

УДК 662.612

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ И ТЕПЛОЕМКОСТИ ВОДОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА

Пинчук В.А.¹, Шарабура Т.А.¹, Кузьмин А.В.²¹*Национальная металлургическая академия Украины, Днепрпетровск, Украина*²*Институт технической теплофизики НАН Украины, Киев, Украина*

АННОТАЦИЯ

Экспериментально в температурном диапазоне 40...200 °С установлены зависимости комплекса теплофизических свойств водоугольного топлива, полученного из угля различной стадии метаморфизма, от соотношения твердой фазы и воды и содержания минеральных примесей.

Для определения коэффициента теплопроводности топлива использован метод комбинирования физического эксперимента и численного моделирования. Определено, что коэффициент теплопроводности водоугольного топлива существенно увеличивается по сравнению с углем и изменяется от 0,41 до 0,81 Вт/м·К в зависимости от стадии метаморфизма, закономерно увеличиваясь с ростом температуры в исследуемом диапазоне 40...200 °С. Установлено, что при увеличении содержания минеральных примесей в водоугольном топливе на 10 % коэффициент теплопроводности топлива увеличивается на 9...10 %. Увеличение содержания водной фазы приводит к уменьшению коэффициента теплопроводности и наоборот, т.е. значение коэффициента теплопроводности топлива стремится к значению коэффициента теплопроводности воды.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из технологических направлений, позволяющих существенно расширить масштабы и области применения низкосортных углей и отходов углеобогащения, является использование их в виде водоугольного топлива (ВУТ). ВУТ представляет собой дисперсную топливную систему, состоящую из тонкоизмельченного угля (60...70 %), воды (39...29 %) и реагента-пластификатора (~ 1 %). ВУТ имеет свойства, позволяющие заменить им полностью или частично твердое, жидкое или газообразное топливо в различных топливопотребляющих агрегатах. В процессе приготовления из угля удаляются нежелательные минеральные компоненты и вводятся специальные химические присадки для придания ВУТ заданных потребителем свойств, например, для увеличе-

ния степени связывания серы (в случае сжигания высокосернистых углей), повышения температуры плавления золы (в случае угрозы шлакования котла при работе на этом топливе) [1-2]. При подобранном составе топлива и соответствующей технологии его термической переработки может быть обеспечен уровень вредных выбросов с продуктами сгорания, не превышающий предельно допустимых уровней для рассматриваемой территории [3]. Кроме того, при термической переработке ВУТ возможно рациональное использование его минеральной части путем выделения редких элементов и/или для производства дорожно-строительных материалов [4].

По результатам экспериментальных исследований теплофизических свойств топлива получены эмпирические зависимости для определения коэффициентов теплопроводности и теплоемкости водоугольного топлива, как дисперсной системы, учитывающие характеристики топлива (стадия метаморфизма, содержание водной фазы, содержание минеральных примесей).

Внедрение комплексной технологии использования ВУТ позволит:

- расширить топливно-энергетическую базу промышленности за счет вовлечения низкосортных углей и отходов углеобогащения;
- снизить выбросы в атмосферу пыли и токсичных газов в пересчете на 1 кВт·ч электроэнергии, вырабатываемой на тепловых электрических станциях;
- освободить огромные территории от отходов углеобогащения и устранить загрязнение ими окружающего пространства;
- упорядочить и оптимизировать топливно-энергетический баланс предприятий по критерию минимума потребления природного газа и существенно снизить долю покупных источников энергии, а в некоторых случаях полностью отказаться от их приобретения;
- полностью или частично перейти на самообеспечение тепловой энергией предприятий угледобывающей и углеобогащающей отраслей и их социальной сферы.

ВУТ является дисперсной системой. Поэтому его теплофизические, электрические и реологические свойства существенно отличаются от характеристик составляющих его веществ. Характерной особенностью дисперсной системы является наличие большой межфазной поверхности и поверхностных явлений (адсорбции, контактных взаимодействий частиц дисперсной фазы, образование двойного электрического слоя и др.), в результате чего, дисперсные системы имеют особые молекулярно-кинетические свойства и отличаются от гетерогенных систем того же состава по целому ряду физико-химических характеристик [5].

Энергетическая эффективность и экологическая безопасность применения ВУТ в энергетике и промышленности возможна лишь на основе детального знания всего комплекса его свойств. Однако если данные по реологическим свойствам ВУТ в достаточной мере представлены в различных работах, то данных по теплофизическим свойствам практически нет. Теплофизические свойства топлива влияют на выбор технологических решений, конструкций установок и агрегатов, показатели энергопотребления, режимы эксплуатации. В расчетах теплообменных процессов при сжигании ВУТ принято теплофизические свойства ВУТ задавать по закону аддитивности [6].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ВУТ

С нашей точки зрения, одним из эффективных методов определения коэффициента теплопроводности является использование комбинирования физического эксперимента и численного моделирования [11].

При проведении физического эксперимента использовался метод сравнения, различные вариации

С точки зрения технологий термической переработки наибольший интерес представляют данные о теплоемкости и теплопроводности ВУТ и их изменение в ходе термической переработки, так как этими свойствами, в значительной степени, определяются конструктивные, технологические и режимные параметры процесса сжигания.

Поскольку при приготовлении водоугольных топлив используются различные виды углей и отходов углеобогащения, теплофизические свойства получаемых топлив оказываются весьма разнообразными. Это также определяет существенные различия в механизме переноса теплоты в ВУТ

Угли представляют собой чрезвычайно широкую по физическим и химическим свойствам гамму твердых топлив, поэтому теплофизические свойства ВУТ меняются в широких пределах.

Коэффициент теплопроводности углей меняется от 0.11 до 0.25 Вт/м·К в зависимости от ряда факторов. Добавка воды к углю должна увеличивать теплопроводность последнего в связи с тем, что коэффициент теплопроводности воды больше теплопроводности воздуха. Вода не только связывает, благодаря поверхностному натяжению, отдельные угольные частицы между собой, но и способствует переходу тепла от одной частицы к другой путем теплопроводности [7-10].

Теплоемкость углей меняется от 0.67 до 2 кДж/кг·К в зависимости от ряда факторов. Теплоемкость углей линейно возрастает с увеличением влажности, так как вода как свободная, так и связанная, имеет значительно более высокую теплоемкость, чем органическая масса угля [7-10].

В настоящее время молекулярно-статистическая и термодинамическая теория газообразного и твердого вещества разработаны настолько, что позволяют предвидеть целый ряд свойств веществ, в том числе, и теплопроводность и теплоемкость смесей. Что же касается теплофизических свойств дисперсных систем, многокомпонентных жидкостей и суспензий, единой теории, способной описать свойства этих веществ, нет. Вследствие этого, возникает необходимость проведения экспериментальных исследований для определения теплофизических свойств ВУТ, как дисперсной системы, и закономерностей протекания тепловых процессов в нем.

которого описаны в [12]. Суть метода заключается в том, что для измерений используются два одинаковых по геометрическим размерам и форме образца: эталонного и исследуемого материалов, которые помещаются в идентичные условия теплообмена. По измерениям на эталонном образце определяются неизвестные параметры теплообмена между образцом и

окружающей средой. Полученные параметры используются при решении задачи определения коэффициента теплопроводности по измерениям на образце из исследуемого материала.

