

УДК 697.32

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СПОСОБА УПРАВЛЕНИЯ СТРУКТУРНО-РЕОЛОГИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ВОДОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА**Чернецкая-Белецкая Н.Б., Баранов И.О., Мирошникова М.В.****IMPROVEMENT METHOD OF MANAGEMENT STRUCTURAL AND RHEOLOGICAL CHARACTERISTICS COAL-WATER FUEL****Chernetskaya N. Baranov I., Miroshnykova M.**

В статье рассмотрены важнейшие условия надежной и эффективной работы гидротранспортного топливно-энергетического комплекса и технологического процесса приготовления водоугольного топлива. Выполнен анализ фундаментальных исследований в области развития технологий приготовления и транспортирования водоугольного топлива. Выполнено сравнение фактического и расчетного перепадов давления топлива, полученных при использовании коэффициентов реологической модели. Предложен способ управления структурно-реологическими характеристиками водоугольного топлива в процессе его приготовления.

Ключевые слова: водоугольное топливо, перепад давления, реологические характеристики, модель, углепровод, гидротранспортирование.

Введение. Современное топливо должно отвечать жестким требованиям современного рынка, таким как стабильные значения основных технологических характеристик, задаваемых потребителем, рентабельность производства и минимальное возможное опасное экологическое воздействие на окружающую среду при его получении и использовании.

В связи с этим становится актуальным использование угля в виде водоугольного топлива (ВУТ), разработка эффективных процессов получения и применения которого должна базироваться на научно обоснованных методах физического и физико-химического воздействия на исходный уголь с учетом свойств его органической и минеральной составляющих [1].

Постановка проблемы. Важнейшим условием надежной и эффективной работы гидротранспортного топливно-энергетического комплекса на основе водоугольного топлива является сохранение стабильных значений структурно-реологических характеристик (параметров гранулометрического состава и эффективной вязкости) при изменении качества углей (влажности и зольности). Одним из основных

параметров гранулометрического состава является диаметр частиц d_{50} , характеризующий размер частиц, при котором 50 % частиц меньше d_{50} и 50 % более d_{50} .

Получение гранулометрического распределения частиц твердой фазы, близкого к бимодальному, в суспензии является одной из важнейших задач технологического процесса приготовления водоугольного топлива с приемлемыми значениями массовой доли твердой фазы и реологических характеристик. В базовом технологическом процессе обеспечение близкого к бимодальному гранулометрического распределения угольных частиц осуществляется использованием двухстадийного мокрого измельчения угля в шаровой и стержневой мельницах.

Для определения способов влияния на параметры гранулометрического распределения частиц твердой фазы при базовом способе приготовления ВУТ были исследованы регрессионные зависимости указанных параметров от производительности каждой стадии мокрого измельчения в условиях опытного промышленного углепровода (рис.1.). Достаточно высокие значения коэффициентов множественной корреляции (соответственно 0,81 и 0,84) свидетельствуют о высокой надежности найденных уравнений связи. В процессе комплексного опробования также было установлено, что на операции микромола в шаровой мельнице оптимальное значение массовой доли твердой фазы находится в пределах от 45 до 49%. При этом меньшее значение следует принимать при зольности угля более 14%, а большее при зольности менее 14%.

Анализ последних исследований и публикаций. Фундаментальные исследования в области развития технологий приготовления и транспортирования ВУТ принадлежат таким известным ученым как: В. Е. Зайденварг, К. Н. Трубецкой, В. И. Мурко, И.

Х. Нехороший. Особый вклад в развитие технологий водоугольного топлива внес Г. Н. Делягин.

При выполнении работы были проанализированы и исследованы разработки НПО ЦКТИ, ОПУ Белово-Новосибирск, ученых Н.С. Рассудова, В.В. Манцева и др. Основную веху исследования вопросов управления структурно-реологическими характеристиками ВУТ закрепил С.П. Костовецкий.

Цель статьи. **В работе ставится задача улучшения способа управления технологическим процессом** приготовления ВУТ, который позволяет стабилизировать основной интегральный показатель - удельные потери напора при транспортировании и получить требуемые параметры гранулометрического распределения при изменении свойств угля.

