УДК: 620.92

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ВОДОУГОЛЬНЫХ СУСПЕНЗИЙ

Пинчук В.А., Жуков В.Е., Шарабура Т.А.

Национальная металлургическая академия Украины, Днепропетровск, Украина
Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск, Россия

АННОТАЦИЯ

В рамках поставленной задачи по определению значений коэффициента теплопроводности водоугольных суспензий, приготовленных из разных марок угля, разработана экспериментальная установка. Полученные экспериментальные данные обрабатывались путем комбинирования метода сравнения и численного решения обратной задачи теплопроводности. Для обработки экспериментальных данных использовалась математическая модель экспериментальной установки, которая позволяет рассчитывать распределение температурных полей в нестационарном режиме. Экспериментальные исследования проводились для водоугольных суспензий, полученных из углей разной стадии метаморфизма, отличающихся повышенным содержанием минеральных примесей. Как показали экспериментальные исследования, коэффициент теплопроводности водоугольной суспензии существенно увеличивается, по сравнению с углем, и изменяется от 0,41 до 0,81 Вт/м×К, закономерно увеличиваясь с ростом температуры в исследуемом диапазоне 40-150 °С.

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день одним из направлений повышения эффективности термической переработки угля является его использование в виде водоугольной суспензии, представляющей собой коллоидно-дисперсную систему, состоящую из тонкоизмельченного угля, воды и реагента-пластификатора. По своим теплофизическим, теплотехническим, реологическим и электрическим свойствам водоугольная суспензия - вид топлива, характеристики которого существенно отличаются от характеристик составляющих его веществ [1-3].

Свойства водоугольных суспензий могут существенно сказаться на тепломассобменных процессах в топочном пространстве и теплообмене с окружающей средой, на напорно-расходных характеристиках и качестве распыла суспензии, на распределении концентрации твердой фазы по сечению трубопроводов при транспортировке. Энергетическая эффективность и экологическая безопасность применения водоугольных суспензий в энергетике и металлургии возможна лишь на основе детального знания всего комплекса их свойств.

От теплофизических свойств топлива зависит выбор технологических решений, конструкций установок и агрегатов, показатели энергопотребления, режимы эксплуатации. С точки зрения технологий термической переработки наибольший интерес представляют данные о теплоемкости, тепло- и температуропроводности водоугольных суспензий и их изменение в ходе термической переработки, так как этими свойствами, в значительной степени, определяются продолжительность, технологические параметры и энергетическая эффективность процесса.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ЦЕЛИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Известно, что в твердых телах перенос тепловой энергии осуществляется с помощью двух основных механизмов: за счет взаимодействия между тепловыми упругими колебаниями решетки; за счет движения электронов и столкновения их с атомами. Величина тепло-

© Пинчук В.А., Жуков В.Е., Шарабура Т.А.

проводности зависит от характера колебаний решетки. При гармонических колебаниях сопротивление переносу энергии отсутствует, и теплопроводность может достигать огромных значений. Однако в реальных твердых телах колебания имеют ангармонический характер, который способствует частичному затуханию упругих тепловых колебаний и значительному снижению теплопроводности. В твердых телах–диэлектриках количество свободных электронов, которые могли бы двигаться через кристаллическую решетку и осуществлять перенос энергии, недостаточно, и теплота, в основном, передается за счет колебаний решетки. В металлах перенос тепловой энергии определяется движением и взаимодействием электронов проводимости, так как решетчатая составляющая теплопроводности мала. Явление переноса тепла в полупроводниках сложнее, чем в диэлектриках и металлах, так как для них существенны как решеточная, так и электронная составляющие теплопроводности. Кроме того, здесь теплопроводность зависит от теплопроводности примесей и многих других факторов [4-6].

Известно, что по своим электрическим свойствам угли низкой стадии метаморфизма являются диэлектриками, средней стадии - полупроводниками, антрациты – проводниками [7, 8]. Поскольку при приготовлении водоугольных суспензий можно использовать различные виды углей и отходов углеобогащения, то, следовательно, механизм переноса теплоты и теплофизические свойства получаемых суспензий весьма разнообразны.

