

УДК 662.764

Пинчук В.А. – канд. техн. наук, доц., НМетАУ, Украина

Шарабура Т.А. – ассистент, НМетАУ, Украина

ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРА УГОЛЬНЫХ ЧАСТИЦ НА ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВОДОУГОЛЬНЫХ ТОПЛИВ

В рамках поставленной задачи по определению значений коэффициента теплопроводности водоугольных топлив разработана экспериментальная установка. Проведены экспериментальные исследования влияния размера частиц твердой фазы в водоугольных топливах на коэффициент теплопроводности топлива. Как показали экспериментальные исследования, коэффициент теплопроводности водоугольных топлив, содержащих угольные частицы размером менее 200 мкм, в среднем, на 15-20 % выше, чем при размере угольных частиц 2-3 мм, в исследуемом диапазоне температуры. Приведены результаты исследований влияния предварительной механической активации на теплотворную способность угольного вещества.

Ключевые слова: водоугольное топливо, коэффициент теплопроводности, экспериментальная установка, стадия метаморфизма, размер частиц, механическая активация.

Введение

Водоугольное топливо являются одним из эффективных заменителей угля, дорогих жидких топлив и природного газа. Получение водоугольных топлив из низкосортных углей, обводненной угольной мелочи, мокрых шламов и отходов обогащательных предприятий, не используемых в настоящее время, и применение их в энергетике может дать значительный экономический и экологический эффект [1-3]. Разработка эффективных процессов приготовления и переработки водоугольных топлив должна базироваться на научно обоснованных закономерностях физического и физико-химического воздействия на топлива с учетом их свойств и строения.

При использовании водоугольные топлива должны обладать рядом специфических свойств, в том числе высокой концентрацией твердой фазы, высокой текучестью (низкой вязкостью) и устойчивостью к расслоению [1,4]. Свойства водоугольных топлив могут существенно сказываться на тепломассобменных процессах в

топочном пространстве и теплообмене с окружающей средой, на напорно-расходных характеристиках оборудования и качестве распыла топлива, на распределении концентрации твердой фазы по сечению трубопроводов при транспортировке.

От теплофизических свойств топлива зависят показатели энергопотребления, режимы эксплуатации, а также выбор технологических решений, конструкций установок и агрегатов. С точки зрения технологий термической переработки наибольший интерес представляют данные о теплоемкости, тепло- и температуропроводности водоугольных топлив 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

Механизм переноса теплоты теплопроводностью, в первую очередь, зависит от агрегатного состояния вещества. Известно, что в твердых телах перенос тепловой энергии теплопроводностью осуществляется с помощью двух основных механизмов: за счет взаимодействия между тепловыми упругими колебаниями решетки; за счет движения электронов и столкновения их с атомами. Соотношение решеточной и электронной составляющих теплопроводности зависит от природы твердого тела – диэлектрики, полупроводники, проводники.

Процесс теплопроводности газов состоит во взаимном обмене молекулами и их соударениями между собой. Каждое перемещение молекулы газа ограничивается длиной ее свободного пробега.

Жидкости занимают промежуточное положение между газами и твердыми телами. Перенос теплоты теплопроводностью в жидкостях осуществляется не только обменом энергии при соударениях, но и переносом энергии диффундирующими молекулами [5-7].

Из анализа строения и свойств угля следует, что угли низкой стадии метаморфизма являются диэлектриками, средней стадии - полупроводниками, антрациты – проводниками, что, соответственно, отражается на механизме переноса теплоты теплопроводностью. [8, 9]. В целом для углей характерно увеличение коэффициента теплопроводности с ростом стадии метаморфизма (коэффициент теплопроводности антрацитов выше, чем коэффициент теплопроводности бурых углей) [7, 8-11]. Такое влияние стадии метаморфизма на коэффициент теплопроводности объясняется

ростом углеродных сеток, увеличением степени структурной упорядоченности угольного вещества [12] и возрастанием плотности. Существенное влияние на коэффициент теплопроводности углей оказывает наличие минеральных примесей и влаги [8, 10].