Результаты исследований. Важным условием надежности работы линейной части системы является стабильность реологических характеристик ВУТ, обеспечивающая эффективный гидротранспорт топлива. Для неньютоновских жидкостей, подчиняющихся степенному уравнению состояния, которому удовлетворяет высококонцентрированная водоугольная суспензия, перепад давления в трубопроводе определяется по формуле:

$$\frac{\Delta P}{l} = \frac{K}{D_T} \cdot \left[\frac{8 \cdot Q \cdot (3n+1)}{\pi \cdot D_T^3 \cdot n} \right]$$

где $\frac{\Delta P}{l}$ - перепад давления на единицу трубопровода, Па/м;

K, n - коэффициенты степенной реологической модели;

Q - объемный расход, м³/с;

D_T - диаметр трубопровода, м.

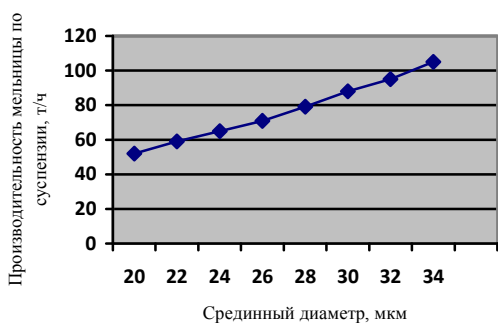


Рис.1. Зависимость производительности стержневой мельницы от среднего диаметра частиц угля в ВУТ

Для прогнозирования удельного перепада давления при гидротранспортировании определялись коэффициенты реологической модели K и n контрольных проб ВУТ. В период запуска углепровода использовалась методика для определения реологических характеристик (1,2), согласно которой

отобранная проба ВУТ тщательно перемешивалась, термостатировалась при 20°С в течение 10-15 мин. и загружалась в измерительное устройство ротационного вискозиметра. Производились измерения крутящего момента на каждой из 15 скоростей вращения при достижении первых устойчивых (что весьма условно и произвольно) значений. Обработка результатов измерений для определения коэффициентов модели K и n осуществлялась методом наименьших квадратов, однако вычислительный алгоритм имел принципиальную особенность.

На рис.2 представлены результаты сравнения фактического и расчетного перепадов давления, полученных при использовании коэффициентов реологической модели, вычисленных по методике [3]. В работе были получены результаты сравнительных измерений вязкости и расчетов перепада давления, выполненных для партии ВУТ со средней массовой долей твердой фазы 58,1%.

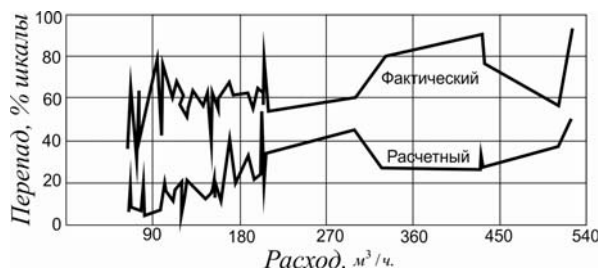


Рис. 2. Сравнение фактического и расчетного перепадов давлений

Анализ данных (рис.2) показывает, что методика [3] определения вязкости и коэффициентов реологической модели не удовлетворяет ни по точности значений (фактические перепады давления в испытательном контуре в 1,3- 3,0 раза больше расчетных значений по данным вискозиметрии), ни по отражению физического поведения водоугольных суспензий. Диапазон роста перепада давления по данной методике составляет от 0,31 до 1,00 ат/км при увеличении производительности от 60 до 500 м³/ч, в то время, как аналогичный диапазон для предложенной нами методики составляет от 0,49 до 0,84 ат/км.

На рис.3 показаны зависимости перепада давления, определенного по методике [4], от расхода топлива для различных значений n . Из графиков видно, что при малых значениях n (около 0,2) перепад давления возрастает незначительно при увеличении расхода от 100 до 500 м/ч.

Учитывая, что прогнозирование потерь давления и вязкости топлива по методике [4] явно неудовлетворительное, в дальнейшем для моделирования и расчетов необходимо использовать принципиально другую методику. В дальнейшем необходимо провести гидравлические испытания трех типов ВУТ на испытательном контуре углепровода и получить необходимые статистические характеристики. Указанные партии

топлива необходимо пропускать по испытательному контуру при разных расходах.

