

УДК 622.648:[622.732:621.926.086]

**Рубан В.Д.**, магістр,  
**Подольак К.К.**, магістр  
(ИГТМ НАН України)

**ПРИГОТОВЛЕНИЕ СТРУКТУРИРОВАННЫХ СУСПЕНЗИЙ С УЧЕТОМ  
ВЛИЯНИЯ ГИДРОТРАНСПОРТА НА ИЗМЕЛЬЧЕНИЕ УГЛЯ**

**Рубан В.Д.**, магістр,  
**Подольак К.К.**, магістр  
(ИГТМ НАН України)

**ПРИГОТУВАННЯ СТРУКТУРОВАНИХ СУСПЕНЗІЙ З УРАХУВАННЯМ  
ВПЛИВУ ГІДРОТРАНСПОРТУ НА ПОДРІБНЕННЯ ВУГІЛЛЯ**

**Ruban V.D.**, M.S. (Tech),  
**Podolyak K.K.**, M.S. (Tech.)  
(IGTM NAS of Ukraine)

**PREPARATION OF STRUCTURED SUSPENSIONS WITH TAKING IN-  
TO ACCOUNT IMPACT OF HYDRAULIC TRANSPORT ON THE RATE OF  
THE COAL BREAKAGE**

**Аннотация.** Рассмотрены основные способы измельчения угля, которые могут применяться в процессе приготовления структурированных суспензий. Механический способ, при котором для измельчения кусков и частиц минерального сырья и других материалов используются дробилки и мельницы, наиболее широко распространен, но при этом является достаточно энергозатратным. Менее энергозатратными и, соответственно, более эффективными являются гидроимпульсный и электрогидроимпульсный способы измельчения, которые предполагают разрушение твердого материала под действием ударных волн, генерируемых в результате гидравлического удара. Кроме того, при гидротранспортировании происходит самопроизвольное естественное разрушение угля в углесосах и трубопроводах. Представляет интерес использовать разрушение угля при гидротранспортировке для получения угля с требуемой степенью дробления. Существует возможность рассчитать параметры гидротранспортной установки, при которых на выходе можно получить полидисперсную среду с частицами угля необходимой крупности. Для этого в рассматриваемых условиях необходимо знать крупность и концентрацию транспортируемых частиц на входе в гидротранспортную систему. В конечном итоге можно вычислить концентрацию полидисперсной среды, при которой обеспечивается не только доставка нужного количества угля, но и измельчение его до требуемой степени дробления. Определение требуемой объемной концентрации гидросмеси для рассматриваемых условий позволяет связать воедино количество транспортируемого угля, степень измельчения частиц угля в углесосах и степень измельчения частиц в транспортных трубопроводах. Таким образом, гидротранспортная система, кроме транспортировки угля, может решать задачу пропитывания и дезинтеграции транспортируемых частиц с нужной степенью измельчения для последующего создания структурированных суспензий.

**Ключевые слова:** структурированная суспензия, гидротранспорт, трубопровод, измельчение.

Для отечественной экономики уголь остается основным энергоносителем. Поэтому ухудшение качества добываемых углей и повышение требований к экологической безопасности их обогащения вызывают необходимость модернизации геотехнологических систем путем повышения эффективности процессов приготовления и транспортирования суспензий. Мировой опыт показывает, что в этих условиях, наиболее рациональным решением является формирование необходимых реологических свойств структурированных суспензий при их приготовлении и выбор рациональных режимов транспортирования, что позволяет комплексно решить большую часть технологических, экологических, и, в конечном счете, экономических проблем.

Результаты анализа известных геотехнологий, основанных на применении структурированных суспензий [1,2], показывают, что основными технологическими процессами, применяемыми при приготовлении структурированных суспензий, являются: грохочение, дробление и измельчение, пропитывание, смешение и гомогенизация. Одним же из наиболее энергоемких процессов является процесс измельчения исходного угля до необходимой крупности. Поэтому уменьшение энергетических затрат на измельчение и дробление твердой фазы, положительно повлияет на стоимость приготовления структурированных суспензий. Учитывая, что этот процесс предполагает смешение угля с водой и последующее транспортирование этой смеси в цистернах или по трубопроводу, перспективным является совместить процесс приготовления и транспортирования суспензии. Это возможно обеспечив измельчение угля при транспортировании в трубопроводах и центробежных насосах, за счет истирания и соударения, а в железнодорожных цистернах за счет дополнительного гидроимпульсного воздействия.