Жидкости занимают промежуточное положение между газами и твердыми телами. Колебания молекул и их перемещение в жидкостях отличаются от движения молекул в газах и твердых телах. В жидкостях межмолекулярное расстояние меньше, чем в реальных газах. Плотность жидкости высока, а молекулы, хотя и подвижны, не так хаотичны, как в газах, и перемещаются значительно медленнее. Перенос тепловой энергии осуществляется практически между слоями жидкости. Колебания молекул в жидкости отличаются от колебаний в твердом теле тем, что они имеют изменяющийся период колебаний. Вследствие этого механизм теплопроводности в жидкостях осуществляется не только обменом энергии при соударениях, но и переносом энергии диффундирующими молекулами.

При повышении температуры коэффициент теплопроводности жидкостей возрастает, за исключением воды и глицерина. Для воды коэффициент теплопроводности увеличивается с температурой и на линии насыщения достигает наиболее высокого значения при температуре около 130 °С (0,686 Вт/м×К) [5]. При дальнейшем повышении температуры коэффициент теплопроводности воды уменьшается.

Угли по теплофизическим свойствам приближаются к теплоизоляторам; они представляют собой неоднородные тела, состоящие из твердых компонентов и воздушных ячеек. В целом для углей характерно увеличение теплопроводности с ростом стадии метаморфизма (коэффициент теплопроводности антрацитов выше, чем коэффициент теплопроводности бурых углей) [6, 8-10]. Такое влияние стадии метаморфизма на коэффициент теплопроводности объясняется ростом углеродных сеток, увеличением степени структурной упорядоченности угольного вещества [11] и возрастанием плотности.

Минеральные включения оказывают заметное влияние на величину коэффициента теплопроводности углей. Теплопроводность органической массы значительно ниже теплопроводности минеральных примесей, и поэтому коэффициент теплопроводности углей увеличивается с возрастанием их зольности. С увеличением концентрации минеральных примесей возрастает плотность угля, что так же приводит к повышению коэффициента теплопроводности [6]. Кроме того, в угле содержатся неравномерно распределенные различные микроэлементы, которые также могут влиять на коэффициент тепловодности угля.

Коэффициент теплопроводности углей меняется в широких пределах от 0,11 до 0,25 Вт/м×К в зависимости от ряда факторов. У каменных углей наименьшими значениями теплопроводности характеризуются угли, находящиеся в средних стадиях метаморфизма, в первую очередь коксовые, тощие и жирные.

Добавка воды к углю должна увеличивать теплопроводность последнего в связи с тем, что коэффициент теплопроводности воды примерно в 25 раз больше теплопроводности воздуха. Кроме того, присутствие водяной пленки в местах контакта угольных частиц значительно улучшает теплопередачу. Вода не только связывает, благодаря поверхностному натяжению, отдельные угольные частицы между собой, но и способствует переходу тепла от одной частицы к другой путем теплопроводности [6].

В технической литературе сведения о прямых измерениях коэффициента теплопроводности водоугольных суспензий отсутствуют. Известны лишь немногочисленные данные о коэффициенте теплопроводности высохшей водоугольной суспензии и расчетные зависимости от содержания жидкой фазы в суспензии [12].

В настоящее время молекулярно-статистическая и термодинамическая теория газообразного и твердого вещества разработана настолько, что позволяет предвидеть целый ряд свойств веществ, в том числе и теплопроводность. Что же касается теплопроводности для растворов, многокомпонентных жидкостей и суспензий, единой теории, способной объяснить свойства этих веществ, практически нет.

Согласно теоретическим предпосылкам коэффициент теплопроводности водоугольной суспензии увеличивается по сравнению с углем. Аналитическое описание зависимости коэффициента теплопроводности водоугольной суспензии от количества водной фазы затруднительно из-за отсутствия физической модели, адекватной реальной структуре водоугольной суспензии. Это является следствием специфических физико-химических свойств дисперсных систем, сложности структуры угля и видоизменения воды в слоях, прилегающих к поверхности частиц, а также поверхностных слоев самих частиц, по сравнению со структурой исходного угля.

