

Технические науки

УДК 662.7

**Щепкин Владимир Иванович**

*главный технолог отдела теплообмена в дисперсных системах*

*Институт технической теплофизики НАН Украины*

**Shchepkin Vladimir**

*Chief Technologist at the Department of*

*Heat and Mass Transfer in Disperse Systems*

*Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine*

**Целень Богдан Ярославович**

*кандидат технических наук, старший научный сотрудник,*

*старший научный сотрудник отдела теплообмена*

*в дисперсных системах*

*Институт технической теплофизики НАН Украины*

**Tselen Bogdan**

*Candidate of Engineering Sciences, Senior Researcher at the Department of*

*Heat and Mass Transfer in Disperse Systems*

*Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine*

**Коньк Алина Васильевна**

*кандидат технических наук, старший научный сотрудник,*

*ведущий научный сотрудник отдела теплообмена*

*в дисперсных системах*

*Институт технической теплофизики НАН Украины*

**Konyk Alina**

*Candidate of Engineering Sciences, Leading Researcher at the Department of*

*Heat and Mass Transfer in Disperse Systems*

*Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine*

**Радченко Наталия Леонидовна**

*кандидат технических наук, старший научный сотрудник,  
старший научный сотрудник отдела теплообмена  
в дисперсных системах*

*Институт технической теплофизики НАН Украины*

**Radchenko Nataliya**

*Candidate of Engineering Sciences, Senior Researcher at the Department of  
Heat and Mass Transfer in Disperse Systems  
Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine*

**Недбайло Анна Евгениевна**

*кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела  
теплообмена в дисперсных системах*

*Институт технической теплофизики НАН Украины*

**Nedbailo Anna**

*Candidate of Engineering Sciences, Senior Researcher at the Department of  
Heat and Mass Transfer in Disperse Systems  
Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine*

**Гоженко Любовь Петровна**

*кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела  
теплообмена в дисперсных системах*

*Институт технической теплофизики НАН Украины*

**Hozhenko Lyubov**

*Candidate of Engineering Sciences, Senior Researcher at the Department of  
Heat and Mass Transfer in Disperse Systems  
Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine*

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛИЯНИЯ КАВИТАЦИОННОГО  
ДИСПЕРГИРОВАНИЯ НА ФРАКЦИОННЫЙ СОСТАВ ЧАСТИЦ  
УГЛЯ ВОДОУГОЛЬНОЙ СУСПЕНЗИИ**

**DETERMINATION OF THE INFLUENCE OF CAVITATION  
DISPERSION TREATMENT ON THE FRACTIONAL COMPOSITION  
OF COAL PARTICLES IN A WATER-COAL SUSPENSION**

*Аннотация.* Приведен краткий обзор способов получения водоугольного топлива и его характеристики. Предложен способ получения водоугольной суспензии путем совмещения стадий приготовления щелочной воды, измельчения угля и их перемешивания. Исследованы реологические характеристики и фракционный состав суспензии.

**Ключевые слова:** водоугольная суспензия, кавитация, диспергирование, фракционный состав, водородный показатель.

**Summary.** A brief review of the methods for obtaining water-coal fuel and its characteristics is given. A method for obtaining a coal-water suspension by combining the steps of preparing alkaline water, grinding the coal and mixing them is proposed. The rheological characteristics and the fractional composition of the resulting suspension were investigated.

**Key words:** water-coal suspension, cavitation, dispersing, fractional composition, hydrogen index.

В связи со сложившимися на сегодняшний день обстоятельствами, которые требуют снижения использования природного газа для обеспечения экономической безопасности страны уменьшая таким образом зависимость от стран-поставщиков нефти и газа, диверсификации и рационального использования топливных ресурсов использование

водоугольного топлива является перспективным так как обеспечиваются достаточные экономические и экологические показатели.