Идея исследования заключается в том, чтобы максимально использовать попутное измельчение угля, например, при транспортировке по трубопроводу и при прохождении через углесос для достижения нужной степени измельчения. Модели процессов транспортировки известны и многочисленны, модели процессов пропитывания и дезинтеграции изучены не так хорошо, но примеры есть, однако никто не пытался решить задачу выбора параметров гидротранспортной системы, обеспечивающих не только доставку нужного количества твердого, но и измельчения его до требуемой степени дробления.

Цель работы заключается в разработке метода решения задачи выбора параметров гидротранспортной системы, которые обеспечивают доставку нужного количества твердой фазы с заданной степенью измельчения.

Процессы дробления и измельчения применяются для доведения минерального сырья до необходимой крупности или для получения требуемого гранулометрического состава. В процессе дробления и измельчения куски и частицы угля разрушаются внешними силами [3,4]. Разрушение происходит преимущественно по ослабленным сечениям, трещиноватостям и другим дефектным местам структуры после перехода за предел прочности нормальных и касательных напряжений, возникающих в материале при его упругих деформациях – сжатии, растяжении, изгибе или сдвиге. Существует множество способов измельчения и

дробления угля. Наиболее широкое распространение получил механический способ, эффективны электрогидроимпульсный и гидроимпульсный способ измельчения, а также измельчение угля в трубопроводах при гидротранспортировании.

По технологическому назначению механические машины, применяемые для разрушения кусков и частиц минерального сырья и других материалов, разделяются на две основные группы: дробилки и мельницы [5]. При мокром дроблении и измельчении дополнительно имеет место разрушение частиц в результате пропитывания их жидкостью. Кроме того, в ряде технологий приготовления структурированных суспензий процесс пропитывания является отдельной операцией, проводимой перед измельчением с целью снижения прочности частиц твердой фазы за счет эффекта Рибиндера. Как показывают результаты исследований некоторых авторов за счет этого возможно не только сократить энергоемкость измельчения, но и улучшить характеристики гранулометрического состава измельченного материала, а также реологические параметры структурированных суспензий [2, 6, 7].

Электрогидроимпульсный и гидроимпульсный способы измельчения предполагают, разрушение твердого материала под действием ударных волн, генерируемых в результате гидравлического удара. Известно также устройство для электрогидроимпульсной обработки угольных пластов [8], которое за счет создания мощных импульсных ударов в заполненной водой скважине при электрическом разряде между электродами трансформирует электрическую энергию в механическую. Для этого в скважину, пробуренную по пласту, вводятся электроды, и под напряжением 5...8 кВ производится импульсная обработка. При создании импульсов в скважине, заполненной водой, происходит электрический пробой, в результате которого в искровом разряде создается газообразная среда, которая по своим характеристикам является плотной низкотемпературной плазмой высокого давления. Вследствие сопротивления окружающей среды в массиве возникают высокие мгновенные давления, образующие ударные волны. Под воздействием гидравлических ударов угольный массив может разрушаться с появлением новых и раскрытием имеющихся трещин. Данный способ применим и для приготовления структурированных суспензий, так как образовавшаяся ударная волна посредством воды передает энергию на твердые частицы, тем самым, вызывая их разрушение.

Исследования [6, 9, 10] показывают, что интенсивность измельчения угля при гидротранспортировании в трубопроводах неодинакова по длине трубопровода. На начальном участке длиной от 3 до 5 км имеет место наиболее интенсивное измельчение, характеризующееся резким уменьшением содержания крупных и крупно-средних классов, представленных кусками угля неправильной формы, имеющих минеральные включения, микро- и макротрещины. Скалывание выступающих неровностей и разрушение крупных кусков угля приводит к образованию мелких классов, а перетирание последних увеличивает выход микронных фракций. С увеличением расстояния транспортирования, частицы угля приобретают округлую форму, крупность их уменьшается, структура

становиться более однородной, а сопротивляемость угля разрушению увеличивается.