Описанные особенности свидетельствуют о весьма сложном механизме переноса теплоты в водоугольных суспензиях и необходимости проведения экспериментальных исследований для определения теплофизических свойств водоугольной суспензии и закономерностей протекания тепловых процессов в ней.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ И АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Экспериментальные исследования проводились для водоугольных суспензий, полученных из углей разной стадии метаморфизма, отличающихся повышенным содержанием минеральных примесей. Характеристика исследуемых образцов водоугольных суспензий приведена в таблице 1.

В рамках поставленной задачи по определению значений коэффициента теплопроводности водоугольных суспензий, приготовленных из разных марок угля, Национальной металлургической академией Украины совместно с Институтом теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН и разработана экспериментальная установка, реализованная на базе кафедры промышленной теплоэнергетики НМетАУ. Принципиальная схема и фотография установки представлены на рис. 1.

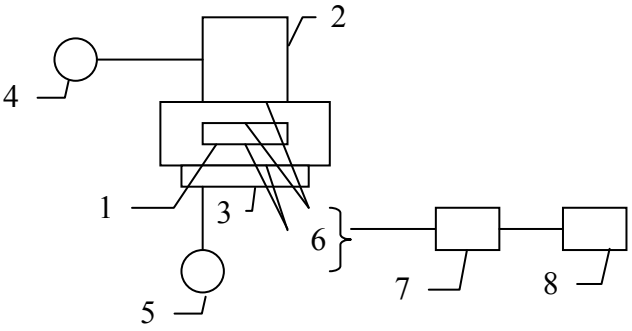
Экспериментальная установка состоит из измерительного участка и системы управляющих и регистрирующих приборов. Измерительный участок состоит из верхней, нижней частей корпуса, выполненных из нержавеющей стали, и нагревателя. Нагреватель выполнен из нихромовой проволоки, намотанной на массивный медный цилиндр, который теплоизолирован со всех сторон, кроме нижней части, контактирующей с верхней частью корпуса. Верхняя часть корпуса соединена с верхним термодиском, изготовленным из меди, и представляет собой неразбираемую в процессе эксплуатации конструкцию. Нижняя часть корпуса состоит из нижнего фланца и нижнего термодиска. Для уменьшения потерь теплоты через корпус отсек для водоугольной

Таблица 1.
Характеристика образцов водоугольных суспензий.

Исследуемая водоугольная суспензия	Содержание твердой фазы, %	Характеристика исходного угля		
		Зольность, %	Влага, %	Выход летучих, %
ВУС из бурого угля	58	19	18,5	40,1
ВУС из газового угля	65	59,9	3,5	17,4
ВУС из длиннопламенного угля	65	34,7	12,2	26,2
ВУС из жирного угля	70	50,0	4,1	18,9
ВУС из тощего угля	68	17,9	4,5	8,4
ВУС из антрацита	70	43,5	5,2	3,8

© Пинчук В.А., Жуков В.Е., Шарабура Т.А.

суспензии и прилегающие к ней поверхности изолированы фторопластовой вставкой. В нагревателе, верхней и нижней частях корпуса установлены термопары. В собранном виде конструкция является герметичной и выдерживает давление до 3 МПа.



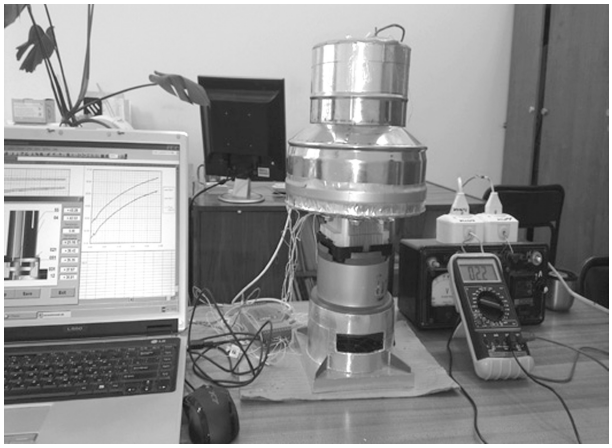


Рис.1 Принципиальная схема и фотография экспериментальной установки для определения теплофизических свойств водоугольного топлива.