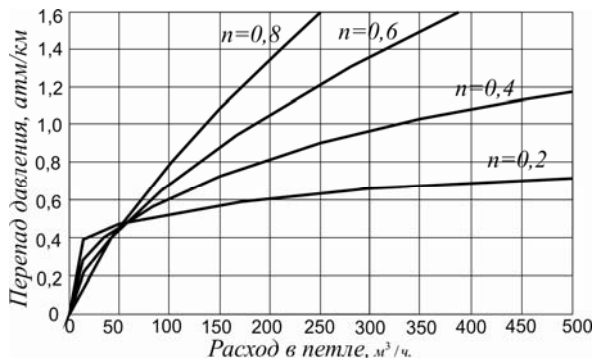


Рис.3. Перепад давления как функция n ($K=5$)

После остановки необходимо проверить седиментационную устойчивость и наличие осадка в трубопроводе. Каждый час необходимо отбирать пробы из контура и анализировать на массовое содержание твердой фазы, зольность, гранулометрический состав и вязкость по методике [5,6].

Из полученных данных видно, что расчетные перепады давлений при различных расходах весьма близки к фактическим значениям, полученным при прямых измерениях, что еще раз подтверждает надежность разработанной методики измерения реологических характеристик ВУТ.

Как отмечалось ранее, поддержание реологических характеристик ВУТ и главным образом основного интегрального показателя - перепада давления при заданном расходе на постоянном уровне является важнейшей задачей при управлении технологическим процессом приготовления ВУТ из углей с различной зольностью. Анализ регрессионных зависимостей, полученных для ВУТ, приготовленного различными способами показывает, что имеет место обобщенное уравнение связи в виде:

$$Z = a_0 \cdot C_T + \epsilon_0 \cdot A^d + c_0$$

где Z - интегральный параметр (удельный перепад давления), учитывающий изменение реологических характеристик при колебаниях массовой доли твердой фазы и зольности;

$a_0; \epsilon_0; c_0$ - коэффициенты.

Записывая данное уравнение в дифференциалах, получим:

$$dZ = \frac{\partial Z}{\partial C_T} dC_T + \frac{\partial Z}{\partial A^d} dA^d$$

Приравняв $dz = 0$, находим:

$$dC_T = - \frac{\frac{\partial Z}{\partial A^d}}{\frac{\partial Z}{\partial C_T}} dA^d$$

$$dC_T = - \frac{\epsilon_0}{a_0} dA^d$$

Полученное уравнение показывает, на сколько необходимо изменить массовую долю твердой фазы в ВУТ при изменении зольности угля, чтобы поддержать на постоянном уровне интегральный параметр Z , характеризующий реологические характеристики суспензии [7].

Применительно к результатам эксплуатации углепровода были получены для расчетных перепадов давления следующие значения коэффициентов $a_0; \epsilon_0; c_0$ уравнения регрессии.

На рис.4. показаны графики для определения ΔC при отклонении ΔA^d от среднего значения. За среднее значение A^d принимается значение $A^d = 15\%$. На основании выполненных исследований была предложена методика управления технологическим процессом приготовления путем расчета режимных карт ведения технологического процесса, заключающаяся в следующем:

1. Определяется средняя зольность и влажность партии угля, поступившей на приготовление ВУТ.
2. Определяется режим транспортирования (производительность линейной части углепровода).
3. Из соответствующего уравнения регрессии для выбранной производительности определяется значение массовой доли твердой фазы при полученной влажности и средней зольности угля 15%. При этом, номинальный перепад давления не должен превышать 0,07-0,08 МПа/км (0,7-0,8 атм/км).

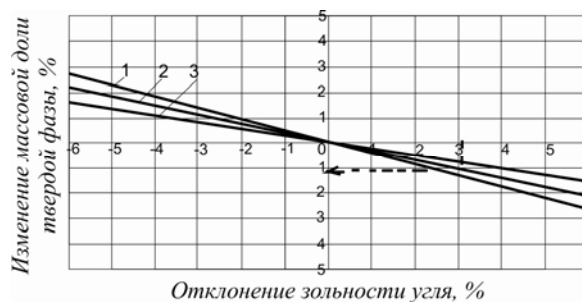


Рис. 4. Зависимость изменения массовой доли твердой фазы в ВУТ от отклонения зольности угля:

$$1 - Q = 80 \text{ м}^3 / \text{ч}; \quad 2 - Q = 160 \text{ м}^3 / \text{ч};$$

$$3 - Q = 240 \text{ м}^3 / \text{ч}.$$

4. По соответствующему графику (рис.4.) определяется необходимая корректировка массовой доли твердой фазы в зависимости от изменения зольности угля относительно среднего значения.