В качестве метода численного моделирования использовано решение обратной задачи теплопроводности путем многократного решения прямой задачи теплопроводности. При этом недостающая информация по граничным условиям, физическим параметрам и условиям протекания реального теплового процесса определяется непосредственно в ходе проведения экспериментальных исследований на эталонном веществе и, в последующем, используется при численном моделировании.

Для проведения эксперимента по определению коэффициента теплопроводности водоугольных топлив была разработана экспериментальная установка. Экспериментальная установка состоит из измерительного участка и системы управляющих и регистрирующих приборов. Схема измерительного участка экспериментальной установки представлена на рисунке 1.

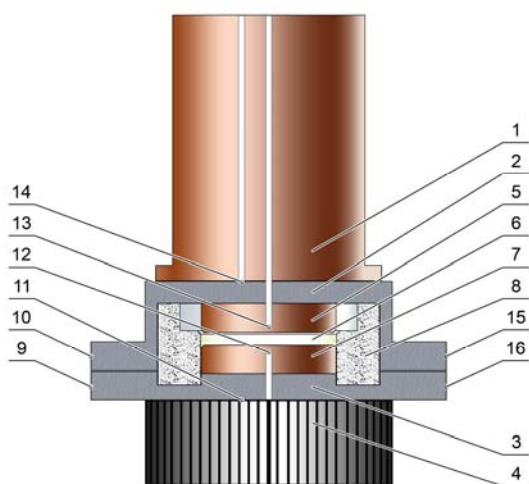


Рис. 1. Схема измерительного участка экспериментальной установки для определения коэффициента теплопроводности ВУТ.

Измерительный участок состоит из нагревателя 1, верхней 2, нижней 3 частей корпуса, выполненных из нержавеющей стали, и охладителя 4. Нагреватель выполнен из нихромовой проволоки, намотанной на массивный медный цилиндр, который теплоизолирован со всех сторон, кроме нижней части, контактирующей с верхней частью корпуса (теплоизоляция на рис. 1 не показана). Верхняя часть корпуса 2 соединена с верхним термодиском 5, изготовленным из меди, и представляет собой неразбираемую в процессе эксплуатации конструкцию. Нижняя часть корпуса соединена с нижним термодиском 7, также выпол-

ненным из меди. Для уменьшения потерь теплоты через корпус отсек для ВУТ 6 и прилегающие к нему поверхности изолированы фторопластовой вставкой 8. В верхней и нижней частях корпуса установлены термопары 9-16. Измерение температур на границах опытного образца осуществляется термопарами 12, 13, уложенными через специальные отверстия в термодисках 5 и 7, непосредственно контактирующих с образцом ВУТ.

Термопара 14 установлена на границе между нагревателем 1 и верхней частью корпуса 2, ее показания учитываются при задании температуры на верхней границе расчетного участка. Термопара 11 установлена на нижней поверхности нижней части корпуса 3 (между охладителем 4 и нижним фланцем) и используется для контроля температуры при задании условия на нижней границе расчетного участка.

Термопары 9, 10, 15, 16 установлены диаметрально на внешних боковых поверхностях верхней 2 и нижней 3 частей корпуса и предназначены для контроля потерь теплоты в радиальном направлении в окружающую среду.

Для исследований использованы хромель-алюмелевые термопары, температурный диапазон измерения которых составляет от $-270\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+1372\text{ }^{\circ}\text{C}$. Для них выполнена индивидуальная тарировка, обеспечивающая высокую точность измерения температур ($\pm 0.25\text{ }^{\circ}\text{C}$) в диапазоне от $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $250\text{ }^{\circ}\text{C}$.

В собранном виде конструкция является герметичной и выдерживает давление до 3 МПа, что позволяет проводить исследования при температурах до $200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Общая погрешность измерительных приборов составляет $0.85\text{...}1\%$.

Опытный образец ВУТ объемом 25 мл помещается в специальный отсек для топлива 6 (см. рис. 1). Тепловой поток, выделяемый нагревателем, проходит через опытный образец топлива и воспринимается охладителем. Мощность нагревателя регулируется с помощью регулятора (максимальная мощность нагревателя составляет 300 Вт). Высокая теплопроводность термодисков, изготовленных из меди, обеспечивает равномерное распределение температуры по поверхности, контактирующей с исследуемым образцом. Опытный образец ВУТ плотно, без воздушных зазоров, прилегает к поверхностям термодисков.

Охладитель представляет собой радиатор, прикрепленный к нижней поверхности корпуса. Он снабжен вентиляторами, имеющим возможность регулирования скорости вращения, что обеспечивает возможность выравнивания и поддержания необходимой температуры на охлаждаемой поверхности.

Показания термопар передаются на программно-аппаратный измерительный комплекс, который позволяет контролировать, обрабатывать и выводить на экран компьютера значения параметров в режиме реального времени.

В результате проведения физического эксперимента фиксируются значения температур в местах установки термопар и температура окружающей среды. Экспериментальная установка позволяет проводить исследования в широком диапазоне изменения характеристик исходного сырья (марки угля, количества минеральных примесей и водной фазы, крупности частиц и проч.).

Для определения коэффициента теплопроводности из полученного экспериментального распределения температур необходимо решить обратную задачу теплопроводности. В качестве метода численного решения обратной задачи теплопроводности был выбран метод многократного решения прямой задачи теплопроводности [13] с оптимизацией итераций методом золотого сечения [14]. В качестве функции, для которой методом золотого сечения находился минимум, использовалось значение среднего абсолютного отклонения расчетных и измеренных температур в контрольных точках. При построении алгоритма использовалась ортогональная равномерная расчетная сетка с шагом 0.5 мм по обеим координатам. Геометрические размеры расчетной схемы соответствовали размерам экспериментальной установки. Численное интегрирование по времени осуществлялось с шагом $\Delta\tau = 3$ с, который определен в процессе тестовых расчетов.

По результатам физического эксперимента на эталонном веществе (дистиллированная вода) и решении обратной задачи теплопроводности определялись граничные условия, физические параметры и условия протекания реального теплового процесса в необходимом диапазоне температур. Затем выполнена верификация разработанной модели путем обработки полученных экспериментальных данных. В результате верификации определены коэффициенты, необходимые для расчета конвективного теплообмена с окружающей средой.

Полученные экспериментальные данные на эталонном веществе также использовались для проверки адекватности разработанной математической модели по определению коэффициента теплопроводности. Расхождение полученных данных с известными значениями коэффициента теплопроводности воды при различных температурах составило 1...3 %.

Следующим этапом проведения исследований являлось проведение физического эксперимента на исследуемом веществе (водугольном топливе) при соблюдении идентичности условий. В процессе эксперимента фиксировалось распределение температур.

В процессе численного моделирования воспроизводились условия проведения эксперимента на водугольном топливе. Решалась нестационарная задача теплопроводности до момента достижения стационарного режима. Для выполнения расчетов в качестве первого приближения задавалось некоторое про-

извольное значение коэффициента теплопроводности ВУТ.

