_1, \varepsilon_2)$ – функції поправки, які враховують зміну геометрії тонкостінного замкненого профілю при поширенні у ньому втомної тріщини.

Для визначення довговічності та прогнозу ресурсу отримано вираз (6), графічна інтерпретація якого представлена на рис. 3.

$$t = \frac{N}{\omega}; N = \int_0^{l_*} \Phi(l) dl, \quad (6)$$

де $\Phi(l)$ – характеристична функція втомного руйнування;

ω – середня частота навантажень у процесі експлуатації;

l_* – критичне значення дефектності.

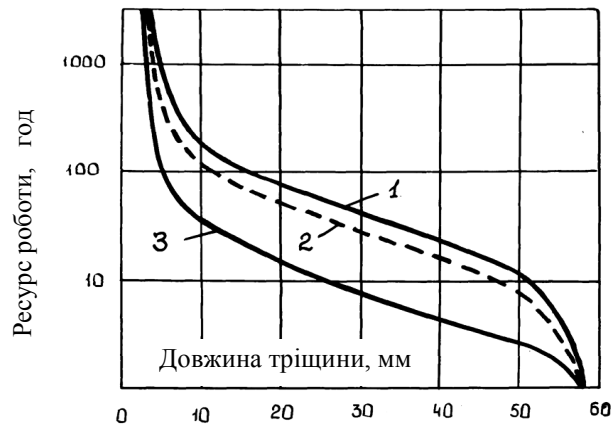


Рисунок 3. Залежність ресурсу роботи рами від розміру початкової тріщини та частоти навантаження: 1 – $\omega=2$ Гц; 2 – $\omega=2,5$ Гц; 3 – $\omega=8$ Гц

Дані параметри слугують критеріями при оптимізації конкретного елемента конструкції машини.

І на завершальному третьому етапі триединої моделі, відповідно до отриманих параметрів в автоматизованому режимі формуються робочі креслення оптимізованої конструкції розробленої деталі, вузла чи машини. Дані матеріали передаються на завод-виробник для реалізації проекту. Крім того, фахівці-розробники повинні проводити супровід розробки – надавати науково-консультативну підтримку обслуговуючому персоналу машини.

Висновки. При виконанні всіх етапів триединої моделі пошукового конструювання сільськогосподарських машин у кінцевому результаті отримуємо якісно спроектовану, перевірену на практиці машину, яка є високотехнологічною та конкурентоспроможною на ринку.

Література

1. Погорельий, Л.В. Сельскохозяйственная техника и технологии будущего [Текст] / Л.В. Погорельий. – К.: Урожай, 1988. – 176 с.
2. Сучасні тенденції розвитку конструкцій сільськогосподарської техніки; за ред. В.І. Кравчука, М.І. Грицишина, С.М. Ковалю. – К.: Аграрна наука, 2004. – 396 с.
3. Вікович, І.А. Конструкції і динаміка штангових обприскувачів [Текст] / І.А. Вікович. – Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2003. – 460 с.
4. Свідectво про реєстрацію авторського права на твір. Триединая модель пошукового конструювання сільськогосподарських машин / Рибак Т.І., Бабій А.В., Ріпецький Є.Й. – № 33031 від 29.04.2010 р.
5. Рибак, Т.І. Пошукове конструювання на базі оптимізації ресурсу мобільних сільськогосподарських машин: підручник-посібник [Текст] / Т.І. Рибак. – Тернопіль: «Збруч», 2003. – 332 с.
6. Рибак, Т.І. Підвищення надійності машин для хімічного захисту в рослинництві [Текст] / Т.І. Рибак. –

К.: Урожай, 1986. – 104 с.

7. Бабій, А.В. Оптимізація конструктивних параметрів опор бака спеціального малогабаритного обприскувача: дис. ... канд. тех. наук: 05.05.11 / Бабій Андрій Васильович. – Тернопіль, 2005. – 191 с.
8. Андрейкив, А.Е. Усталостное разрушение и долговечность конструкций [Текст] / А.Е. Андрейкив, А.И. Дарчук. – К.: Наукова думка, 1992. – 184 с.

Отримано 07.09.2011