

ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУИРОВАНИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ТЕПЛООВОГО ПОТОКА ДЛЯ ПРИБОРОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ПО ДСТУ ISO 8301:2007

Бурова З.А., Воробьев Л.И., Грищенко Т.Г., Декуша Л.В., Шмаров Е.В.

Институт технической теплофизики Национальной академии наук Украины
г. Киев, Украина

АННОТАЦІЯ: Показано, що в перетворювачах теплового потоку необхідно мінімізувати різницю між значеннями ефективної теплопровідності чутливої і охоронної зон, а перспективною термоелектричною парою для таких перетворювачів є константан-нікель.

АННОТАЦИЯ: Показано, что в преобразователях теплового потока необходимо минимизировать разницу между значениями эффективной теплопроводности чувствительной и охранной зон, а перспективной термоэлектрической парой для таких преобразователей является константан-никель.

ABSTRACT: It is demonstrated that in the heat flow transducers it is necessary to minimize a difference between the values of effective heat conductivity of sensible and guard areas, and a perspective thermo-electric pair for such transducers is a constantan-nickel.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: преобразователь теплового потока, теплопроводность, погрешность измерения

Измерение теплопроводности строительных теплоизоляционных материалов в Украине регламентируется национальным стандартом ДСТУ БВ.2.7-105 (ГОСТ 7076) [1] и международным стандартом ДСТУ ISO 8301 [2]. В соответствии с требованиями этих документов в ИТТФ НАН Украины создана установка ИТ-7С, предназначенная для измерения коэффициента теплопроводности и теплового сопротивления широкой гаммы теплоизоляционных и строительных материалов [3, 4] с применением преобразователей теплового потока (далее – ПТП). Ниже представлены результаты теоретических исследований особенностей выбора характеристик ПТП для таких установок.

При выборе ПТП часто совершают типичную ошибку, не учитывая разницу теплофизических характеристик чувствительной зоны ПТП и материала окружающей ее охранной зоны. В сочетании с ограниченностью размеров ПТП это приводит к искажению температурного поля в исследуемом образце, что является основным источником методической погрешности измерения теплопроводности данным методом [5]. Другим немаловажным фактором, влияющим на распределение температурного поля в исследуемом образце, является условие термостатирования прибора. В данной работе рассматривается симметричная схема прибора, где созданы такие условия [6],

при которых по средней плоскости образца проходит изотерма $T = \text{const}$. Модель теплообмена представлена на рис. 1.