Водоугольное топливо представляют собой дисперсную топливную систему, состоящую из измельченного угля (59-70%), воды (29-40%) и реагента-пластификатора (1%) [1-4]. Поскольку при приготовлении водоугольных топлив можно использовать различные виды углей и отходов углеобогащения, то, следовательно, механизм переноса теплоты и теплофизические свойства получаемых топлив будут весьма разнообразны. Аналитическое описание зависимости коэффициента теплопроводности водоугольного топлива от количества водной фазы, содержания минеральных примесей, размера частиц затруднительно из-за отсутствия физической модели, адекватной реальной структуре водоугольного топлива. 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 топливах и необходимости проведения экспериментальных исследований для определения теплофизических свойств водоугольного топлива и закономерностей протекания тепловых процессов в нем.

Методика исследований и анализ полученных результатов

В рамках поставленной задачи по определению значений коэффициента теплопроводности водоугольных топлив на базе кафедры промышленной теплоэнергетики НМетАУ разработана экспериментальная установка. 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 водоугольного топлива и прилегающие к нему поверхности изолированы фторопластовой вставкой. В нагревателе, верхней и нижней частях корпуса установлены термодиски. В собранном виде конструкция является герметичной и выдерживает давление до 3 МПа.

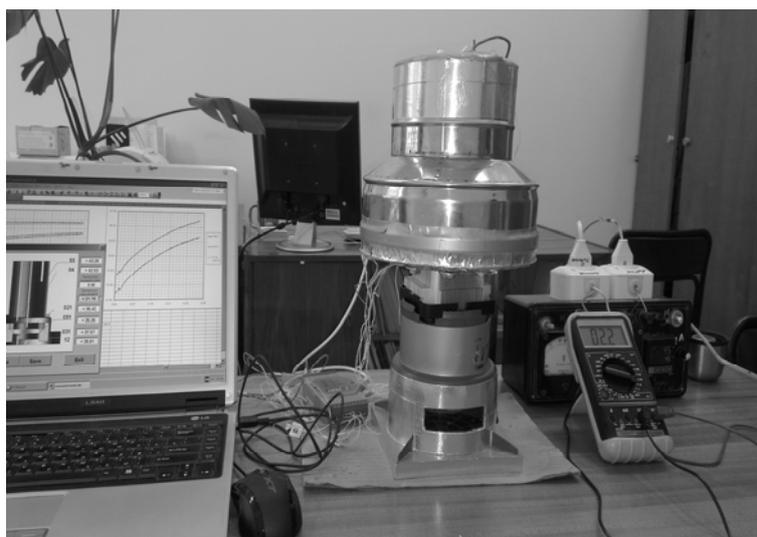
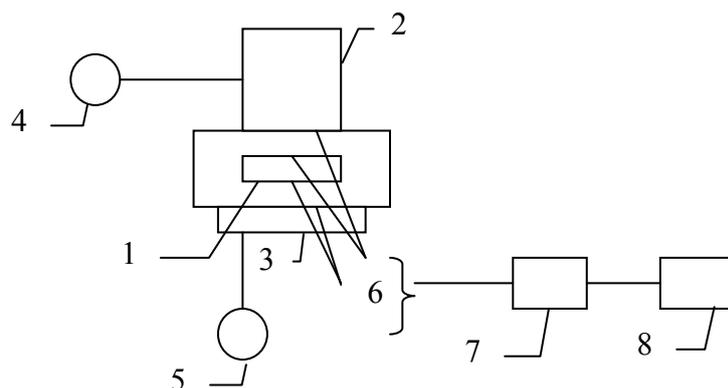


Рисунок 1 – Принципиальная схема и фотография экспериментальной установки для определения теплофизических свойств водоугольного топлива

Опытный образец водоугольного топлива объемом 25 мл помещается в специальный отсек 1. Тепловой поток, выделяемый нагревателем 2, проходит через опытный образец топлива 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 водоугольным топливом. Опытный образец водоугольного топлива 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 водоугольного топлива (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°C до $+1372^{\circ}\text{C}$, и для которых выполнена индивидуальная тарировка, обеспечивающая высокую точность измерения температур ($\pm 0,01^{\circ}\text{C}$). Показания термопар передаются на программно аппаратно-измерительный комплекс 7, который позволяет контролировать, обрабатывать и выводить на экран компьютера 8 значения параметров в режиме реального времени. Экспериментальная установка не привязана к конкретному виду водоугольного топлива, 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 значениями коэффициента

теплопроводности воды при различных температурах [6] составило 1-3 %.