5. Дальнейший расчет параметров технологического процесса ведется в соответствии с обычной методикой определения подачи воды, реагента-пластификатора при заданной производительности по углю и известной влажности угля. При этом при зольности угля 10-15% соотношение подачи угля в шаровую и стержневую мельницы принимается равным 3,5:6,5, а при зольности угля более 15% соотношение подачи угля в шаровую и стержневую мельницы составляет 3:7 [12].

По полученному значению массовой доли твердой фазы и известной величине влажности угля (показания влагомера) рассчитывается и устанавливается дозировка всех продуктов, подаваемых в процесс (уголь, вода, реагент-пластификатор). При этом общая производительность процесса приготовления корректируется с учетом получения требуемых параметров гранулометрического состава.

Аналогичным образом осуществляется управление структурно-реологическими характеристиками в процессе приготовления ВУТ с применением одностадийного мокрого диспергирования угля [14,15].

Таким образом, предложенный способ управления технологическим процессом приготовления ВУТ позволяет стабилизировать удельные потери напора при транспортировании и получить требуемые параметры гранулометрического распределения при изменении свойств угля.

Вывод. Выполненные исследования позволяют сформулировать следующие основные положения:

1. Полученные структурно-реологические характеристики и установленные взаимно-корреляционные связи подтвердили предложенную модель высококонцентрированных водоугольных суспензий, как сложных дисперсных систем, и закономерности формирования их реологических свойств.

2. Установлена седиментационная стабильность ВУТ при хранении, при этом выявленные процессы накопления промежуточных классов малозольных угольных частиц в нижней части аккумулирующей емкости подтверждают установленные закономерности формирования структурно-реологических характеристик ВУТ.

3. Предложен способ управления структурно-реологическими характеристиками ВУТ в процессе приготовления, заключающийся в корректировке дозирования основных продуктов, подаваемых в процесс (угля, воды и реагента-пластификатора) с целью получения требуемых параметров гранулометрического состава и поддержания стабильного значения удельного перепада давления

в процессе транспортирования суспензии при изменении свойств угля.

Л и т е р а т у р а

1. Білецький В.С. Реологічні характеристики водовугільних суспензій у залежності від якості вихідного вугілля / В.С. Білецький, О.А. Круть, Ю.Ф. Власов // Вісник Криворізького технічного університету. – Кривий Ріг, 2006. – Вип. 11. – С. 49 – 55.
2. Толасов Ю.А., Ходаков Г.С. Особенности получения водоугольного топлива в барабанных мельницах // Сб. науч. тр. “Технология приготовления и физико-химические свойства водоугольной суспензии”, НПО “Гидротрубопровод” М., 1991.-С. 97-110.
3. Беденко В.Г., Чистяков Б.Е., Миньков В.А., Губанова Т.С. Изменение реологических свойств водоугольных суспензий в зависимости от добавок ПАВ различной природы // Сб. науч.тр. “Методы регулирования структурно-реологических свойств и коррозионной активности высококонцентрированных дисперсных систем”, ВНИИПИ гидротрубопровод. М., 1987.-С. 15-22.
4. Потанин А.А. Теория полной реологической кривой течения высококонцентрированных водоугольных суспензий // Сб. науч. тр. “Физико-химические основы регулирования структурно-реологических свойств и устойчивости высококонцентрированных водоугольных суспензий в процессе трубопроводного гидротранспортирования”, НПО “Гидротрубопровод”. М., 1989.-С.44-61.
5. Редькина Н.И., Ходаков Г.С. Физико-химические особенности водоугольных суспензий // Сб. науч. тр. “Технология приготовления и физико-химические свойства водоугольных суспензий”, НПО “Гидротрубопровод” М., 1991.-С.25-37.
6. Горская Т.П., Ильин В.К., Пименова Е.Н. Гранулометрический состав угля и подвижность водоугольных суспензий // ХТТ.-1986.-№6.-С. 105-108.
7. Gorlov E.G., Murco V.J., Korochkin G.K. et al. Coal-Water Fuels and the Ways to improve their Quality. 8th Australian Coal Science Conference. Sydney, Australia, 7-9 December, 1998.
8. Hammond T.K., Mathiesen M.M. Manufacture and commercial use of carbogel coal/water fuel in Canada. ‘6th int. Symp. Coal Slurry Combust and Technol., Orlando, Fla, June 25-27, 1984. Proc.’ Pittsburg, Pa, s. A., 982-989.
9. Thambivuthu R.V., Stover N.S.H., Whaley N. The mechanism of atomisation of coal-water. In: Third European conference on coal liquid mixtures. Malmo, Sweden 14-15 October 1987. Icheme Symposium series number 107 Rudby, UK/The Institution of Chemical Engineers, pp 133-149.1987.
10. Glenn R.D. Coal slurry applications and technology. EPRJ GS-7209, Palo Alto, CA, USA, Electric Power Research Institute, 6b hh, 1991.
11. Patel P.D., Russel W.B. A mean field theory for the rheology of phase separated or flocculated dispersions// “Colloids I surf.-1988-V.31-V.31-p.355-383.
12. Atcins E.G. Stutus report on Co-AI Fuel. // Proceedings of 6-th International Symposium on Coal Slurry Combustion. Florida, USA, 1984, p.557-566.
13. Everett W. Knell, Timothy I. Murphy, Edward P. Flanagan, Richard F. Moxin. The OXCE fuel company coal-water mixture demonstration project. Proceedings of 6-th