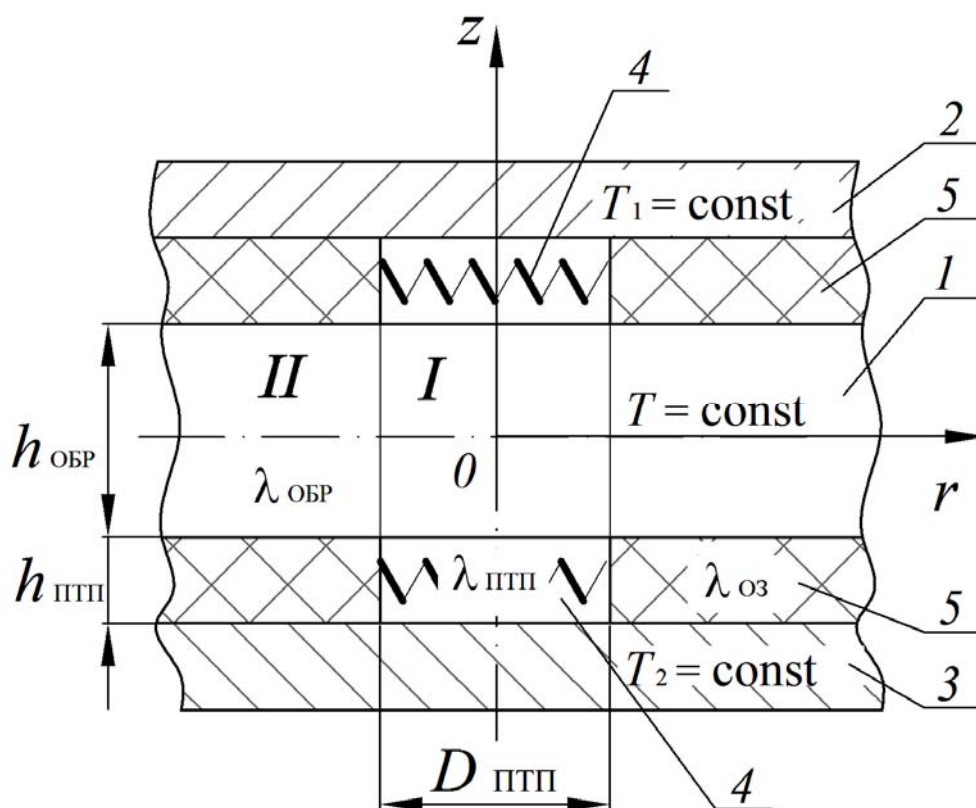


Рис. 1. Модель теплообмена в системе тел «ПТП – образец – ПТП»:
1 – образец, 2 – нагреватель, 3 – холодильник, 4 – чувствительная зона ПТП,
5 – охранная зона ПТП

Температурное поле образца, в силу осевой симметрии, описывается классическим уравнением теплопроводности в цилиндрической системе координат. Следуя методу, предложенному в [7], рассмотрены две отдельные области – I и II. Решения найдены одним из классических методов [8], затем на границе областей выполнены условия непрерывности температур и их радиальных производных [5]. Используя решение, приведенное в [9], и заменяя коэффициенты теплообмена значениями тепловой проводимости ПТП и его охранной зоны проведен вычислительный эксперимент с целью оптимизации конструкции ПТП.

На рис. 2 представлены результаты вычислений по определению отношения измеренной теплопроводности образца к ее истинному значению $\lambda_{\text{изм}}/\lambda_{\text{обР}}$ в зависимости от комплексной безразмерной величины $\lambda_{\text{обР}} \cdot \Psi$, где $\Psi = 2h_{\text{оз}}/(\lambda_{\text{оз}}D_{\text{ПТП}})$ – постоянная прибора, при вариации относительной толщины образца $h_{\text{обР}}/D_{\text{ПТП}}$ и относительной теплопроводности материала чувствительной зоны ПТП и охранной зоны $\lambda_{\text{ПТП}}/\lambda_{\text{оз}}$.

Результаты расчетов дают оценку погрешности измерения, которая в значительной степени зависит от геометрических размеров образца и ПТП и соотношения теплопроводностей $\lambda_{\text{ПТП}}/\lambda_{\text{оз}}$. При $\lambda_{\text{ПТП}}/\lambda_{\text{оз}} = 1,0$ выполняется соотношение $\lambda_{\text{изм}}/\lambda_{\text{обР}} = 1,0$, т.е. составляющая погрешности измерений, вызванная неравенством значений теплопроводности чувствительной и охранной зон ПТП сводится к нулю.