Из полученного стационарного распределения температур выбирались значения температур в точках, соответствующих точкам установки термопар в экспериментальной установке. Расчетные и экспериментальные значения сравнивались между собой. Если отличие между ними превышало заданную погрешность, значение коэффициента теплопроводности изменялось, и расчет повторялся.

Таким образом, в результате многократного численного решения прямой задачи теплопроводности для каждого экспериментально измеренного распределения температур получены значения коэффициентов теплопроводности ВУТ из различных марок угля.

Экспериментальные исследования проводились для водугольных топлив, приготовленных из углей разной стадии метаморфизма.

Технология приготовления образцов включала стадию мокрого измельчения в шаровой мельнице и кавитационную обработку. При приготовлении ВУТ обеспечивалось максимально возможное содержание твердой фазы, минимальная вязкость и необходимая седиментационная устойчивость. В качестве пластификатора использовался лигносульфонат натрия в количестве 1 %. Характеристики основных исследуемых образцов топлива представлены в таблицах 1...3.

Табл. 1. Характеристика исследуемых образцов ВУТ

Марка угля:	Содержание твердой фазы, %	Параметры исходного угля		
		Зольность A^c , %	Влажность W^p , %	Выход летучих V^{daf} , %
Б	58	23.31	18.5	65.5
Д	65	36.8	12.23	43.8
Г	65	60.8	3.48	45.1
Ж	70	50.5	4.11	38.6
Т	68	18	4.48	10.3
А	70	44.1	5.16	6.9

Табл. 2. Химический состав золы углей, используемых для приготовления ВУТ, %

Компоненты	Уголь марки Б	Уголь марки Д	Уголь марки Г	Уголь марки Ж	Уголь марки Т	Уголь марки А
SiO ₂	47.0	52.0	52.3	53.0	49.9	51.4
Al ₂ O ₃	18.6	24.0	25.5	21.7	22.3	22.4
Fe ₂ O ₃	11.6	14.0	12.4	16.8	17.5	15.3
CaO	18.2	2.8	3.2	3.2	4.0	3.8
MgO	2.3	1.6	1.3	1.6	1.6	1.6
K ₂ O	0.7	4.0	3.2	2.0	2.8	3.3
Na ₂ O	0.7	0.8	1.5	1.0	1.2	1.5
TiO ₂	0.9	0.8	0.6	0.7	0.7	0.7

Табл. 3. Гранулометрический состав ВУТ

Границы фракций d, мкм	Содержание фракции, % масс.
250 – 100	45.5
100 – 80	13.3
80 – 20	25.1
20 – 10	6.3
10 – 5	7.3
5 – 0	2.5

Результаты значений коэффициентов теплопроводности образцов водоугольных топлив, определенные предложенным методом комбинирования физического эксперимента и численного моделирования в диапазоне изменения температуры 40...200 °С, приведены на рисунке 2. Доверительный интервал значений коэффициента теплопроводности составляет $\lambda \pm 1.25\%$ с доверительной вероятностью 95 %.

ВЛИЯНИЕ МИНЕРАЛЬНЫХ ПРИМЕСЕЙ НА КОЭФФИЦИЕНТ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ВУТ

Минеральные примеси оказывают существенное влияние на величину коэффициента теплопроводности углей. Теплопроводность органической массы

угля значительно ниже теплопроводности минеральных компонентов. С увеличением концентрации минеральных включений плотность угля возрастает.

Как показали экспериментальные исследования, коэффициент теплопроводности ВУТ существенно увеличивается по сравнению с углем и изменяется от 0.41 до 0.81 Вт/м·К, закономерно увеличиваясь ростом температуры в исследуемом диапазоне. Различия в полученных значениях коэффициента теплопроводности позволяют предположить, что на значение коэффициента теплопроводности топлива оказывают влияние содержание водной фазы, степень метаморфизма исходного угля, содержание минеральных компонентов в нем. Также на рисунке штриховой линией нанесена известная зависимость для коэффициента теплопроводности воды. Из рисунка хорошо видно, что нет однозначного поведения данной характеристики: коэффициент теплопроводности ВУТ может быть как больше, так и меньше коэффициента теплопроводности воды.

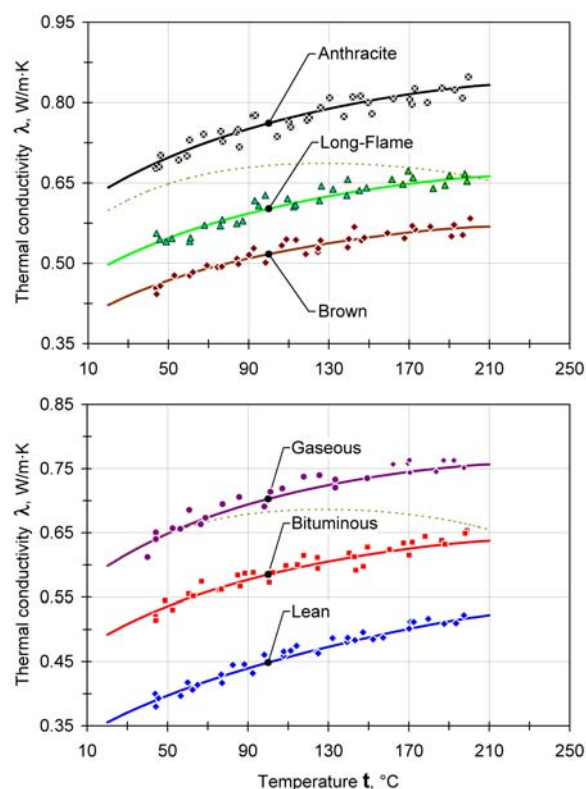


Рис. 2. Зависимость коэффициента теплопроводности от температуры для водоугольных топлив, полученных из углей различных марок.

Вследствие этого коэффициент теплопроводности углей увеличивается с возрастанием их зольности. К примеру, согласно [10] при 100 °С коэффициент теплопроводности угля зольностью 7.7 % составляет 0.116 Вт/м·К, а зольностью 25.2 % - 0.128 Вт/м·К, что на 10 % выше. В среднем можно принять, что увеличение содержания минеральных примесей в угле на 10 % приводит к увеличению коэффициента теплопроводности угля на 5.5...5.7 %.

Нами проведены экспериментальные исследования влияния количества минеральных примесей в ВУТ на коэффициент теплопроводности топлива. Для исследований использовались образцы топлива с зольностью $A^P=1.5\%$ и $A^P=30.5\%$.

Результаты экспериментальных исследований влияния содержания минеральных примесей на коэффициент теплопроводности ВУТ, представлены на примере топлива, полученного из антрацита, на рисунке 3.

Как видно из рисунка, коэффициент теплопроводности ВУТ с зольностью 30.5 %, в среднем, на 35...40 % выше, чем у ВУТ с зольностью 1.5 % в исследуемом диапазоне температур. Аналогичные результаты получены для образцов ВУТ из других марок угля.