Трубопровод для полидисперсной смеси образованной из материалов разных классов крупности рассчитывается по формуле

$$H = L\lambda_0 \frac{V^2}{2gD} \left( 1 + \frac{Ar(1-S_1)}{(1+ArS_1)} S_1 \right) + L\lambda_0 \frac{V^2}{2gD} \left( 0.35S_2 \frac{w}{V} \sqrt{\frac{D}{d_{cp}}} + fS_3 \right) \frac{Ar(1-S_1)}{(1+ArS_1)} \quad (1)$$

где  $S_1, S_2, S_3$  – объемные концентрации соответственно тонких, мелких и кусковых фракций;  $L$  – длина трубопровода;  $\lambda_0$  – коэффициент гидравлического трения при движении воды в трубопроводе;  $V$  – средняя расходная скорость гидросмеси;  $g$  – ускорение свободного падения;  $D$  – диаметр трубопровода;  $w$  – скорость степенного падения частиц мелкой фракции;  $d_{cp}$  – средневзвешенный диаметр частиц мелкой фракции;  $f$  – обобщенный коэффициент трения частиц о нижнюю стенку трубы;  $Ar$  – параметр Архимеда.

Расчет трубопровода необходимо произвести таким образом, чтобы в конце транспортирования получить уголь требуемой степени дробления. Для этого при всех прочих известных параметрах необходимо определить требуемую концентрацию при которой обеспечивается не только доставка нужного количества угля, но и измельчение его до требуемой степени измельчения в рассматриваемых условиях.

Обработка экспериментальных данных [10], указывает на следующую зависимость степени измельчения угля при гидротранспортировании от крупности исходного угля и объемной концентрации гидросмеси:

$$i = a \frac{1-1,9S}{1-S} d_{cp}^n, \quad (2)$$

где  $i$  – степень измельчения угля;  $S$  – объемная концентрация гидросмеси, д. ед.;  $d_{cp}$  – средневзвешенная крупность угля перед гидротранспортированием, мм;  $a, n$  – эмпирические константы, зависящие от характеристик угля.

Углесос является необходимым элементом технологии трубопроводного транспорта. Сущность измельчения угля в углесосе заключается в дроблении угольных частиц при изменении направления потока гидросмеси. Поскольку энергия, необходимая для разрушения куска угля определяется его массой и скоростью движения, раскалыванию при одинаковой скорости подвергаются частицы, масса которых больше, т. е. интенсивность измельчения в углесосе зависит от крупности транспортируемого угля. Опытами подтверждается, что при уменьшении крупности исходного материала интенсивность измельчения в углесосе снижается. При гидротранспортировании угля средневзвешенной круп-

ностью от 1,5 до 2,0 мм измельчения в углесосе практически не происходит. Закономерность изменения степени измельчения угля в зависимости от окружной скорости рабочего колеса и его порядкового номера при последовательном расположении углесосов выражается уравнением [10]:

$$d_{cp} = i_P d_0, \quad (3)$$

$$i_P = 0,17 + 0,035V + 0,277m \quad (4)$$

где  $i_P$  – степени измельчения угля в углесосе;  $d_0$  – средневзвешенная крупность рядового угля, мм;  $V$  – окружная скорость рабочего колеса, м/с;  $m$  – число колес последовательно работающих углесосов.

Для расчета параметров гидротранспортной установки в рассматриваемых условиях необходимо знать крупность и концентрацию транспортируемых частиц. В конечном итоге требуемая концентрация, при которой обеспечивается не только доставка нужного количества угля, но и измельчение его до требуемой степени дробления определяется как:

$$S = \frac{d_N - a(i_P d_0)^{n+1}}{d_N - 1,9a(i_P d_0)^{n+1}}, \quad (5)$$

где  $d_N$  – необходимая средневзвешенная крупность угля после гидротранспортирования, мм.

Обозначив  $a(i_P d_0)^{n+1}$  через  $P$  и разделив на  $d_N$ , получим следующее выражение для требуемой концентрации

$$S = \frac{1 - \frac{P}{d_N}}{1 - 1,9 \frac{P}{d_N}} \quad (6)$$

Графическая зависимость требуемой концентрации транспортируемых частиц от суммарной степени дробления в углесосах и трубопроводах показана на рис.1.