Водоугольное топливо является собой мелкодисперсную суспензию из 60÷70% измельченного угля, 39÷29% воды и до 1% реагента-пластификатора. Производится из угля, углесодержащих отходов и угольных шламов. Среди преимуществ водоугольного топлива выделяют его высокую стабильность, удобство транспортирования различными видами транспорта, пожаробезопасность, взрывобезопасность, высокие экологические, технологические и экономические показатели: в 1,5÷3,5 раза снижение выбросов в атмосферу оксидов азота, диоксида серы, бензпирена, нет необходимости в существенном изменении конструкции оборудования, эффективность использования топлива составляет более 97%, в 2÷3 раза снижается стоимость 1 т условного топлива, срок окупаемости составляет 1÷2,5 года).

Приготовление водоугольного топлива состоит из стадий обогащения угля, его дробления и измельчения до размеров 0÷100 (200÷250) мкм с последующим приготовлением суспензии с водой и реагентами-пластификаторами. Наиболее известными способами приготовления водоугольного топлива являются технологии «Reocarb» (Италия, бывший СССР), «Carbogel» (Швеция, Канада), «Co-Al» (Великобритания), «Fluidcarbon» (Швеция), «Densecoal» (Германия), технология ЗАТ «Альматеа» (Россия), усовершенствованная технология «Reocarb», которая используется в Украине НПО «Вуглемеханізація» [1].

Наиболее перспективным способом на сегодняшний день является способ с использованием двухступенчатого ведения процесса: на первой ступени осуществляют «сухое измельчение» угля, а на второй – кавитационное. Одним из них есть способ получения водоугольного топлива с помощью кавитационно-вихревой технологии позволяющий получать суспензию со средним размером частиц угля 6÷10 мкм [2].

При разработке технологий получения водоугольного топлива наиболее рационально, по возможности, совмещать несколько простых процессов в одном устройстве (получение воды со щелочным значением водородного показателя, смешение, диспергирование, гомогенизация). При кавитационной обработке воды, в зависимости от растворенных в ней примесей, наблюдается повышение водородного показателя в щелочную область вследствие, как предполагается в работе [3], образования молекул воды в «возбужденном» («активированном») состоянии, радикалов водорода и гидроксила, ионов водорода и гидроксильных ионов, молекул водорода и пероксида водорода [4]. Значение водородного показателя, полученное нами при кавитационной обработке водопроводной воды, используя способ дискретно-импульсного ввода энергии, повышалось до 9,7 (при обработке на протяжении 15 минут 20 л в режиме рециркуляции).

Также при кавитационной обработке происходит диспергирование угля, деструкция молекул составляющих веществ с распадом на отдельные органические составляющие с реакционно активной поверхностью частиц и значительным количеством свободных органических радикалов с размером частиц  $6\div 10$  мкм [5].