Экспериментальные исследования проводились для водоугольных топлив, полученных из углей разной стадии метаморфизма, отличающихся повышенным содержанием минеральных примесей. Результаты экспериментальных исследований коэффициента теплопроводности образцов водоугольных топлив в диапазоне изменения температуры 40-150 °С и соответствующем давлении 0,1-0,3 МПа, показали, что коэффициент теплопроводности водоугольных топлив зависит, в первую очередь, от степени метаморфизма исходного угля.

Для образцов водоугольного топлива, полученного из бурого угля, коэффициент теплопроводности составляет 0,41-0,55 Вт/м·К, для образцов водоугольного топлива, полученного из углей средней стадии метаморфизма, коэффициент теплопроводности составляет 0,55-0,66 Вт/м·К, для образцов водоугольного топлива, полученного из антрацита, коэффициент теплопроводности составляет 0,67-0,82 Вт/м·К.

Таким образом, как показали экспериментальные исследования, коэффициент теплопроводности водоугольного топлива существенно увеличивается по сравнению с углем и изменяется от 0,41 до 0,82 Вт/м·К, закономерно увеличиваясь с ростом температуры в исследуемом диапазоне. Результаты исследований влияния температуры и стадии метаморфизма исходного угля на коэффициент теплопроводности водоугольных топлив приведены в [13]. На значение коэффициента теплопроводности водоугольного топлива также оказывают влияние содержание водной фазы, содержание минеральных компонентов в нем, наличие добавок и ПАВ и прочие факторы.

При определении теплопроводности большое значение имеет размер частиц в исследуемых водоугольных топливах – крупные частицы или измельченный в порошок уголь, что связано с условиями передачи тепла от частицы к частице, а также со свойствами среды, заполняющей свободные пространства между частицами угля.

Проведены экспериментальные исследования влияния размера частиц твердой фазы в водоугольных топливах, полученных из антрацита и длиннопламенного углей, на коэффициент теплопроводности топлива. Характеристика исследуемых образцов водоугольных топлив приведена в таблице 1.

При проведении экспериментальных исследований использовались образцы водоугольных топлив с размером угольных

частиц менее 200 мкм и образцы водоугольных топлив с размерами угольных частиц 2-3 мм. Результаты экспериментальных исследований влияния размера угольных частиц на коэффициент теплопроводности водоугольного топлива, полученного из антрацита, представлены на рис.2.

Таблица 1

Характеристика образцов водоугольных топлив

Исследуемое водоугольное топливо	Содержание твердой фазы, %	Зольность, %	Выход летучих, %
ВУТ из антрацита	58	1,7	2
ВУТ из длинно-пламенного угля	58	13	23

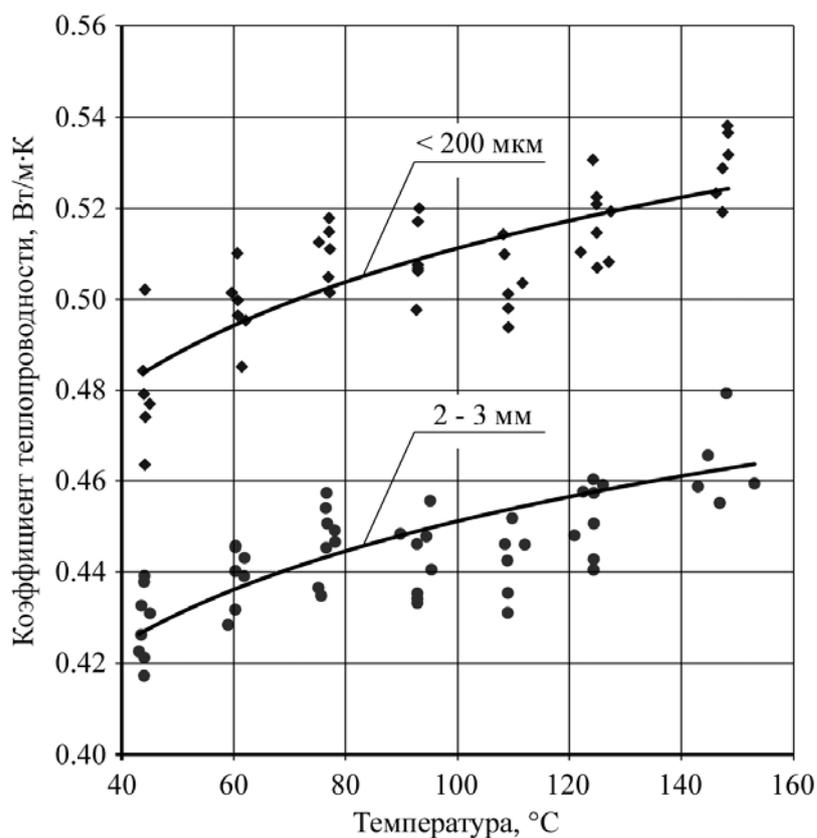


Рисунок 2 - Влияние размера угольных частиц на коэффициент теплопроводности водоугольного топлива