Проведя линейную аппроксимацию требуемой концентрации транспортируемых частиц от суммарной степени дробления в углесосах и трубопроводах, получаем уравнение линии тренда (рис.2)

$$S = 0.5775 - 0.4935 \frac{P}{d_N} \quad (7)$$

при величине достоверности аппроксимации  $R^2 = 0.9678$

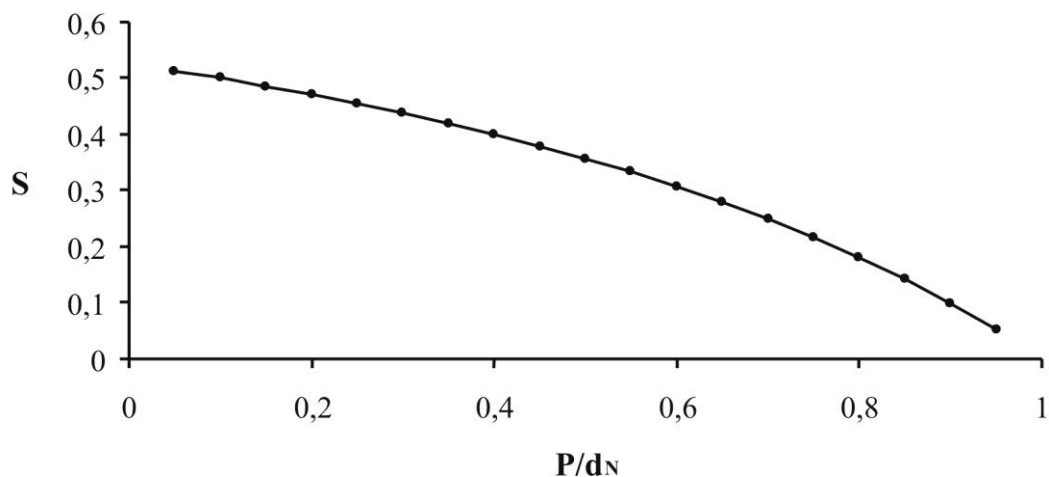


Рисунок 1 – График зависимости объемной концентрации гидросмеси от суммарной степени дробления

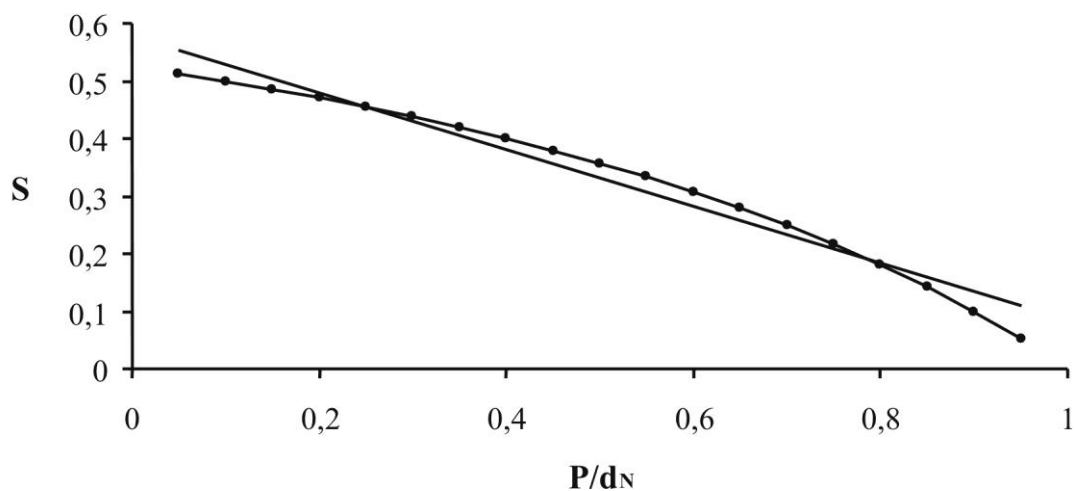


Рисунок 2 – Линейная аппроксимация зависимости объемной концентрации

Определение требуемой объемной концентрации гидросмеси для рассматриваемых условий позволяет связать воедино количество транспортируемого угля, степень измельчения частиц угля в углесосах и степень измельчения частиц в транспортных трубопроводах. Таким образом, гидротранспортная система решает одновременно три задачи: транспортировку, пропитывание и дезинтеграцию транспортируемых частиц с нужной степенью измельчения для последующего создания структурированных суспензий.

Использование угля в виде структурированной суспензии взамен традиционных энергоносителей обеспечивает чрезвычайно широкий спектр признанных во всем мире положительных технологических, экономических, экологических и трудовых эффектов. А снижение затрат на приготовление структурированных суспензий сделает данный вид топлива конкурентоспособным с другими видами топлива.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Круть, О.А. Водовугільне паливо / О.А. Круть. – К.: Наукова думка, 2002. – 172 с.
2. Семененко, Е.В. Расчет параметров гидротранспорта высококонцентрированных водоугольных суспензий / Е.В. Семененко, А.А. Круть // Форум Горняков – 2011: Материалы междунар. конф., октябрь, 2011 г. – Днепропетровск: НГУ, 2011. – С. 205 – 211.