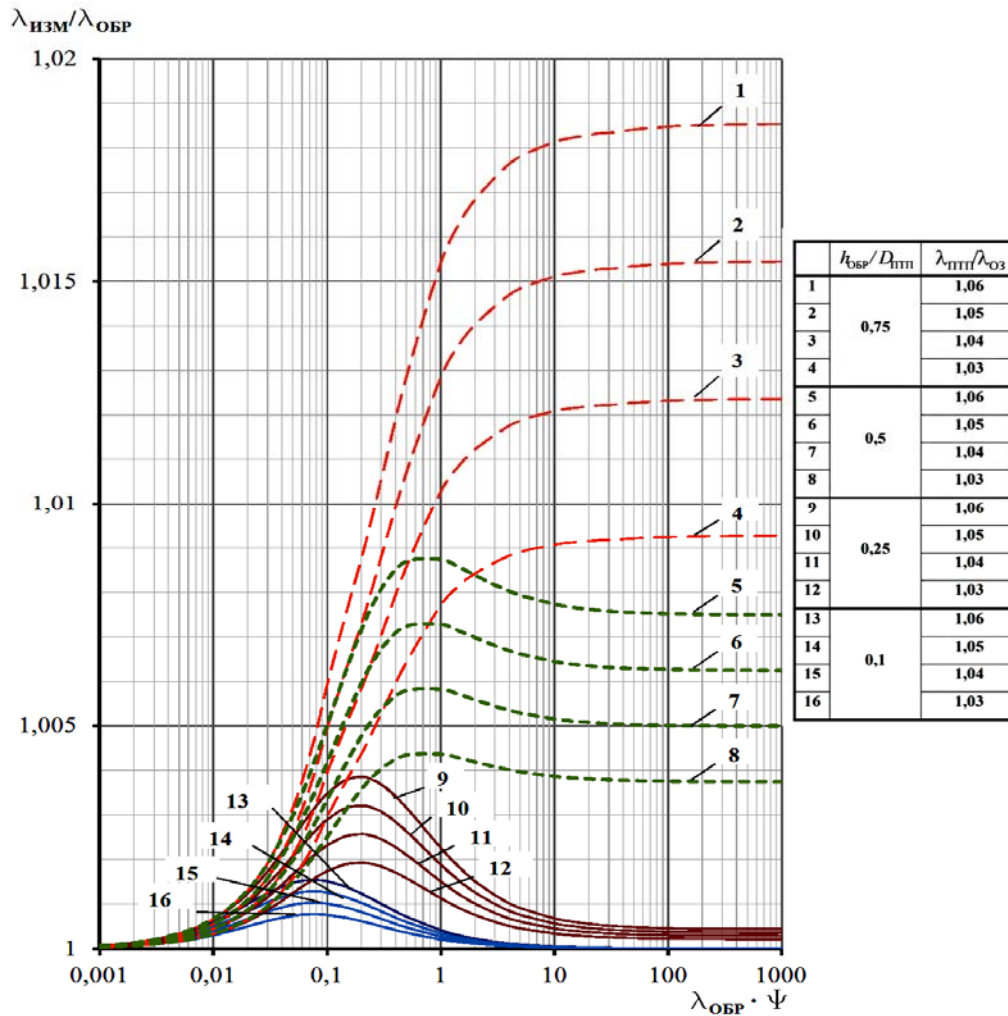


Рис. 2. Оценка погрешности измерения теплопроводности в зависимости от геометрических размеров образца для $\lambda_{\text{ПТП}}/\lambda_{\text{ОЗ}}=1,03; 1,04; 1,05; 1,06$

Как следует из графиков, для снижения погрешности необходимо толщину образца согласовывать с диаметром чувствительной зоны ПТП. Так при диаметре чувствительной зоны $D_{\text{ПТП}}=120\text{ мм}$ и толщине образца не более 60 мм, как рекомендовано в [1, 2], составляющая методической погрешности $\lambda_{\text{изм}}/\lambda_{\text{обр}}$ не превышает 1% (кривые 5 – 8 рис. 2) и снижается при уменьшении отличия теплопроводности чувствительной и охранной зон ПТП.

Известно, что теплопроводность ПТП, выполненных по ДСТУ 3756 (ГОСТ 30619) [10], как системы с включениями, обладающими очень контрастной теплопроводностью, зависит от формпараметра ПТП $\Phi=(2f_1+f_2+f_3)/f_1$ [11], где f_1 и f_2 – площади сечений термоэлектродной проволоки и гальванического покрытия, а f_3 – площадь сечения, заполненного заливочным компаундом. Существенное влияние на тепловое сопротивление ПТП и, соответственно, на его эквивалентную теплопроводность оказывает также соотношение толщины ПТП $h_{\text{ПТП}}$ и высоты спирали термоэлементов $h_{\text{СП}}$. В связи с этим выполнены расчеты по определению зависимости отношения теплопроводностей чувствительной и охранной зон ПТП $\lambda_{\text{ПТП}}/\lambda_{\text{ОЗ}}$ для теплопроводности $\lambda_{\text{ОЗ}}=1$ при вариации формпараметра Φ и отношения $h_{\text{ПТП}}/h_{\text{СП}}$ в

практически целесообразных диапазонах их значений. Полученные результаты представлены графически на рис. 3.