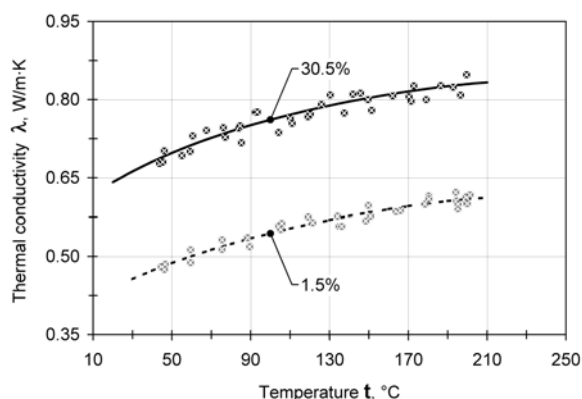


Рис. 3. Влияние содержания минеральных примесей на коэффициент теплопроводности ВУТ в исследуемом диапазоне температур

Таким образом, можно сделать вывод, что при увеличении содержания минеральных примесей в водоугольном топливе на 10 % коэффициент теплопроводности топлива увеличивается на 9...10 %.

ВЛИЯНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ВОДНОЙ ФАЗЫ НА КОЭФФИЦИЕНТ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ВУТ.

Количество водной фазы в ВУТ может составлять 25...50 %, что, естественно, также отражается на теплотехнических свойствах топлива. В процессе выполнения работы были получены экспериментальные данные для определения влияния содержания водной фазы в ВУТ на его коэффициент теплопроводности в диапазоне температур 40...200 °С. Результаты экспериментов приведены на рисунке 4.

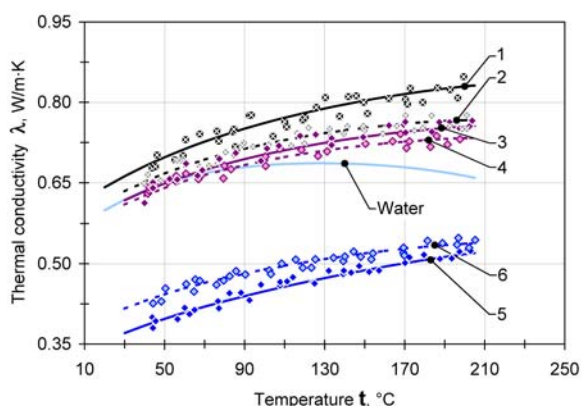


Рис. 4. Влияние содержания водной фазы на коэффициент теплопроводности ВУТ.

Обозначения на рисунке:

1, 2 - топливо из антрацита с содержанием водной фазы 30 % и 45 %; 3, 4 - топливо из газового угля с содержанием водной фазы 35 % и 42 %; 5, 6 - топливо из тощего угля с содержанием водной фазы 32 % и 45 %; 7 - вода

Из рисунка видно, что в зависимости от коэффициента теплопроводности исходного топлива, увеличение содержания водной фазы приводит к разным изменениям. Если коэффициент теплопроводности исходной композиции меньше, чем коэффициент теплопроводности воды, увеличение содержания водной фазы в топливе приводит к увеличению значения коэффициента теплопроводности, и, наоборот.

Анализ данных экспериментальных исследований влияния различных характеристик ВУТ на его коэффициент теплопроводности, представленных на рисунках 2...4, позволил обобщить результаты выражением следующего вида (коэффициент детерминации R^2 составляет 0.9...0.97):

$$\lambda = \lambda_{прив} \cdot f(W) \cdot f(A) \cdot f(M) + \lambda_w \cdot W^P, (1)$$

Где $\lambda_{прив}$ - приведенный коэффициент теплопроводности угольного вещества, Вт/(м·К);

$f(W)$ -

функция, учитывающая влияние содержания водной фазы в водоугольном топливе;

$f(A)$ - функция, учитывающая влияние содержания минеральных примесей в водоугольном топливе;

$f(M)$ - функция, учитывающая влияние стадии метаморфизма исходного угля в водоугольном топливе;

λ_w - коэффициент теплопроводности воды, значение которого зависит от температуры, Вт/(м·К);

W^p - влажность ВУТ на рабочую массу, масс. доли.

Приведенный коэффициент теплопроводности угольного вещества определяется по формуле:

$$\lambda_{прив} = \lambda_y \cdot (1 - A^c) + \lambda_{м.п.} \cdot A^c, \quad (2)$$

где λ_y - коэффициент теплопроводности органической массы угля при 20 °С (значения λ_y приведены в таб. 4 в зависимости от марки угля), Вт/(м·К);

$\lambda_{м.п.}$ - коэффициент теплопроводности минеральных примесей при 20 °С (среднее значение для минеральных примесей в углях Украины $19.8 \cdot 10^{-2}$ Вт/(м·К));

A^c - зольность на сухую массу ВУТ, масс. доли;

Функция, учитывающая влияние содержания водной фазы в водоугольном топливе, определяется следующим эмпирическим выражением:

$$f(W) = k_w \cdot (1 - W^p)^{1.21}, \quad (3)$$

где k_w - коэффициент, учитывающий влияние температуры t . Он получен из обработки экспериментальных данных и определяется по эмпирической формуле:

$$k_w = 20 - 34 \cdot (t + 150)^{-0.15}, \quad (4)$$

Функция, учитывающая влияние стадии метаморфизма исходного угля в водоугольном топливе, определяется по эмпирической формуле:

$$f(M) = k_m \cdot t + b_m, \quad (5)$$

где k_m , b_m - коэффициенты, определяемые из экспериментальных данных и учитывающие влияние стадии метаморфизма исходного угля в водоугольном топливе. Их значения приведены в таблице 4; t - температура, °С.

Функция, учитывающая влияние содержания минеральных примесей в водоугольном топливе, определяется эмпирическим соотношением:

$$f(A) = k_a \cdot A^c + b_a, \quad (6)$$

где k_a , b_a - коэффициенты, учитывающие влияние температуры t . Получены в результате обработки экспериментальных данных и обобщены следующими эмпирическими зависимостями:

$$k_a = 0.67 + 1.66 \cdot 10^{-4} \cdot |t - 225|^{1.4}, \quad (7)$$

$$b_a = 0.71 + 7.5 \cdot 10^{-5} \cdot |t - 225|^{1.4}. \quad (8)$$

Табл. 4. Значения эмпирических коэффициентов для определения коэффициента теплопроводности ВУТ

Коэффициенты	Марка угля					
	Б	Д	Г	Ж	Т	А
$k_m \cdot 10^4$	14.4	6.31	0.91	1.6	9.3	0
b_m	0.27	0.79	0.81	0.66	0.49	1
$\lambda_y \cdot 10^2$, Вт/(м·К)	17.5	11.6	11.4	11.9	13.4	14.9

В зависимостях (7) и (8) знак $|\dots|$ обозначает модуль (абсолютную величину).

Полученные эмпирические формулы (1)...(8) совместно со значениями из таблицы 4 могут использоваться для определения коэффициента теплопроводности ВУТ. Эти соотношения справедливы при $W^p = 25...50\%$ и $A^c = 0.5...60\%$ в температурном диапазоне 40...200 °С. На рисунках 2...4 все сплошные линии соответствуют расчетным значениям коэффициента теплопроводности, полученным с помощью системы (1)...(8). Точками нанесены результаты экспериментов. Как видно из рисунков, предложенные соотношения хорошо согласуются с экспериментальными данными.