Как видно из полученных данных, коэффициент теплопроводности водоугольного топлива, содержащего угольные

частицы размером менее 200 мкм, в среднем, на 15-20 % выше, чем при размере угольных частиц 2-3 мм в исследуемом диапазоне температуры. Аналогичная зависимость получена для водоугольного топлива, в котором в качестве исходного угля использовался длиннопламенный уголь.

При этом следует отметить, что для крупных кусков угля коэффициент теплопроводности выше, чем у дробленого угля. К примеру, для кусков угля средней степени метаморфизма, значение коэффициента теплопроводности составляет 0,21-0,23 Вт/м·К, а для засыпок угля при объемном весе его 800 г/дм³ коэффициент теплопроводности составляет 0,11-0,12 Вт/м·К. В среднем величина коэффициента теплопроводности для дробленого угля (класс < 3 мм) составляет около 55% от соответствующей величины для кусков [10].

Различное влияние степени измельчения на коэффициент теплопроводности у водоугольных топлив и углей вызвано свойствами среды, заполняющего свободные пространства между угольными частицами, поскольку коэффициент теплопроводности воды ($\lambda=0,68$ Вт/м·К), находящейся в водоугольном топливе, примерно в 25 раз больше теплопроводности воздуха, заполняющей пространства между частицами измельченного угля. Также это является следствием специфических физико-химических свойств дисперсных систем, к которым относятся и водоугольные топлива.

Кроме того, процесс измельчения угля – это не просто уменьшение размеров частиц, приводящее к увеличению удельной поверхности за счет уменьшения геометрических размеров и вскрытия, недоступных ранее пор. Механическая активация – сложный физико-химический процесс увеличения потенциальной энергии вещества и повышения его химической активности вследствие увеличения поверхностной энергии и энергии внутреннего строения. [14, 15].

При механической активации угольного вещества существенно изменяются физико-химические свойства угольного вещества в целом. Известно, что механическая активация вызывает глубокие изменения молекулярной структуры органического вещества углей, затрагивающие весь объем угольного вещества и, в первую очередь, приводящие к разрыву связей, увеличению концентрации свободных радикалов и изменению состава функциональных групп в угле [16, 17].

Таким образом, целенаправленная модификация органического вещества угля посредством его предварительной механической активации позволяет влиять на теплотворную и реакционную

способность угля, интенсифицировать процесс термической переработки угля и управлять температурным уровнем и, как следствие, составом образующихся продуктов переработки.

Для оценки влияния механической активации угля на теплоту сгорания проведены экспериментальные исследования влияния размера частиц угля на теплоту сгорания. Анализ структуры строения углей и методика оценки энергетического потенциала угля приведены в [18]. Как показали исследования, присутствует увеличение значений теплоты сгорания исследуемых образцов угля с размером частиц 0-250 мкм до 10 % по сравнению со значениями теплоты сгорания образцов угля с размером частиц 3-5 мм. Для получения закономерностей влияния механической активации на теплотворную способность углей необходимо проведение дальнейших исследований.

Таким образом, при приготовлении водоугольных топлив происходит предварительная механическая активация угольного вещества, сопровождающаяся образованием промежуточных горючих газообразных соединений, что влияет на теплофизические свойства, теплотворную и реакционную способность водоугольных топлив и интенсифицировать процесс последующей термической переработки.

Выводы

С точки зрения технологий термической переработки наибольший интерес представляют данные о теплоемкости, тепло- и температуропроводности водоугольных топлив и их изменение в ходе термической переработки. Аналитическое описание зависимости коэффициента теплопроводности водоугольного топлива от различных параметров затруднительно из-за отсутствия физической модели, адекватной реальной структуре водоугольного топлива.

В рамках поставленной задачи по определению значений коэффициента теплопроводности водоугольных топлив разработана экспериментальная установка. Экспериментальная установка не привязана к конкретному виду водоугольного топлива, позволяет проводить исследования в широком диапазоне изменения характеристик исходного сырья.