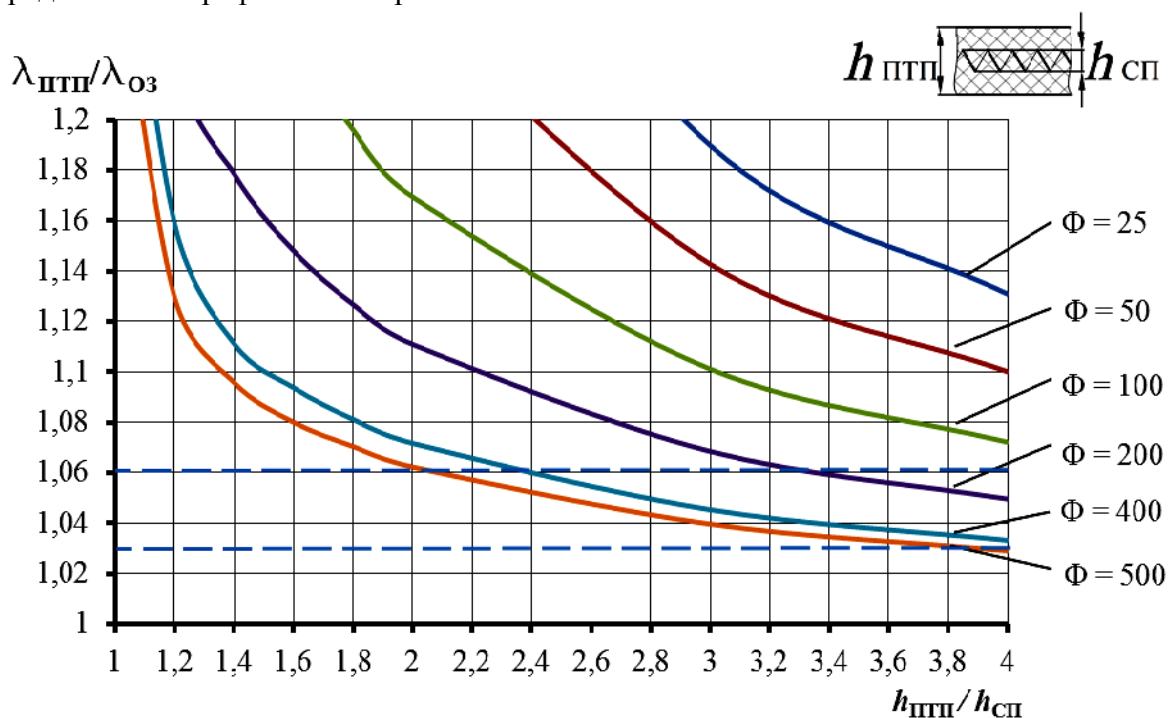


Рис. 3. Определение оптимального формпараметра ПТП

Из полученных графиков видно, что для значений отношения $\lambda_{\text{ПТП}}/\lambda_{\text{ОЗ}}$ от 1,03 до 1,06 значение формпараметра ПТП должно превышать $\Phi = 400$.

Для найденного значения Φ при исходном диаметре константановой проволоки 0,06 мм и диаметре чувствительной зоны ПТП $D_{\text{ПТП}} = 120$ мм рассчитаны значения коэффициентов преобразования K в диапазоне значений температуры от 200 до 500 К в зависимости от вариации отношения f_{21} от 0,025 до 1 для пары константан-медь (рис. 4, а) и от 0,1 до 1 для пары константан-никель (рис. 4, б).

Анализ графиков рис. 4 показывает явное преимущество ПТП на основе пары константан-никель, т.к. для этой пары материалов характерна незначительная температурная зависимость коэффициентов преобразования при большем значении толщины гальванического покрытия, что удобнее на практике и обеспечивает одновременно температурную и временную стабильность коэффициента преобразования. Вследствие этого отпадает необходимость проводить калибровку измерительного прибора по рабочим эталонам до и после каждого эксперимента, как рекомендуется в нормативных документах.

Именно ПТП на основе константан-никелевой пары стали основой измерительных теплотрических блоков, установленных на установках ИТ-7С. На графиках рис. 5, а представлен разброс составляющей погрешности измерения плотности теплового потока установки ИТ-7С, которая не превышает 1%. На рис. 5, б приведены результаты исследования комплекта рабочих эталонов теплопроводности – оптических стекол ЛК5, ТФ-1 и полиметилметакрилата (ПММК), которые демонстрируют соответствие полученных данных по теплопроводности справочным характеристикам.