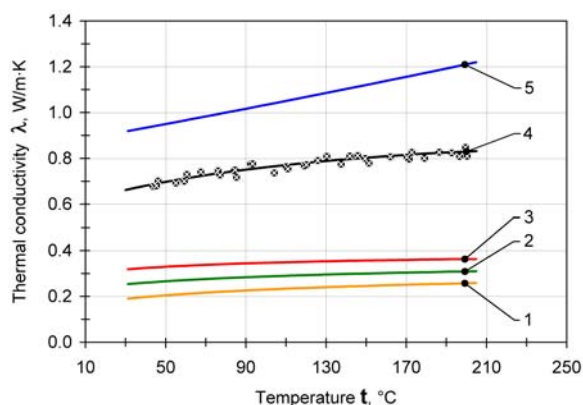


Рис. 5. Сравнение значений коэффициента теплопроводности ВУТ при использовании различных эмпирических зависимостей

Нами выполнено сравнение значений коэффициента теплопроводности ВУТ, полученных по предлагаемым эмпирическим выражениям, со значениями коэффициента теплопроводности, рассчитанными по известным формулам для композиционных материалов и систем [10, 15, 16]. Результаты сравнения приведены на рисунке 5 на примере ВУТ из антрацита.

Обозначения на рисунке соответствуют:

1 - формула Эйкена [10];

- 2 - формула Г.Н. Дульнева [16];
3 - закон аддитивности [6];
4 - система уравнений (1)...(8) с учетом коэффициентов табл. 4;
5 - формула А.Ф. Чудновского [10].

Как видно из полученных результатов сравнения, значения коэффициента теплопроводности, рассчитанные по формулам Эйкена, Г.Н. Дульнева и по закону аддитивности, в 2...3.5 раза ниже реальных значений коэффициента теплопроводности, а величины, рассчитанные по формуле А.Ф. Чудновского для влажного твердого топлива, на 60 % выше реальных значений коэффициента теплопроводности.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОЕМКОСТИ ВУТ

Для определения значений теплоемкости ВУТ с учетом рекомендаций [17-19] использовался калориметрический метод. Для этого разработана экспериментальная установка, принципиальная схема рабочего участка которой приведена на рисунке 6.

Рабочий участок представляет собой адиабатический калориметр. Контейнер калориметра 1 выполнен из латуни, сверху закрывается крышкой 2 на резьбовом соединении. В собранном виде конструкция является герметичной и выдерживает давление до 3 МПа. В крышке калориметра выполнено отверстие, через которое внутрь латунного контейнера герметично заведена хромель-алюмелевая термопара 3.

Для подвода тепла к содержимому контейнера используется намотанный на наружную поверхность контейнера нагреватель 4 из нихромовой проволоки диаметром 0.25 мм. Этот же нагреватель используется для компенсации возможных потерь тепла, при этом он работает в режиме термостатирования. Для контроля теплового состояния контейнера на его боковой стенке и на нижнем торце зачеканены термопары (на рисунке не показаны). В процессе измерений контейнер помещается в теплоизолированную оболочку 5 и далее - в сосуд Дьюара (на рисунке не показан).

Опытный образец ВУТ заданной массы помещается внутрь контейнера, герметично закрывается. Термопара 3 погружается в топливо. С помощью нагревателя содержимое контейнера нагревается до температуры, при которой необходимо провести измерения. При достижении заданной температуры нагреватель с помощью программно-аппаратного комплекса 8 переводится в режим термостатирования. Для обеспечения высокой точности термостатирования используются показания термопар, расположенных на боковой стенке и на нижнем торце контейнера. В таком режиме установка работает до выхода на стационарный режим, достижение которого определяется по показаниям термопары, находящейся в топливе.

После выхода на стационарный режим происходит фиксирование температуры топлива t_1 , затем посредством программно-аппаратного комплекса 8 нагреватель включается на заданный промежуток времени (около 10 с), в течение которого происходит нагрев образца. При этом амперметром 6 фиксируется значение подводимой силы тока, а вольтметром 7 - значения напряжения. Через заданный интервал времени нагреватель отключается и возвращается в режим термостатирования для компенсации потерь (если это необходимо). Далее установка опять работает до достижения стационарного режима, по окончании которого опять происходит фиксация температуры топлива t_2 . Эксперимент повторяется при следующих заданных температурах. Общая погрешность измерительных приборов составляет 0.85... 1 %.

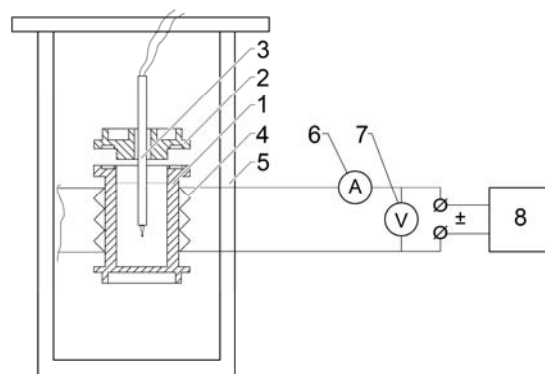


Рис. 6. Схема рабочего участка экспериментальной установки для определения теплоемкости ВУТ: 1 – контейнер; 2 – крышка контейнера; 3 – хромель-алюмелевая термопара; 4 – нагреватель; 5 - теплоизолированная оболочка; 6 – амперметр; 7 – вольтметр; 8 – программно-аппаратный измерительный комплекс

Полученные экспериментальные данные позволяют рассчитать теплоемкость ВУТ по известному выражению:

$$c = \frac{k_c \cdot Q}{m \cdot (t_2 - t_1)}, \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)} \quad (9)$$

где Q - количество подведенной энергии (определяется по экспериментальным замерам), кДж;

k_c - константа системы, определяемая из верификационных экспериментов;

m - масса ВУТ (определяется до эксперимента с помощью электронных весов ТВЕ-0.21-0.001), кг;

t_1, t_2 - значения температуры ВУТ соответственно до и после подвода энергии (определяются термопарой 3, расположенной в топливе), К.

Перед экспериментальными исследованиями теплоемкости ВУТ для определения констант системы и погрешностей измерений проводилась серия тестовых экспериментов на эталонном веществе (дистиллированной воде). Расхождение полученных данных с известными значениями теплоемкости воды при различных температурах составило не более 4 %.

Значения теплоемкости образцов ВУТ, полученные в экспериментальных исследованиях в диапазоне изменения температуры 40...200 °С, приведены на рисунке 7. Доверительный интервал значений теплоемкости составляет $c \pm 0.93\%$ с доверительной вероятностью 95 %.

ВЛИЯНИЕ МИНЕРАЛЬНЫХ ПРИМЕСЕЙ НА ТЕПЛОЕМКОСТЬ ВУТ

С целью определения влияния зависимости теплоемкости ВУТ от количества минеральных примесей, содержащихся в исходном угле, проведен ряд экспериментальных исследований. Исследованные образцы ВУТ, отличались различной степенью метаморфизма. Для каждого образца из одной марки угля исследовались несколько вариантов топлива с разным содержанием минеральных примесей.