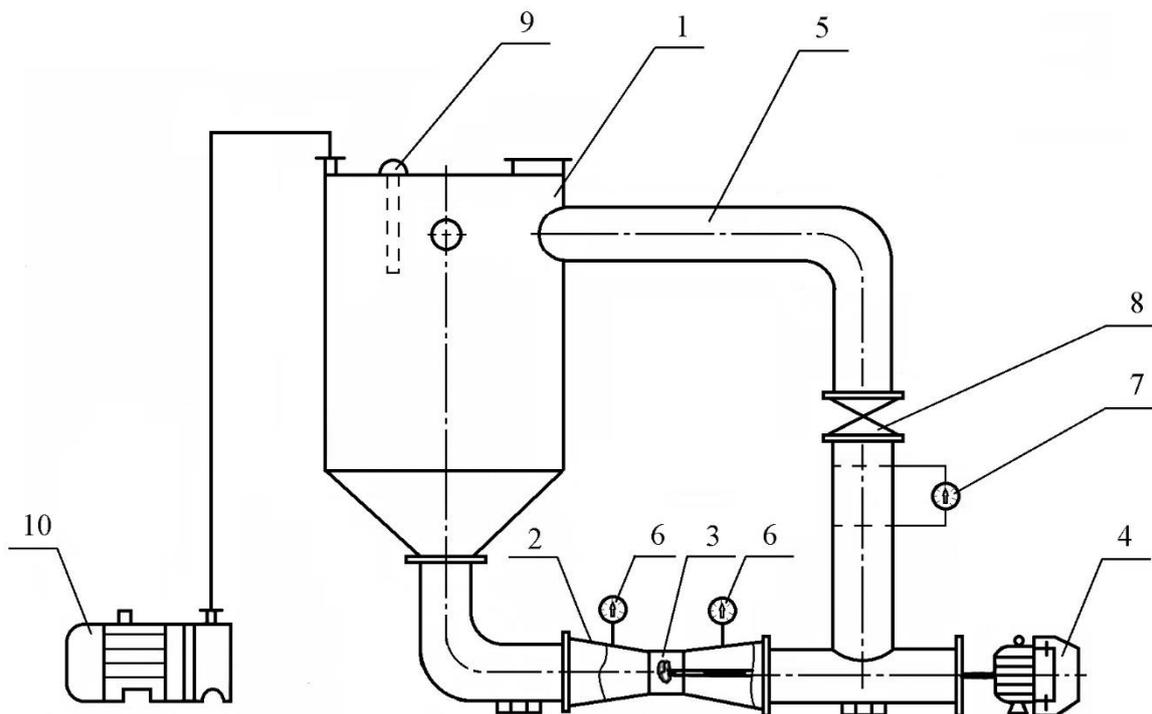
Водоугольное топливо также должно иметь определенные реологические свойства. В зависимости от реологических свойств водоугольное топливо может проявлять свойства ньютоновской (до 30% дисперсной фазы) и неньютоновской жидкостей (более 30% дисперсной фазы) [6]. Кроме того, существенное влияние на реологические свойства водоугольного топлива оказывает температура.

В Институте технической теплофизики НАН Украины проведены исследования воздействия влияния кавитации на размер дисперсных частиц угля при получении водоугольной суспензии.

Целью исследования было определение влияния конструктивных размеров кавитационных устройств на интенсивность процесса кавитации,

а также определение кинетики кавитационного диспергирования в зависимости от времени.

Для проведения эксперимента использовали лабораторный стенд, оснащенный кавитационным устройством (рис. 1) с многократным прохождением суспензии через измерительную трубу и измерением скорости потока, распределения кавитационных пузырьков, температуры, давления и энергопотребления. Исследования проводили на образцах антрацита марки АШ, который характеризуется повышенным содержанием примесей микроэлементов, наличие и неравномерное распределение которых приводит к повышению плотности угля и влияет на время и качество диспергирования. В качестве дисперсионной среды использовали воду с хозяйственно-питьевого водопровода.



1 – емкость; 2 – измерительная труба; 3 – кавитатор; 4 – электродвигатель; 5 – трубопровод рециркуляции; 6 – мановакуумметры; 7 – измеритель скорости потока (расходомер); 8 – вентиль; 9 – термопара; 10 – насос вакуумный.

**Рис. 1. Схема лабораторного стенда**

Лабораторный стенд состоит из емкости 1 объемом 8 л, измерительной трубы 2 диаметром 76 мм и длиной 180 мм изготовленной из специального стекла в которой установлен закрепленный на валу кавитатор 3, соединенный через муфту с валом электродвигателя 4, и трубопровода рециркуляции 5. Давление жидкости измеряли до и после кавитатора мановакуумметрами 6. Скорость движения потока жидкости в трубе измеряли расходомером 7 и регулировали с помощью вентиля 8, а температуру жидкости в емкости измеряли термопарой 9. Необходимое разрежение создавалось с помощью вакуумного насоса 10.