3. Надутый, В.П. Вероятностные процессы вибрационной классификации минерального сырья / В.П. Надутый, Е.С. Лапшин. – К.: Наукова думка, 2005. – 180 с.
4. Линч, А.Дж. Циклы дробления и измельчения. Моделирование, оптимизация, проектирование и управление : пер. с англ. / Дж. Линч. – М.: Недра, 1981. – 343 с.
5. Андреев, С.Е. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых / С.Е. Андреев, В.В. Зверевич, В.А. Перов. – М.: Недра, 1966. – 415 с.
6. Мурко, В.И. Научные основы процессов получения и эффективного применения водоугольных суспензий: автореф. дис. д-ра техн. наук: 05.17.07 / В.И. Мурко. – М., 1999. – 48 с.
7. Проблемы разработки россыпных месторождений / И.Л. Гуменик, А.М. Сокил, Е.В. Семененко, В.Д. Шурыгин. – Днепропетровск: Сич, 2001. – 224 с.
8. Сергеев И.В. Новые направления совершенствования способов дегазации угольных пластов / И.В. Сергеев, В.Г. Рыжков, Р.Г. Багдасаров // Проблемы горного дела. – М.: Недра, 1974. – С. 34–40.
9. Обоснование параметров и режимов работы гидротранспортных систем горных предприятий / Ю.Д. Баранов, Б.А. Блюсс, Е.В. Семененко, В.Д. Шурыгин. – Днепропетровск: Новая идеология, 2006. – 416 с.
10. Свитлый, Ю.Г. Расчет измельчаемости угля при гидротранспорте / Ю.Г. Свитлый // Гидравлическая добыча угля. – 1966. – № 11.- С. 8 – 11.

#### REFERENCES

1. Krut, O.A. (2002), *Vodovugilne palyivo* [Coal-water fuel], Naukova dumka, Kiev, Ukraine.
2. Semenenko, E.V. and Krut, O.A. (2011), “Calculation of parameters hydrotransport highly coal-water slurries”, *Proceedings of International Conference “Forum of Mining Engineers”*, National Mining University, Dnepropetrovsk, Ukraine, pp. 205 – 211.
3. Naduty, V.P. and Lapshin, E.S. (2005), *Veroyatnostnye protsessy vibrotsionnoy klassifikatsii mineralnogo syrya* [Stochastic processes vibration classification of minerals], Naukova dumka, Kiev, Ukraine.
4. Linch, Dzh. (1981), *Tsikly drobleniya i izmelcheniya. Modelirovanie, optimizatsiya, proektirovanie i upravlenie* [Crushing and grinding cycles. Modeling, optimization, design and management], Nedra, Moscow, SU.
5. Andreev, S.E and Petrov, V.A. (1966), *Droblenie, izmelchenie i grohochenie poleznych iskopaemih* [Crushing, grinding and screening of minerals], Nedra, Moscow, SU.
6. Murko, V.I. (1999), “Scientific bases of obtaining and effective use of coal-water slurries”, Abstract of Ph.D. dissertation, Chemical technology of fuel and high-energy substances, Moscow, Russia.
7. Gumenik, I.L., Sokil, A.M., Semenenko, E.V. and Shurygin, V.D. (2001), *Problemy razrabotki rossypnyh mestorozhdeniy* [Problems of alluvial deposits], Sich, Dnepropetrovsk, Ukraine.
8. Sergeev, I.V., Ryzhkov, V.G., Bagdasarov, R.G. (1974), “New ways of improving methods of degassing of coal seams”, *Problemy gornogo dela* [Problems of Mining], pp. 34–40.
9. Baranov, Yu.D., Blyuss, B.A., Semenenko, E.V. and Shurygin, V.D. (2006), *Obosnovanie parametrov b rezhimov gidrotransportnyh system gornyh predpriyatiy* [Substantiation of parameters and modes of operation of hydro systems of mining enterprises], Novaya ideologiya, Dnepropetrovsk, Ukraine.
10. Svitliy, Yu.G. (1966), “Calculation grindability of coal in hydrotransport”, *Gidravlicheskaya dobytcha uglya*, no. 11, pp. 8-11.