Результаты экспериментальных исследований представлены на примере топлива, полученного из бурого угля (1, 2) и антрацита (3, 4), на рисунке 8.

В скобках рядом с обозначениями кривых указаны массовые % содержания минеральных примесей в углях, использовавшихся для приготовления образцов топлива. Как видно из полученных данных, значение теплоемкости ВУТ в исследуемом диапазоне температур уменьшается с увеличением содержания минеральных примесей. Аналогичные закономерности получены и для углей других марок.

Из рисунка 7 хорошо видно, что теплоемкость ВУТ существенно увеличивается, по сравнению с углем, и изменяется от 3.5 до 6.5 кДж/кг·К, увеличиваясь с ростом температуры в исследуемом диапазоне.

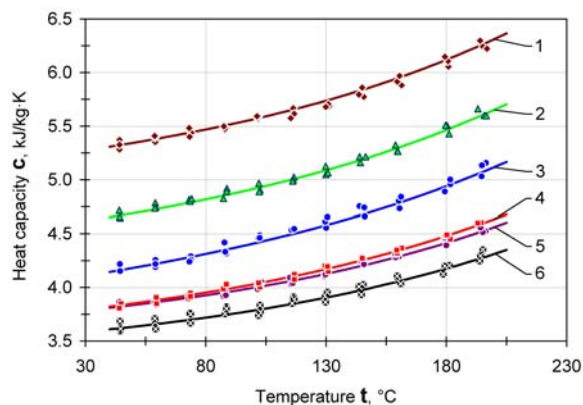


Рис. 7. Зависимость теплоемкости от температуры для водоугольных топлив, полученных из углей различных марок: 1 - марка Б, 2 - марка Д, 3 - марка Т, 4 - марка Ж, 5 - марка Г, 6 - марка А.

Различия в полученных значениях теплоемкости показывают, что ее величина в значительной мере определяется степенью метаморфизма исходного угля, содержанием водной фазы и минеральных примесей в топливе.

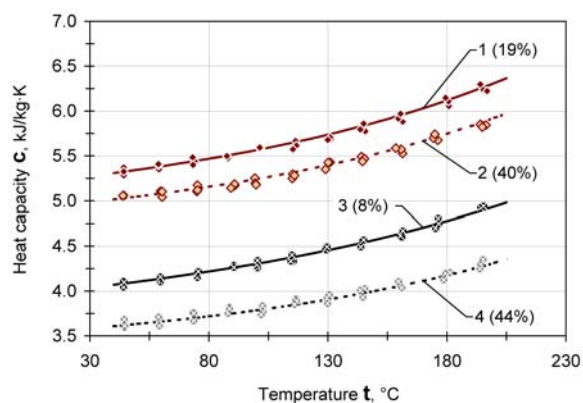


Рис. 8. Влияние содержания минеральных примесей на теплоемкость ВУТ в исследуемом диапазоне температур.

ВЛИЯНИЕ КОЛИЧЕСТВА ВОДНОЙ ФАЗЫ В ВУТ НА ЕГО ТЕПЛОЕМКОСТЬ.

Также как и в случае с коэффициентом теплопроводности, теплоемкость ВУТ зависит от количества воды, содержащейся в суспензии. Для получения закономерностей влияния количества водной фазы в водоугольном топливе на его теплоемкость были выполнены экспериментальные исследования образцов топлива из углей различных марок с различным содержанием воды. Результаты этих исследований представлены на примере топлива, полученного из бурого угля и антрацита, на рисунке 9. Номерами 1 и 2 на рисунке обозначены зависимости для бурого угля, 3 и 4 – для антрацита. Содержание водной фазы в % массы в каждом из образцов указано в скобках рядом с соответствующим обозначением образца угля.

Для сравнительного анализа на рисунке также приведена справочная кривая теплоемкости воды для заданного диапазона температур, обозначенная цифрой 5.

Как видно из полученных данных, влияние водной фазы проявляется в том, что при увеличении ее содержания значение теплоемкости ВУТ стремится к значению теплоемкости воды. Изменение теплоемкости ВУТ при изменении количества водной фазы тем меньше, чем ближе значение теплоемкости топлива к значению теплоемкости воды. Такое поведение характеристики хорошо согласуется с поведением коэффициента теплопроводности, которое обсуждалось выше.

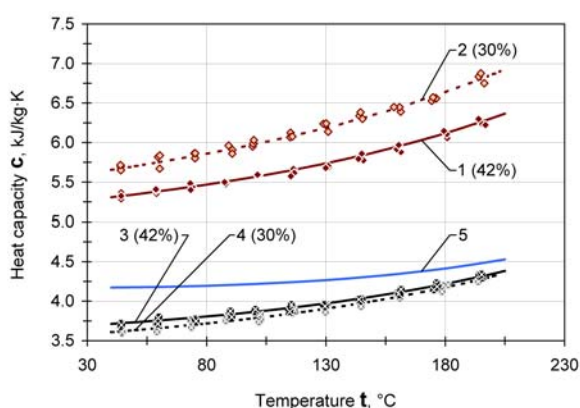


Рис. 9. Влияние содержания водной фазы на теплоемкость ВУТ в исследуемом диапазоне температур:

Обобщение результатов данных экспериментальных исследований влияния характеристик ВУТ на его теплоемкость позволило получить выражение следующего вида (коэффициент детерминации R^2 составляет 0.9...0.97):

$$c = c_{прив} \cdot f(W) \cdot f(A) \cdot f(M) + c_w \cdot W^p, (10)$$

где $c_{прив}$ – приведенная теплоемкость угольного вещества, кДж/(кг·К);
 $f(W)$ – функция, учитывающая влияние содержания водной фазы в водоугольном топливе;
 $f(A)$ – функция, учитывающая влияние содержания минеральных примесей в водоугольном топливе;
 $f(M)$ – функция, учитывающая влияние стадии метаморфизма исходного угля в водоугольном топливе;
 c_w – теплоемкость воды, значение которой зависит от температуры, кДж/(кг·К);
 W^p – влажность ВУТ на рабочую массу, масс. доли.
 Приведенная теплоемкость угольного вещества определяется по формуле:

$$c_{прив} = c_y \cdot (1 - A^c) + c_{м.п.} \cdot A^c, (11)$$

где c_y – теплоемкость органической массы угля, кДж/(кг·К). (см. таблицу 5);
 A^c – зольность на сухую массу ВУТ, масс. доли;
 $c_{м.п.}$ – теплоемкость минеральных примесей при 20 °С, которая определяется по известной формуле [10]:

$$c_{м.п.} = (0.18 + 7 \cdot 10^{-5} \cdot [t + 273]) \cdot 4.19, (12)$$

Табл. 5. Значение теплоемкости органической массы угля c_y , кДж/(кг·К) для углей различных марок [10]

Температура, °С	Марка угля					
	Б	Д	Г	Ж	Т	А
20	1.15	1.12	1.13	1.09	1.00	0.93
100	1.28	1.33	1.31	1.26	1.17	1.06
150	1.45	1.43	1.41	1.37	1.28	1.15
200	1.54	1.56	1.52	1.48	1.39	1.23