Особенностью лабораторного стенда является узел кавитационного диспергирования, который представляет собой установленную на валу крыльчатку для создания кавитационного воздействия и одновременного транспортирования потока. Такое решение позволяет регулировать размеры и плотность кавитационных камер при различной производительности, создавая более интенсивное кавитационное воздействие в сравнении со статическими кавитаторами. Однако, с другой стороны, возникает необходимость применения более устойчивых к кавитационному воздействию материалов вследствие повышенного абразивного износа крыльчатки и рабочей области.

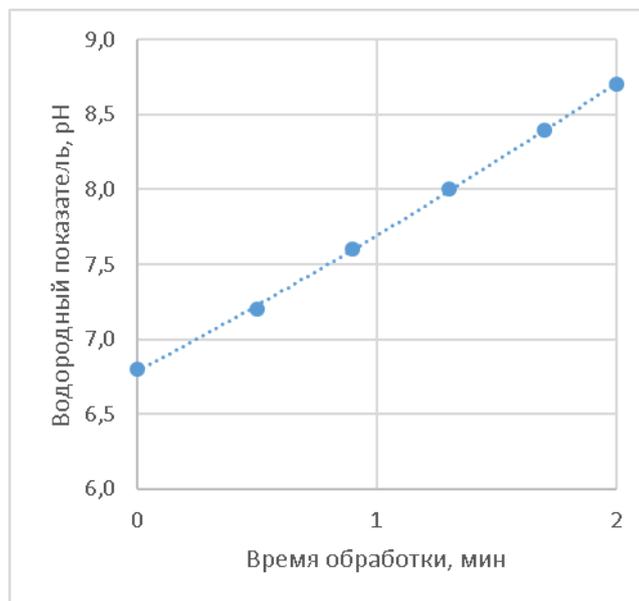
Исследование проводилось в два этапа. На первом этапе определяли влияние конструктивных размеров трех моделей кавитаторов на гидродинамические характеристики потока. Применялись кавитаторы диаметром 56 мм с шаговым отношением 0,5; 0,8; 1,0. Установлено, что наибольший кавитационный эффект получаем кавитатором с шаговым отношением 0,8 обеспечивая при этом кавитационное течение потока в измерительной трубе со скоростью  $6,8 \div 8,5$  м/с. Оптимальный режим кавитационного течения должен обеспечивать высокую плотность кавитации (высокую плотность кавитационных пузырьков и их размер за кавитатором). Число кавитации при этом составляло 0,25.

На втором этапе исследований определяли закономерность кинетики кавитационного диспергирования антрацита в зависимости от времени обработки. Количество угля и воды определяли расчетным методом по массе сухого угля таким образом, чтобы массовая доля угля в водоугольной суспензии составляла 30% (соотношение воды к углю 2,33).

Перед кавитационной обработкой уголь измельчали на шаровой мельнице способом мокрого помола при соотношении воды к углю 1:1, частотой оборотов мельницы  $46 \text{ с}^{-1}$  и времени помола 30 минут. После помола максимальный размер частиц фракции  $4 \div 5$  мм не превышал 21% от общей массы, фракции  $1 \div 4$  мм – 37%, фракции  $0 \div 1$  мм – 42%. Время кавитационного диспергирования водоугольной суспензии выбирали произвольно – 3; 5 и 10 минут после получения двухфазной системы. Во время проведения эксперимента исследовали реологические параметры и гранулометрический состав водоугольной суспензии. Реологические параметры определяли на ротационном вискозиметре «Реотест 2» при скорости сдвига  $0,3 \div 145,8 \text{ с}^{-1}$  со стандартной измерительной системой цилиндров «Н». Гранулометрическое распределение частиц угля в суспензии определяли по ГОСТ 2093-82.