---

#### Об авторах

**Рубан Виталий Дмитриевич**, младший научный сотрудник отдела проблем шахтных энергетических комплексов, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАНУ), Днепропетровск, Украина, [ruban-igtm@i.ua](mailto:ruban-igtm@i.ua)

**Подольак Константин Константинович**, инженер отдела проблем шахтных энергетических комплексов, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАНУ), Днепропетровск, Украина, [podolyak@email.ua](mailto:podolyak@email.ua)

#### About the authors

**Ruban Vitaliy Dmitrievich**, Master of Science, Junior Researcher in Department of Mine Energy Complexes, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, [ruban-igtm@i.ua](mailto:ruban-igtm@i.ua)

**Podolyak Konstantin Konstantinovich**, Master of Science, Engineer in Department of Mine Energy Complexes, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, [podolyak@email.ua](mailto:podolyak@email.ua)

---

**Анотація.** Розглянуті основні способи подрібнення вугілля, які можуть застосовуватися в процесі приготування структурованих суспензій. Механічний спосіб, при якому для подрібнення шматків і частинок мінеральної сировини і інших матеріалів використовуються дробарки і млини, найширше поширений, але при цьому є достатньо енерговитратним. Менш енерговитратними і відповідно ефективнішими є гідроімпульсний і електрогідроімпульсний способи подрібнення, за допомогою яких відбувається руйнування твердого матеріалу під дією ударних хвиль, що генеруються в результаті гідравлічного удару. Крім того, при гідротранспортуванні відбувається мимовільне природне руйнування вугілля у вуглесосах і трубопроводах. Представляє інтерес використовувати руйнування вугілля при гідротранспортуванні для отримання вугілля з необхідним ступенем подрібнення. Існує можливість розрахувати параметри гідротранспортної установки, при яких на виході можна отримати полідисперсне середовище з частинками вугілля необхідного розміру. Для цього в даних умовах необхідно знати крупність і концентрацію частинок, що транспортуються, на вході в гідротранспортну систему. Зрештою можна обчислити концентрацію полідисперсного середовища, при якій забезпечується не тільки доставка потрібної кількості вугілля, але і подрібнення його до необхідного ступеня дроблення. Визначення необхідної об'ємної концентрації гідросуміші для даних умов дозволяє зв'язати воедино кількість вугілля, що транспортується, ступінь подрібнення частинок вугілля у вуглесосах і ступінь подрібнення частинок в транспортних трубопроводах. Таким чином, гідротранспортна система, окрім транспортування вугілля, може вирішувати задачу просочення і дезинтеграції частинок, що транспортуються, з потрібним ступенем подрібнення для подальшого створення структурованих суспензій.

**Ключові слова:** структурована суспензія, гідротранспорт, трубопровід, подрібнення.

**Abstract.** Key methods of coal breaking, which can be used for preparing structured suspensions are considered including mechanical method of breaking lumps and particles of minerals and other materials with the help of crushers and mills. This method is the most extensively applied, however, it requires great energy consumption. Methods which consume less energy and, therefore, are more effective are electrohydroimpulsive and hydroimpulsive breaking which break solid materials by shock waves generated by hydraulic shock. In addition, when coal is conveyed by hydrotransport a spontaneous and natural coal breakage is occurred in the coal-insuckers and pipelines. Of particular interest is to use the coal destruction in the hydrotransport for getting coal with the required rate of fragmentation. It is possible to calculate parameters for the hydrotransports at which an output can be obtained with a polydisperse medium containing coal particles of the required size. To this end, and under the conditions considered, it is necessary to know size and concentration of particles transported to the entrance into the hydro-system. Ultimately, it is possible to calculate concentration of the polydisperse medium which can ensure not only delivery of the desired amount of coal but also its breakage to the desired degree of fragmentation. Determining the required volume concentration of the slurry under the considered conditions allows to link together amount of the coal transported and degree of the coal particles crushing in the coal insuckers and transporting pipelines. Thus, the hydraulic system, additionally to the function of the coal transporting, can also overcome a problem of transported particles soaking and disintegration with the desired degree of breakage which ensures further creation of the structured suspensions.

**Keywords:** structured suspension, hydrotransport, pipeline, breakage.

*Стаття постуила в редакцію 20.11.2014*

*Рекомендовано к публікації д-ром техн. наук Е.В. Семененко*