Опытный образец водоугольной суспензии объемом 25 мл помещается в специальный отсек *1*. Тепловой поток, выделяемый нагревателем *2*, проходит через опытный образец суспензии и воспринимается холодильником *3*. Мощность нагревателя регулируется с помощью регулятора 4 (максимальная мощность нагревателя составляет 300 Вт). Высокая теплопроводность корпуса нагревателя и наличие термодиска, изготовленного из меди, обеспечивают равномерное распределение температуры по поверхности, контактирующей с водоугольной суспензией. Опытный образец водоугольной суспензии плотно, без воздушных зазоров, прилегает к поверхностям верхней и нижней части корпуса. Холодильник *3* представляет собой вентилятор, прикрепленный к нижней поверхности корпуса, и имеющий возможность регулирования скорости вращения регулятором *5*, что обеспечивает возможность выравнивания и поддержания необходимой температуры на охлаждаемой поверхности. Измерение температур на границах опытного образца осуществляется термопарами, уложенными через специальные отверстия, непосредственно в слое меди, контактирующей с образцом водоугольной суспензии (позиция *6*). Для оценки возможных тепловых потерь через металлический корпус производятся замеры температур термопарами (позиция *6*) и в слое нержавеющей стали. Для исследований использованы хромель-алюмелевые термопары (температурный диапазон измерения, согласно ДСТУ 2837-94 составляет от – 270 ^{0}C до + 1372 ^{0}C), для которых выполнена индивидуальная тарировка, обеспечивающая высокую точность измерения температур (± 0,01 ^{0}C). Показания термопар передаются на программно аппаратно-измерительный комплекс *7*, который позволяет контролировать, обрабатывать и выводить на экран компьютера 8 значения параметров в реальном режиме времени. Экспериментальная установка не привязана к конкретному виду водоугольной суспезии, позволяет проводить исследования в широком диапазоне изменения характеристик исходного сырья (марки угля, количества минеральных примесей и водной фазы, крупности частиц и проч.).

Полученные экспериментальные данные обрабатывались путем комбинирования метода сравнения и численного решения обратной задачи теплопроводности. Для обработки экспериментальных данных использована математическая модель экспериментальной установки, которая позволяет рассчитывать распределение температурных полей в нестационарном режиме. В процессе численного решения использовались граничные условия I, II, III и IV рода.

Для проверки адекватности разработанной математической модели, а также для реализации метода сравнения, на экспериментальной установке проведены исследования по определению коэффициента теплопроводности эталонного вещества (в нашем случае воды). Расхождение полученных по математической модели данных с известными зна-