Функцию, учитывающую влияние содержания водной фазы в водоугольном топливе, предложено определять по следующему выражению:

$$f(W) = b_w \cdot (1 - W^p), (13)$$

где b_w - коэффициент, полученный из экспериментальных данных, учитывающий влияние температуры t . Его значение определяется по формуле:

$$b_w = 3.63 + 5 \cdot 10^{-6} \cdot |t - 60|^{2.2}, \quad (14)$$

Функцию $f(A)$ предлагается определять следующим соотношением:

$$f(A) = k_a \cdot A^c + b_a, \quad (15)$$

где k_a , b_a - коэффициенты, определяемые из экспериментальных данных, учитывающие влияние температуры t и определяющиеся по формулам:

$$k_a = 0.001 \cdot t - 0.41, \quad (16)$$

$$b_a = 1.18 - 4 \cdot 10^{-4} \cdot t. \quad (17)$$

Функция, учитывающая влияние стадии метаморфизма исходного угля в водоугольном топливе, определяется по формуле:

$$f(M) = b_m - k_m \cdot t, \quad (18)$$

де k_m , b_m - коэффициенты, определяемые из экспериментальных данных и учитывающие влияние стадии метаморфизма исходного угля в водоугольном топливе. Их значения для разных марок угля приведены в таблице 6);

t - температура, °С.

Табл. 6. Значения коэффициентов для определения теплоемкости ВУТ

Коэффициенты	Марка угля					
	Б	Д	Г	Ж	Т	А
$k_m \cdot 10^5$	20.7	12.1	6.5	5.5	5.2	4.4
b_m	1.64	1.3	1.08	1.04	1.03	1

Предложенные формулы (10)...(18) для определения теплоемкости ВУТ справедливы при

ВЫВОДЫ

1. Одним из эффективных методов определения коэффициента теплопроводности является использование комбинирования физического эксперимента и численного моделирования. При проведении физического эксперимента предлагается использовать метод сравнения. В качестве метода численного моделирования использовано решение обратной задачи тепло-

проводности $W^p=25...50\%$ и $A^c=0.5...60\%$ в температурном диапазоне 40...200 °С. Рассчитанные с их помощью значения теплоемкости ВУТ для образцов топлива из углей различной стадии метаморфизма с разным содержанием минеральных примесей и водной фазы приведены на рисунках 7...9 в виде линий. Как видно, данные соотношения качественно и количественно хорошо согласовываются с результатами экспериментов, обозначенными точками.

Проведено сравнение значений теплоемкости ВУТ, полученных по предлагаемым эмпирическим соотношениям (10)...(18), и значений теплоемкости, полученных по известным выражениям для влажного угля или смеси воды и топлива [10]. Результаты сравнения приведены на рисунке 10 на примере ВУТ из антрацита. Результаты сравнения показали, что значения теплоемкости, рассчитанные по известным зависимостям, в 1.5...3 раза ниже реального значения теплоемкости ВУТ.

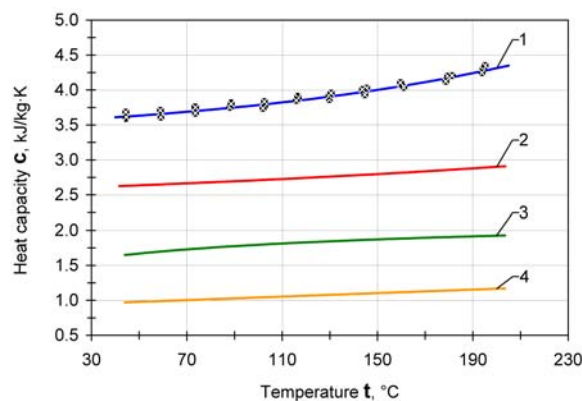


Рис. 10. Сравнение значений теплоемкости ВУТ при использовании различных зависимостей

Цифрами на рисунке 10 обозначены следующие зависимости:

- 1 - расчет по формулам (10)...(18);
- 2 - закон аддитивности [6];
- 3 - формула И. Д. Кленденина [10];
- 5 - формула А. А. Агроскина [10]

проводности путем многократного решения прямой задачи теплопроводности. В рамках поставленной задачи по определению значений коэффициента теплопроводности водоугольных топлив разработана экспериментальная установка, методика проведения эксперимента и физико-математическая модель.

2. Экспериментальные исследования проводились для водоугольных топлив, полученных из углей разной стадии метаморфизма, отличающихся повышенным содержанием минеральных примесей. Как показали экспериментальные исследования, коэффициент теплопроводности ВУТ существенно увеличивается по сравнению с углем и изменяется от 0.41 до 0.81 Вт/м·К в зависимости от стадии метаморфизма, закономерно увеличиваясь с ростом температуры в исследуемом диапазоне 40...200 °С. Установлено, что при увеличении содержания минеральных примесей в водоугольном топливе на 10 % коэффициент теплопроводности топлива увеличивается на 9...10 %. Увеличение содержания водной фазы приводит к уменьшению коэффициента теплопроводности и наоборот, т.е. значение коэффициента теплопроводности топлива стремится к значению коэффициента теплопроводности воды.

3. Для определения значений теплоемкости ВУТ использовался калориметрический метод, разработа-

на экспериментальная установка и проведены исследования для водоугольных топлив, полученных из углей разной стадии метаморфизма. Как показали экспериментальные исследования, теплоемкость ВУТ существенно увеличивается по сравнению с углем и изменяется от 3.5 до 6.5 кДж/кг·К, увеличиваясь с ростом температуры в исследуемом диапазоне 40...200 °С. Установлено, что значение теплоемкости ВУТ в исследуемом диапазоне температур уменьшается с увеличением содержания минеральных примесей. Влияние водной фазы проявляется в том, что при увеличении ее содержания значение теплоемкости ВУТ стремится к значению теплоемкости воды.