Результаты экспериментальных исследований коэффициента теплопроводности образцов водоугольных топлив в диапазоне изменения температуры 40-150 °С показали, что коэффициент теплопроводности водоугольных топлив существенно увеличивается по сравнению с углем и изменяется от 0,41 до 0,82 Вт/м·К в

зависимости от марки исходного угля, закономерно увеличиваясь с ростом температуры в исследуемом диапазоне.

Проведены экспериментальные исследования влияния размера частиц твердой фазы в водоугольных топливах на коэффициент теплопроводности топлива. Как показали экспериментальные исследования, коэффициент теплопроводности водоугольных топлив, содержащих угольные частицы размером менее 200 мкм, в среднем, на 15-20 % выше, чем при размере угольных частиц 2-3 мм в исследуемом диапазоне температуры. Различное влияние степени измельчения на коэффициент теплопроводности у водоугольных топлив и углей вызвано свойствами среды, заполняющей свободные пространства между угольными частицами.

При приготовлении водоугольных топлив происходит предварительная механическая активация угольного вещества, сопровождающаяся образованием промежуточных горючих газообразных соединений, что влияет на теплофизические свойства, теплотворную и реакционную способность водоугольных топлив и интенсифицировать процесс последующей термической переработки.

Список литературы

1. Делягин Г. Н. Жидкое топливо на основе угольных суспензий: возможности и перспективы использования / Г. Н. Делягин, Я. М. Каган, А.С. Кондратьев // Российский химический журнал. - 1994. - № 3. - С. 22 - 27.

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

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

4. Макаров А. С. Высококонцентрированные суспензии на основе отходов углеобогащения. Получение, реологические характеристики и энергетическая ценность / А. С. Макаров., А. И. Егурнов, С. Д. Борук // Хімічна промисловість України. – 2007. - № 2 (79). – С. 56 - 60.

5. Чиркин В. С. Теплопроводность промышленных материалов / В. С. Чиркин. - М. : Машиностроение, 1957. – 172 с.

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

7. Агроскин А. А. Теплофизика твердого топлива / А. А. Агроскин. - М. : Недра, 1980. – 256 с.
8. Агроскин А. А. Физические свойства угля / А. А. Агроскин. - М. : Metallurgizdat, 1961. – 309 с.
9. Химия и переработка угля / [Липович В. Г., Калабин Г. А., Калечиц И. В. и др.] – М. : Химия, 1988. - 336 с.
10. Аронов С. Г. Химия твердых горючих ископаемых / С. Г. Аронов, Л. Л. Нестеренко. - Х. : Изд-во при Харьковском университете, 1960. - 371 с.
11. Камнева А. И. Теоретические основы химической технологии горючих ископаемых / А. И. Камнева, В. В. Платонов. – М. : Химия, 1990. – 287 с.
12. Larsen J. W. Coal macromolecular structure and reactivity / J. W. Larsen, D Lee, S. E. Shawver // Fuel Process. Techn., 1986. - V. 12. - P. 51 - 62.
13. Пинчук В. А. Экспериментальные исследования теплопроводности водоугольных суспензий / В. А. Пинчук, В. Е. Жуков, Т. А. Шарабура // Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии. Сборник научных статей. Выпуск № 2 (13) – Киев : «НПВК Триакон». – 2013. - С. 149 - 155.
14. Авакумов Е. Г. Механические методы активации химических процессов / Е. Г. Авакумов – Новосибирск : Наука, 1986. – 145 с.
15. Процессы и аппараты химических технологий. Новый справочник химика и технолога. Ч. 1 – С. - Пб. : АНО НПО «Профессионал», 2004. – 848 с., ил.
16. Полубенцев А. В. Интенсификация процессов охижения бурых и каменных углей методами механического воздействия / А. В. Полубенцев, А. Г. Пройдаков., Л. А. Кузнецова // Химия в интересах устойчивого развития. – 1999. – № 7. – С. 203 – 217.
17. Хренкова Т. М. Механохимическая активация углей / Т. М. Хренкова – М. : Недра, 1993. – 176 с.
18. Пинчук В. А. Особенности органического строения и прогнозирование энергетического потенциала углей Украины / В. А. Пинчук // Збагачення корисних копалин: науково-технічний збірник – Випуск 5. – Дніпропетровськ, 2013. – С. 123 - 135.