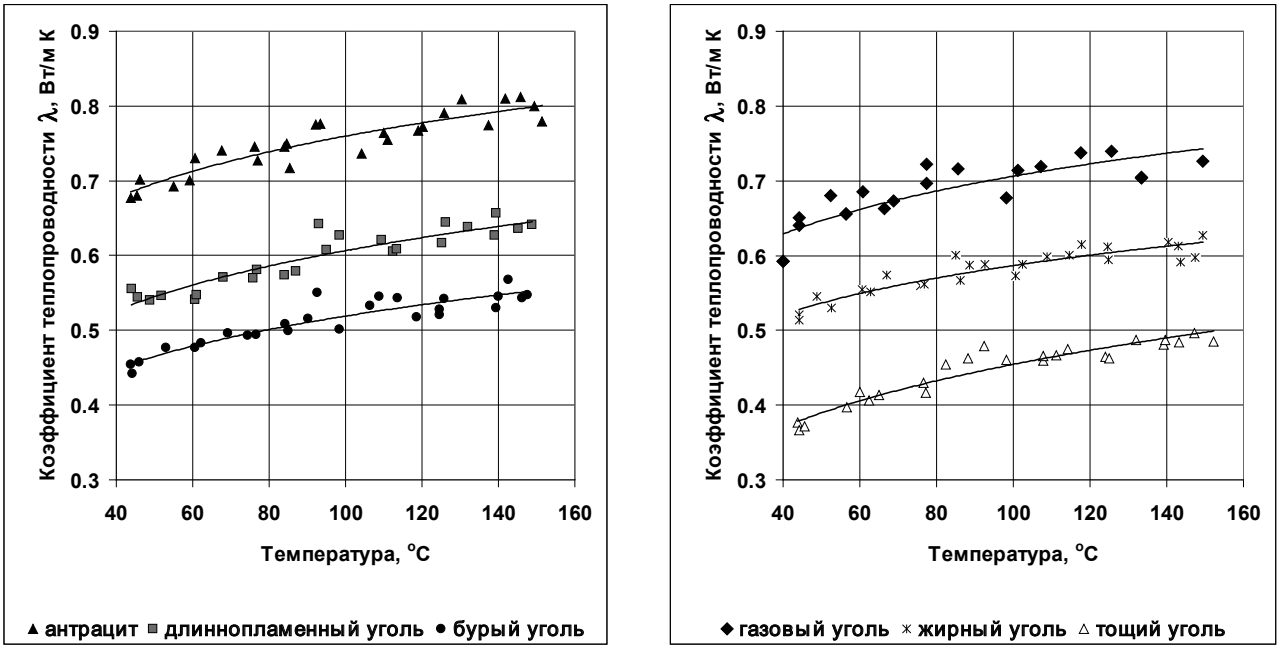


Рис.2 Зависимость коэффициента теплопроводности от температуры для водоугольных суспензии, полученных из углей различных марок.

чениями коэффициента теплопроводности воды при различных температурах [5] составило 1-3 %.

Результаты экспериментальных исследований значения коэффициента теплопроводности образцов водоугольных суспензий в диапазоне изменения температуры 40-150 °С приведены на рис.2.

Как показали экспериментальные исследования, коэффициент теплопроводности водоугольной суспензии существенно увеличивается по сравнению с углем и изменяется от 0,41 до 0,81 Вт/м×К, закономерно увеличиваясь с ростом температуры в исследуемом диапазоне. Видно, что значение коэффициента теплопроводности водоугольной суспензии нельзя рассматривать как среднее значение между коэффициентом теплопроводности угля и воды, как делают некоторые авторы. Различия в полученных значениях коэффициента теплопроводности позволяют предположить, что на значение коэффициента теплопроводности водоугольных суспензий оказывают влияние содержание водной фазы, степень метаморфизма исходного угля, содержание минеральных компонентов в нем. Дальнейшие исследования будут направлены на определение влияния степени измельчения угольных частиц, содержания минеральных примесей, соотношения твердой фазы и воды в суспензии и других факторов на теплофизические свойства водоугольных суспензий.

ВЫВОДЫ

По своим теплофизическим, теплотехническим, реологическим и электрическим свойствам водоугольная суспензия - вид топлива, характеристики которого существенно отличаются от характеристик составляющих его веществ. С точки зрения технологий термической переработки наибольший интерес представляют данные о теплоемкости, тепло- и температуропроводности водоугольных суспензий и их изменение в ходе термической переработки, так как этими свойствами в значительной степени определяются продолжительность, технологические параметры и энергетическая эффективность процесса.

Аналитическое описание зависимости коэффициента теплопроводности водоугольной суспензии от количества водной фазы затруднительно из-за отсутствия физической

модели, адекватной реальной структуре водоугольной суспензии. Имеющиеся теоретические данные свидетельствуют о весьма сложном механизме переноса теплоты в водоугольных суспензиях и необходимости проведения экспериментальных исследований для определения теплофизических свойств водоугольной суспензии и закономерностей протекания тепловых процессов.

В рамках поставленной задачи по определению значений коэффициента теплопроводности водоугольных суспензий, приготовленных из разных марок угля, разработана экспериментальная установка. Экспериментальная установка не привязана к конкретному виду водоугольной суспензии, позволяет проводить исследования в широком диапазоне изменения характеристик исходного сырья. Полученные экспериментальные данные обрабатывались путем комбинирования метода сравнения и численного решения обратной задачи теплопроводности. Для обработки экспериментальных данных создана математическая модель экспериментальной установки, которая позволяет рассчитывать распределение температурных полей в нестационарном режиме. В процессе численного решения использовались граничные условия I, II, III и IV рода.