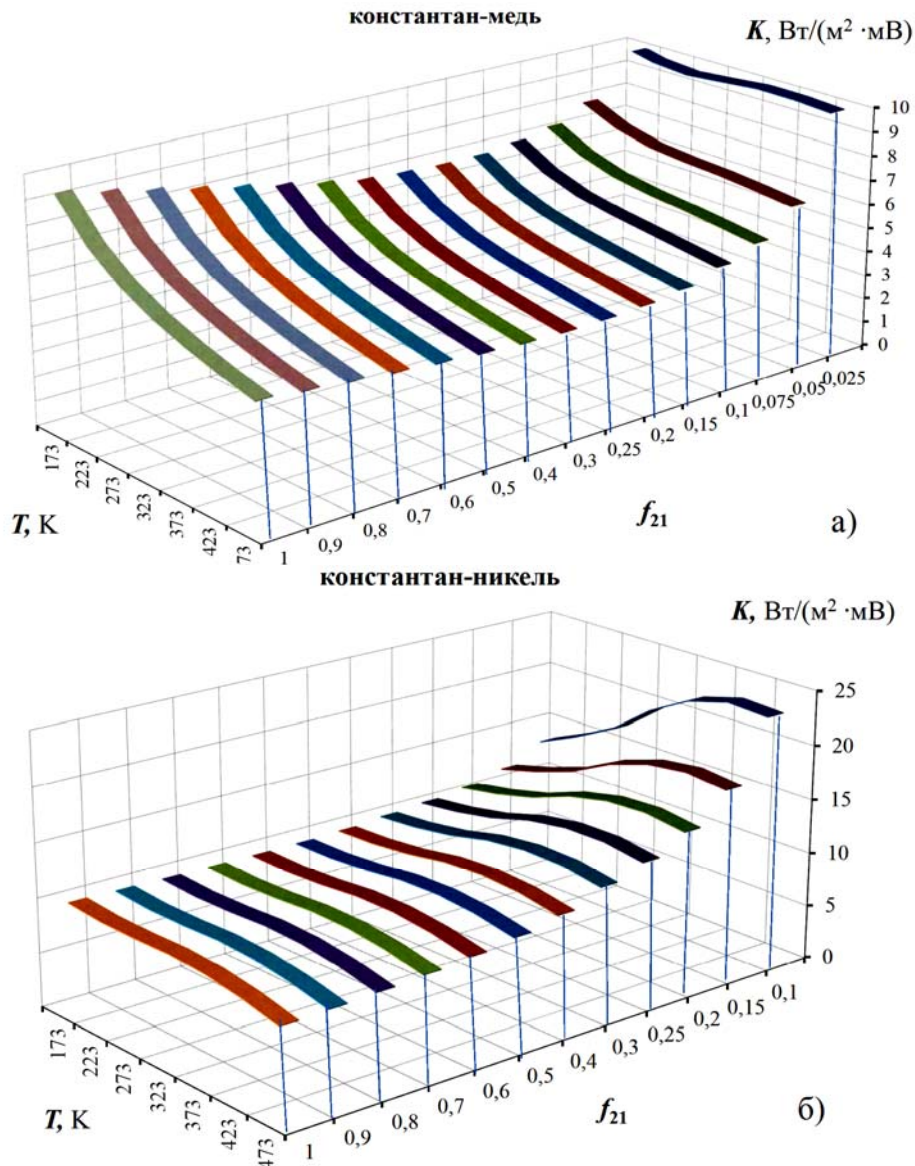


Рис. 4. Температурная зависимость коэффициентов преобразования ПТП для гальванических пар: а) – константан-медь; б) – константан-никель