Получение водоугольной смеси происходило следующим образом. Вода с хозяйственно-питьевого водопровода через объемный дозатор направлялась в работающий лабораторный стенд, в котором ее обработка продолжалась до достижения величины водородного показателя  $8,5 \div 9,0$ . После этого измельченный уголь фракцией  $0 \div 5$  мм дозировался и подавался в лабораторный стенд, где в кавитационном узле (кавитаторе) активно перемешивался с обработанной водой со щелочным значением водородного показателя и образовывал водоугольную суспензию, которая поддавалась девятикратной обработке в кавитационном узле путем рециркуляции в результате чего под воздействием кавитации происходили деструкция твердой фазы, диспергирование и гомогенизация суспензии.

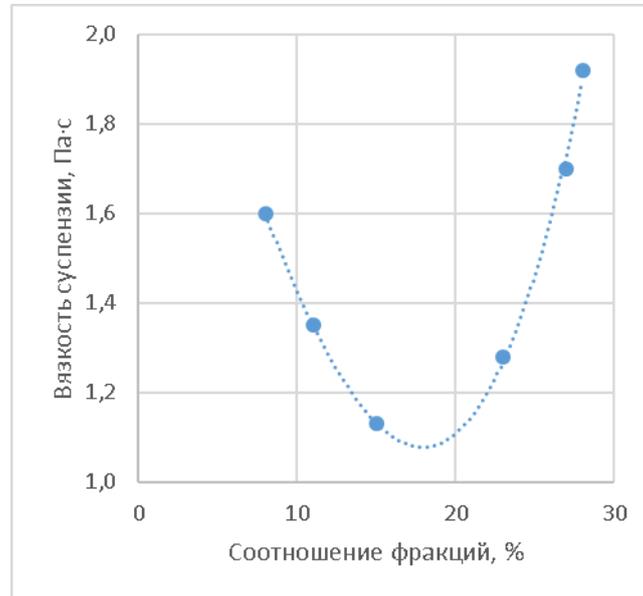
На рис. 2 приведена зависимость изменения водородного показателя воды от длительности кавитационной обработки. Следует отметить, что скорость изменения водородного показателя при данной обработке несколько ниже, чем в вибрмельницах, ультразвуковых и роторно-пульсационных аппаратах.



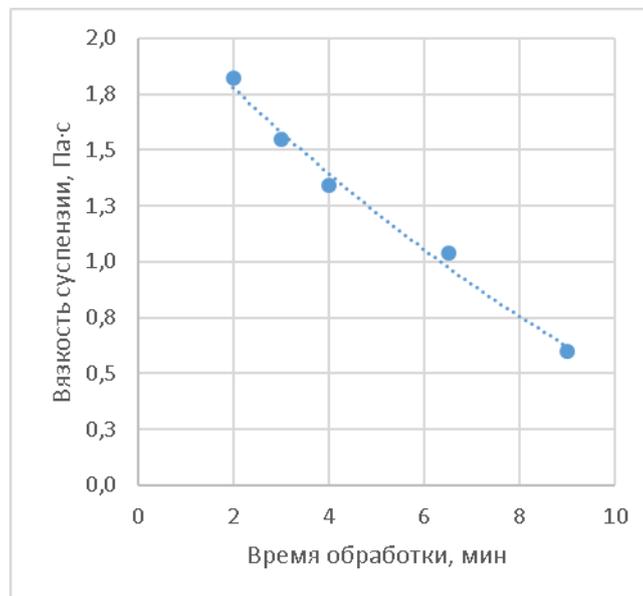
**Рис. 2. Зависимость изменения водородного показателя воды от длительности кавитационной обработки (число кавитации – 0,25; температура воды – 15,9÷18,1°С)**

Гранулометрический состав изучаемой водоугольной смеси (рис. 3) влияет на ее реологические параметры. Увеличение доли мелкой фракции приводит к снижению вязкости суспензии. Также следует отметить, что на снижение структурной вязкости водоугольной суспензии влияет использование в качестве дисперсионной среды щелочной воды. При использовании воды со значением водородного показателя 8,5÷9,0 при кавитационном диспергировании водоугольной смеси происходит образование сульфогуминовых кислот, солей гуматов обладающих желатинообразующими (связывающими наподобие желатина, действующими как реагент-пластификатор) свойствами, что приводит к образованию устойчивой во времени дисперсии.