Экспериментальные исследования проводились для водоугольных суспензий, полученных из углей разной стадии метаморфизма, отличающихся повышенным содержанием минеральных примесей. Как показали экспериментальные исследования, коэффициент теплопроводности водоугольной суспензии существенно увеличивается по сравнению с углем и изменяется от 0,41 до 0,81 Вт/м×К, закономерно увеличиваясь с ростом температуры в исследуемом диапазоне 40-150 °С. Дальнейшие исследования будут направлены на определение влияния степени измельчения угольных частиц, содержания минеральных примесей, соотношения твердой фазы и воды в суспензии и других факторов на теплофизические свойства водоугольных суспензий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Делягин Г.Н., Петраков А.П., Головин Г.С., Горлов Е.Г. Водные дисперсионные системы на основе бурых углей как энергетическое и технологическое топливо // Российский химический журнал. -1997.- №6.- С. 72-77.

   Deljagin G.N., Petrakov A.P., Golovin G.S., Gorlov E.G. Water dispersive system based on brown coal as an energy and technological fuel / / Russian Journal of Chemistry. -1997. - № 6. - P. 72-77.

2. Пинчук В.А., Губинский М.В. Потапов Б.Б. Использование водоугольного топлива и продуктов его переработки в энергетике и металлургии // Металургійна теплотехніка: Збірник наукових праць Національної металургійної академії України. – Дніпропетровськ: «Нова ідеологія». -2009.– Выпуск 1(16).- с. 144-149.

   Pinchuk V.A., Guba M.V., Potapov B.B. The use of coal-water fuel and its products in the energy and metallurgy / / Metalurgiyna teplotehnika: Zbirnik naukovykh prats' Natsionalnoï metalurgiynoï akademiï Ukrainy. - Dnipropetrovs'k, «Nova ideologiya.» -2009. - Issue 1 (16). P. 144-149.

3. Ходаков Г.С. Водоугольные суспензии в энергетике // Теплоэнергетика. – 2007.- №1.- С. 35-45.

   Hodakov G.S. Coal-water slurry in the energy / / Teploenergetika. - 2007. - № 1. - P. 35-45.

4. Чиркин В.С. Теплопроводность промышленных материалов. М.: Машиностроение, 1957. – 172 с.

   Chirkin V.S. Thermal conductivity of industrial materials. Mashinostroyeniye, 1957. - 172 p.

5. Михеев М.А,. Михеева И.М. Основы теплопередачи. М.: Энергия, 1977.-344 с.

   Mikheev M.A.,. Mikheeva I.M. Fundamentals of heat transfer. M.: Energiya, 1977.-344 p.

6. Агроскин А.А. Теплофизика твердого топлива. М.: Недра, 1980. – 256 с.

   Agroskin A.A. Thermal physics of solid fuel. M.: Nedra, 1980. - 256 p.

7. Агроскин А.А. Физические свойства угля. М.: Металлургиздат, 1961. – 309 с.

   Agroskin A.A. Physical properties of coal. M.: Metallurgy, 1961. - 309 p.

8. Химия и переработка угля /В.Г. Липович, Г.А. Калабин, И.В. Калечиц и др. – М.: Химия, 1988.-336 с.

Chemistry and processing of coal / V.G. Lipovich, G.A. Kalabin, I.V. Kalechits etc. - M.: Khimiya, 1988.-336 p.

9. Аронов С. Г., Нестеренко Л. Л. Химия твердых горючих ископаемых. -Х.: Изд-во при Харьковском университете, 1960.-371 с.

Aronov S.G., Nesterenko L.L. Chemistry of solid fuels. -Kh.: Publishing House of the Kharkov University, 1960.-371 p.

10. Камнева А.И., Платонов В.В. Теоретические основы химической технологии горючих ископаемых. – М.: Химия, 1990. – 287 с.

Kamneva A.I., Vladimir Platonov Theoretical Foundations of Chemical Engineering of fossil fuels. - M.: Khimiya, 1990. - 287 p.

11. Larsen J.W., Lee D., Shawver S.E. Coal macromolecular structure and reactivity// Fuel Process. Techn., 1986. -V.12. -P.51-62.

12. Попов В.И., Коваленко Ю.А., Борисов А.А. Реологические и теплофизические свойства водоугольных суспензий / Теплоэнергетика. – 1995. - №8. - с. 39-43.

Popov V.I., Kovalenko Y.A., Borisov A.A. Rheological and thermal properties of coal-water slurries / Teploenergetika. - 1995. - № 8. - P. 39-43.

© Пинчук В.А., Жуков В.Е., Шарабура Т.А.