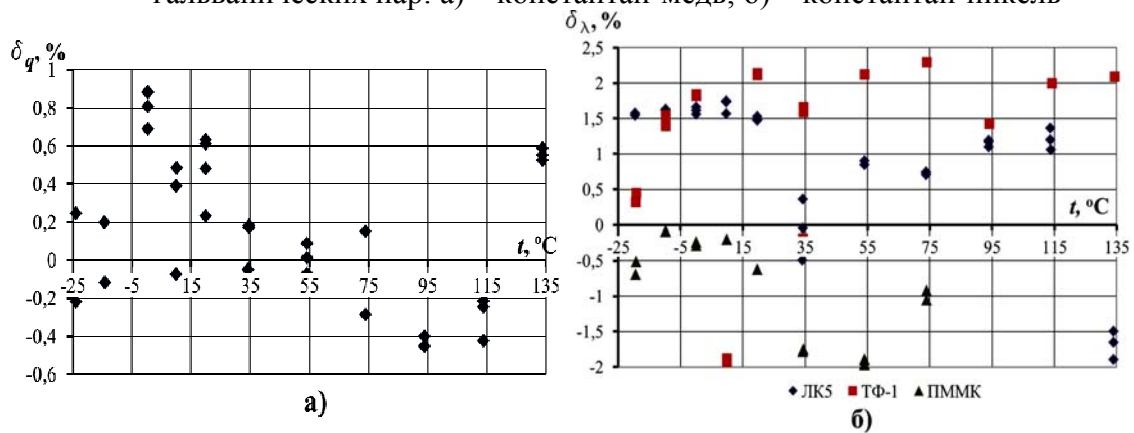


Рис. 5. Разброс составляющей погрешности измерения плотности теплового потока установки ИТ-7С (а) и относительная погрешность измерений коэффициента теплопроводности рабочих эталонов на установке ИТ-7С (б) в рабочем диапазоне значений температуры

ВЫВОДЫ

При конструировании ПТП, предназначенных для использования в приборах для измерения теплопроводности, необходимо обеспечить максимально близкие значения эффективной теплопроводности чувствительной и охранной зон ПТП. Эта задача может быть решена как подбором формпараметра преобразователя и материалов компаунда и спирали, так и путем заполнения охранной зоны той же спиралью, что использована в чувствительной зоне. Перспективной парой термоэлектрических материалов, которая обеспечивает временную и температурную стабильность параметров ПТП является пара константан-никель.

ЛИТЕРАТУРА

1. Матеріали та вироби будівельні. Метод визначення теплопровідності і термічного опору при стаціонарному тепловому режимі: ДСТУ Б В.2.7-105-2000 (ГОСТ 7076-99).
2. Теплоізоляція. Визначення теплового опору та пов'язаних із ним характеристик в усталеному режимі. Прилад із перетворювачем теплового потоку: ДСТУ ISO 8301:2007.
3. Експериментальна установка для визначення теплопровідності будівельних матеріалів в розрахункових умовах / [Фаренюк Г.Г., Декуша Л.В., Воробйов Л.Й., Бурова З.А.] // Будівельні конструкції: зб. наук. праць.– К.: НДІБК, 2008. – Вип. 68. – С.34-39.
4. Установка для вимірювання коефіцієнта теплопровідності будівельних матеріалів ИТ-7С / [Бурова З., Воробйов Л., Декуша Л., Декуша О.] // Метрологія та прилади. – Харків, 2009. – №6/ – С. 9-15.
5. Декуша Л.В. Преобразователи теплового потока для измерителей теплопроводности материалов / Декуша Л.В., Грищенко Т.Г., Менделеева Т.В. // Промтеплотехника, 2003. – Т.25. - № 6. – С. 84-90.
6. Декуша Л.В. Измерение теплопроводности теплоизоляционных и строительных материалов (в развитие ГОСТ 7076-99 и ИСО 8301:1991) / Декуша Л.В., Грищенко Т.Г., Менделеева Т.В. // Промтеплотехника, 2003. – Т.25. - № 3. – С. 79-87.
7. Wesley D.A. Thin disk on a convectively cooled plate – Application to heat flux measurement errors / Wesley D.A. //Trans, of the ASME, Journ. of Heat Transfer. - V.101. - May 1979. – P. 346-352.
8. Лыков А.В. Теория теплопроводности / Лыков А.В. – М.: Высш. шк., 1957. – 599 с.
9. Декуша Л.В. Об особенностях измерения стационарного теплового потока, проходящего через бесконечную пластину, по обе стороны которой происходит конвективный теплообмен / Декуша Л.В., Менделеева Т.В. // Депонированные научные работы, ГНТБ Украины № 93-Ук2003. – К., 2003. – 25 с.
10. Енергозбереження. Перетворювачі теплового потоку термоелектричні загального призначення. Загальні технічні умови: ДСТУ 3756-98 (ГОСТ 30619-98).
11. Геращенко О.А. Основы теплотеметрии / Геращенко О.А. – К.: Наук. думка, 1972. – 191 с.

Статья поступила в редакцию 02.04.2013 г.