Применение способа кавитационного диспергирования твердой фазы увеличивает долю мелкой фракции за счет гидроударов, истирания на лопастях кавитатора, взаимодействия между частицами угля, что приводит к снижению структурной вязкости водоугольной суспензии (рис. 4).



**Рис. 3. Зависимость изменения вязкости 30% водоугольной суспензии в зависимости от соотношения крупной (0,1÷0,5 мм) и мелкой фракций (менее 0,1 мм)**



**Рис. 4. Зависимость изменения вязкости водоугольной суспензии от времени кавитационного диспергирования (массовая доля угля 30%, температура суспензии 16,1÷23,8°С)**

Фракционный состав частиц водоугольной смеси после помола на шаровой мельнице и обработанной способом кавитационного диспергирования приведен в табл. 1.

Таблица 1

**Фракционный состав частиц водоугольной смеси после помола на шаровой мельнице и последующей обработке способом кавитационного диспергирования**

Размер частиц угля, мм	Содержание частиц после помола на шаровой мельнице, %	Содержание частиц после кавитационного диспергирования, %
4÷5	21	–
3÷4	14	11
2÷3	12	8
1÷2	11	17
0,5÷1	15	12
0,1÷0,5	17	23
меньше 0,1	10	29

Установлено, что после кавитационного диспергирования исходной смеси полностью удалось избавиться от частиц угля фракции 4÷5 мм, приблизительно на 27% снизить содержание фракции 2÷4 мм и практически в три раза увеличить содержание фракции частиц угля размером меньше 0,1 мм, что существенно влияет на стабильность водоугольной суспензии. Полученные результаты нельзя назвать полностью удовлетворительными, в связи с чем необходимо дальнейшее проведение исследований с целью интенсификации и повышения эффективности процесса диспергирования, подбора оптимальных технологических режимов обработки исходной смеси. Совмещение процессов диспергирования угля и подготовки щелочной воды в одной установке позволит снизить энергетические затраты и снизить стоимость производства водоугольной суспензии.

**Выводы.** Использование в одном устройстве нескольких процессов позволит создавать оборудование низкой себестоимости, широкой сферы

применения и достаточно простые технологические линии изготовления водоугольной суспензии.

Продолжение исследований в данном направлении, использование системного анализа полученных данных позволит выделить практические направления энергосбережения и практические задачи использования кавитационных аппаратов в различных областях промышленности.

### **Литература**

1. Круть О.А., Білецький В.С. Водовугільне паливо: стан проблеми і перспективи використання / Вісн. НАН України. – 2013. – № 8. – С. 58–65.
2. Халатов А.А., Костенко Н.В., Шіхабутінова О.В. Водовугільне паливо в енергетиці України. Сучасний стан і проблеми розвитку / Вісник Академії митної служби України. Сер. : Технічні науки. – 2009. – № 2. – С. 33–43.
3. Вітенько Т.М. Гідродинамічна кавітація у масообмінних, хімічних і біологічних процесах: монографія / Вітенько Т.М. – Тернопіль, (видавництво Тернопільського державного технічного університету імені Івана Пулюя). 2009. – 224 с.
4. Ивченко В.М. Кавитационная технология / В.М. Ивченко, В.А. Кулагин, А.Ф. Немчин // Под ред. акад. Г.В. Логвиновича. Красноярск: Изд-во КГУ, 1990. 200 с.
5. Овчинников Ю.В., Ноздренко Г.В., Шинников П.А. и др. Способ производства жидкого композитного топлива. Патент на изобретение RU № 2151959. Приоритет от 08.06.1999.
6. Ходаков Г.С. Реология суспензий. Теория фазового течения и ее экспериментальное обоснование / Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева). – 2003. – т. XLVII, №2. – С. 33–44.