- International Symposium on Coal Slurry Combustion. Florida, USA, 1984, p. 976-981.
14. Grizi F., Romani G., Ercolani D. Snamprogetti reocarb from the production plants into the boilers. II Proc. 8-th Int. Symp. On Coal Slurry Fuels Preparation and Utilization: Orlando, FL, USA, May 27-30, 1986. -P.947-951.
 15. Atkins E.G. Status report on CO-AL fuel // Proc.G-th Int.Symp. on Coal Slurry Combustion: Orlando, FL, USA, June 25-27. 1984-P.557-568.
 16. Hashimoto N. CWM from China to Japan - the world's first bilateral CWM trade / CWM Project Operations Dept. JGC Corporation, Yokohama, Japan, 1995.
 17. Kenneth A. Brame, George N. Fletcher. A comparison of rod mill-ball and cage mill-ball coal-water slurry preparation circuits Proceedings of the Eleventh International Conference on Slurry Technology. Hilton Head, South Carolina, USA, 1986, 265-271.
 18. Braun R.D., Johnson R.I. Industrial scale commissioning of coal-water fuel in wet process cement // In Third European conference on coal liquid mixtures, Mo, Sweden, 14-15 October 1987, pp 285-299.

References

1. Biletskyy V.S. Rheological properties of coal-water suspensions depending on quality original coal / V.S. Beletsky, O.A. Krut, Y.F. Vlasov // Journal of Kryvyi Rih Technical University. - Krivoy Rog, 2006. - Vol. 11 - p. 49 - 55.
2. Tolas Y.A., Hodakov G.S. Peculiarities of coal-water fuel in drum mills // Coll. scientific. tr. "Technology of preparation and physico-chemical properties of coal-water slurry", NGO "Gidrotuboprovod" Moscow, 1991, p. 97-110.
3. Bedenko V.G., Chistyakov B.E., Minkov V.A. Gubanov T.S. Change the rheological properties of coal-water slurry additives, depending on the different nature surfactants // Coll. nauch.tr. "Methods regulation of structural and rheological properties and corrosion-asset of highly dispersed systems" VNIPI gidrotuboprovod. M. 1987.-p. 15-22.
4. Potanin A.A. The theory of the complete rheological curve flow highly concentrated coal-water slurries // Coll. scientific. tr. "Physical and chemical bases of regulation structural and rheological properties and stability of highly concentrated coal-water slurries in the process hydro-transport pipeline", NPO "Gidrotuboprovod". Moscow, 1989.-p.44-61.
5. Redkina N.I. Hodakov G.S. Physico-chemical properties of coal-water slurries // Coll. scientific. tr. "Technology of preparation and physico-chemical properties coal-water slurry", NPO "Gidrotuboprovod" Moscow, 1991.-p.25-37.
6. Gorskaya T.P., Ilyin V.K., Pimenova E.N. Grain size distribution of coal and coal-water slurries mobility // HTT.-1986.-№6.-p. 105-108.
7. Gorlov E.G., Murco V.J., Korochkin G.K. et al. Coal-Water Fuels and the Ways to improve their Quality. 8th Australian Coal Science Conference. Sydney, Australia, 7-9 December, 1998.
8. Hammond T.K., Mathiesen M.M. Manufacture and commercial use of carbogel coal/water fuel in Canada. 6th int. Symp. Coal Slurry Combust and Technol., Orlando, Fla, June 25-27, 1984. Proc.' Pittsburg, Pa, s. A., 982-989.
9. Thambivuthu R.V., Stover N.S.H., Whaley N. The mechanism of atomisation of coal-water. In: Third European conference on coal liquid mixtures. Malmo, Sweden 14-15 October 1987. Icheme Symposium series number 107
10. Glenn R.D. Coal slurry applications and technology. EPRI GS-7209, Palo Alto, CA, USA, Electric Power Research Institute, 6b hh, 1991.
11. Patel P.D., Russel W.B. A mean field theory for the rheology of phase separated or flocculated dispersions// "Colloids I surf.-1988-V.31-V.31-p.355-383.
12. Atkins E.G. Status report on Co-Al Fuel. // Proceedings of 6-th International Symposium on Coal Slurry Combustion. Florida, USA, 1984, p.557-566.
13. Everett W. Knell, Timothy I. Murphy, Edward P. Flanigan, Richard F. Moxin. The OXCE fuel company coal-water mixture demonstration project. Proceedings of 6-th International Symposium on Coal Slurry Combustion. Florida, USA, 1984, p. 976-981.
14. Grizi F., Romani G., Ercolani D. Snamprogetti reocarb from the production plants into the boilers. II Proc. 8-th Int. Symp. On Coal Slurry Fuels Preparation and Utilization: Orlando, FL, USA, May 27-30, 1986. -P.947-951.
15. Atkins E.G. Status report on CO-AL fuel // Proc.G-th Int.Symp. on Coal Slurry Combustion: Orlando, FL, USA, June 25-27. 1984-P.557-568.
16. Hashimoto N. CWM from China to Japan - the world's first bilateral CWM trade / CWM Project Operations Dept. JGC Corporation, Yokohama, Japan, 1995.
17. Kenneth A. Brame, George N. Fletcher. A comparison of rod mill-ball and cage mill-ball coal-water slurry preparation circuits Proceedings of the Eleventh International Conference on Slurry Technology. Hilton Head, South Carolina, USA, 1986, 265-271.
18. Braun R.D., Johnson R.I. Industrial scale commissioning of coal-water fuel in wet process cement // In Third European conference on coal liquid mixtures, Mo, Sweden, 14-15 October 1987, pp 285-299.