4. По результатам экспериментальных исследований теплофизических свойств топлива получены эмпирические зависимости для определения коэффициентов теплопроводности и теплоемкости ВУТ, как дисперсной системы, учитывающие характеристики топлива (стадия метаморфизма, содержание водной фазы, содержание минеральных примесей).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мальцев Л. И. Сжигание каменного угля в виде водоугольной суспензии в котлах малой мощности / Л. И. Мальцев, И. В. Кравченко, С. И. Лазарев, Д. А. Лапин // Теплоэнергетика. – 2014. – № 7. – С. 25 - 30.
Maltsev, L.I., Kravchenko, I.V., Lazarev, S.I. and Lapin, D.A., (2014) Combustion of coal as coal-water suspension in the low power boilers [Szhiganiye kamennogo uglya v vide vodougolnoy suspenzii v kotlakh maloy moshchnosti], *Teploenergetika*, No.7, PP. 25 - 30.
2. 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
Delyagin, G.N., Kagan, Ya.M. and Kondratyev, A.S., (1994) Liquid fuel from coal suspensions: features and perspectives of use [Zhidkoe toplivo na osnove ugolnykh suspenzy: vozmozhnosti i perspektivy ispolzovaniya], *Russian Chemical Journal*, No.3. PP. 22 - 27
3. Пинчук В. А. Влияние характеристик водоугольного топлива на закономерности процесса его горения / В. А. Пинчук // Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии. – Днепропетровск : НППК «Триакон», 2014. – Вып. 2(15) – С. 78 - 84. doi: 10.23877/MS.TS.18.016.
Pinchuk, V.A., (2014) The influence of various physical and chemical parameters of coal-water fuel on the characteristics of its combustion process [Vli-
4. Sharabura, T.A., Pinchuk, V.A. and Devčić, N., (2012). Ecological aspects of the thermal processing of water-coal fuel, Summaries of lectures of the 10th international symposium of Croatian Metallurgical Society SHMD '2012. In Materials and Metallurgy p. 429.
5. Улитин М. В. Физико-химические свойства, устойчивость и коагуляция лиофобных дисперсных систем: учеб. пособие // М. В. Улитин, Д. В. Филиппов, М. В. Лукин. – Иваново: ГОУ ВПО Иван. хим.-технол. ун-т, 2007. – 108 с.
Ulitin, M.V., Filippov, D.V. and Lukin, M.V., (2007) Physical-chemical properties, stability and coagulation of lyophobic disperse systems [Fiziko-khimicheskie svoystva, ustoychivost i koagulyatsiya liofobnykh dispersnykh sistem] TextBook, Ivanovo: Ivanovo State University of Chemistry and Technology, 108 pp.
6. Попов В. И. Реологические и теплофизические свойства водоугольных суспензий / В. И. Попов, Ю. А. Коваленко, А. А. Борисов // Теплоэнергетика. – 1995. – № 8. – С. 39 - 43.
Popov, V.I., Kovalenko, Yu.A. and Borisov, A.A., (1995) Rheological and thermal physical properties of coal-water suspensions [Reologicheskie i teplofizicheskie svoystva vodougolnykh suspenzy], *Teploenergetika*, No.8, PP. 39 - 43.

7. Агроскин А. А. Химия и технология угля / А. А. Агроскин. – М. : Недра, 1969. – 240 с.
Agroskin, A.A., (1969) Chemistry and thechnology of coal [Khimiya i tekhnologiya uglya], Moscow: Nedra, 240 pp.
8. Аронов С. Г. Химия твердых горючих ископаемых / С. Г. Аронов, Л. Л. Нестеренко. – Х. : Изд-во при Харьковском университете, 1960. – 371 с.
Aronov, S.G. and Nesterenko, L.L., (1960) Solid fossil fuels chemistry [Khimiya tverdykh goryuchikh iskopaemykh], Kharkov: Publishing House of Kharkov University, 371 pp.
9. Химия и переработка угля / В. Г. Липович, Г. А. Калабин., И. В. Калечиц [и др.]. – М. : Химия, 1988. – 336 с.
Lipovich, V.G., Kalabin, G.A., Kalechits, I.V., et al., (1988) Coal chemistry and processing [Khimiya i pererabotka uglya], Moscow: Khimiya, 336 pp.
10. Агроскин А. А. Теплофизика твердого топлива / А. А. Агроскин. – М. : Недра, 1980. – 256 с.
Agroskin, A.A., (1980) Thermal physic of solid fuel [Teplofizika tverdogo topliva], Moscow: Nedra, 256 pp.
11. Пинчук В. А. Определение коэффициента теплопроводности водоугольного топлива методом комбинирования физического эксперимента и математического моделирования / В. А. Пинчук // Системні технології. Регіональний міжвузівський зб. наук. праць. – Дніпропетровськ : ДНВП «Системні технології», 2014. – Вип. 3 (92). – С. 66 - 76.
Pinchuk, V.A., (2014) Determination of the thermal conductivity coefficient of coal-water fuel by combination of physical experiment and numerical modeling methods [Opredelenie koeffitsienta teploprovodnosti vodougolnogo topliva metodom kombinovaniya fizicheskogo eksperimenta i matematicheskogo modelirovaniya], Systemni tekhnolohiyi. Regional Interuniversity collection of scientific papers, – Dnepropetrovsk: DNVP “Systemni tekhnolohiyi”, 3(92), PP. 66 - 76.
12. Чиркин В. С. Теплопроводность промышленных материалов / В. С. Чиркин. – М. : Машиностроение, 1957. – 172 с.
Chirkin, V.S., (1957) Thermal conductivity of industrial materials [Teploprovodnost promyshlennykh materialov], Moscow: Mashinostroenie, 172 pp.
13. Лыков А. В. Теория теплопроводности / А. В. Лыков. – М.: «Высшая школа», 1967. – 599 с.
Lykov, A.V., (1967) Theory of the thermal conductivity [Teoriya teploprovodnosti], Moscow: Vysshaya shkola, 599 pp.
14. Моисеев Н. Н. Методы оптимизации: Учеб. пособие для вузов / Н. Н. Моисеев, Ю. П. Иванюков, Е. М. Столярова. – М. : Наука, 1978. – 351 с.
Moiseev, N.N., Ivanilov, Yu.P. and Stolyarova, E.M., (1978) Optimization methods [Metody optimizatsii]: TextBook, Moscow: Nauka, 351 pp.
15. Чудновский А. Ф. Теплофизические характеристики дисперсных материалов / А. Ф. Чудновский. – М. : Физматлит, 1962. – 456 с.
Chudnovsky, A.F., (1962) Thermal physical characteristics of dispersed materials [Teplofizicheskie kharakteristiki dispersnykh materialov], Moscow: Fizmatlit, 456 pp.
16. Дульнев Г. Н. Теплопроводность смесей и композиционных материалов / Г. Н. Дульнев, Ю. П. Заричняк. – Л. : Энергия, 1974. – 264 с.
Dulnev, G.N., Zarichnyak, Yu.P., (1974) Thermal conductivity of mixtures and composition materials [Teploprovodnost smesey i kompozitsionnykh materialov], Leningrad: Energiya, 264 pp.
17. Преображенский В. П. Теплотехнические измерения и приборы / В. П. Преображенский. – М. : Энергия, 1978. – 704 с.
Preobrazhensky, V.P., (1978) Heat engineering measurements and instruments [Teploekhnicheskie izmereniya i pribory], Moscow: Energiya, 704 pp.
18. Тепло и массообмен. Технический эксперимент: Справочник / под общ. ред. В. А. Григорьева, В. М. Зорина. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 560 с.
Grigoryev, V.A. and Zorin, V.M. Eds., (1983) Heat and mass transfer. Technical experiment [Teplo i massoobmen. Tekhnichesky eksperiment]. Handbook, Moscow: Energoatomizdat, 560 с.
19. Геращенко О. А. Температурные измерения: Справочник / О. А. Геращенко, А. Н. Гордов, В. И. Лах [и др.]. – К.: Наукова думка, 1984. – 704 с.
Gerashchenko, O.A., Gordov, A.N., Lakh, V.I., et al., (1984) Temperature measurements [Temperaturnye izmereniya]. Handbook, Kiev: Naukova dumka, 704 pp.