Чернецька-Білецька Н.Б., Баранов І.О., Мірошнікова М.В. Вдосконалення способу управління структурно-реологічними характеристиками водовугільного палива.

У статті розглянуті найважливіші умови надійної та ефективної роботи гідротранспортного паливно-енергетичного комплексу та технологічного процесу приготування водовугільного палива. Виконано аналіз фундаментальних досліджень в області розвитку технологій приготування і транспортування водовугільного палива. Виконано порівняння фактичного і розрахункового перепадів тиску палива, отриманих при використанні коефіцієнтів реологічної моделі. Запропоновано спосіб управління структурно-реологічними характеристиками водовугільного палива в процесі його приготування.

Ключові слова: водовугільне паливо, перепад тиску, реологічні характеристики, модель, вуглепровід, гідротранспортування.

Chernetskaya N. Baranov I., Miroshnykova M. Improvement method of management structural and rheological characteristics coal-water fuel.

The article deals with the most important conditions for reliable and efficient operation of the hydro transport fuel and energy complex and process preparation coal-water fuel. The analysis basic research in the development of technologies preparation and transportation coal-water fuel. The comparison actual and the estimated fuel pressure drops obtained by using rheological model coefficients. A method for controlling structural and rheological characteristics of coal-water fuel

during its preparation. These structural and rheological characteristics and established a one-correlations confirm the proposed model of highly concentrated coal-water suspensions, as complex dispersed systems, and regularities of their rheological properties. Installed sedimentation stability fuel in storage, identified processes accumulation of intermediate grade low-ash coal particles in the bottom buffer tank support established regularities of structural and rheological characteristics fuel.

Keywords: water-coal fuel, pressure drop, rheology, model ugleprovod, Hydrotransportation.

Чернецька-Білецька Н.Б. – д.т.н., проф., зав. кафедри «Логістичне управління та безпека руху на транспорті» СХУ ім. В. Даля.

Баранов І.О. - аспірант кафедри «Логістичне управління та безпека руху на транспорті» СХУ ім. В. Даля. mail: baranov_90@inbox.ru

Мірошникова М.В. - аспірант кафедри «Логістичне управління та безпека руху на транспорті» СХУ ім. В. Даля.

Рецензент: д.т.н., проф. **Марченко Д.М.**

Стаття подана 23.03.2016