



**УДК 628.31**

**О.В. КРАВЧЕНКО**, канд. техн. наук, с.н.с., руководитель отдела, **Е.Ю. АНДРИЕНКО**, аспирант, инженер  
Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, г. Харьков

## **ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ И ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ФЕНОЛЬНЫХ СТОЧНЫХ ВОД В КАЧЕСТВЕ КОМПОНЕНТА ВОДОУГОЛЬНЫХ ТОПЛИВ**

Рассмотрены энергетические и экологические аспекты использования фенольных сточных вод в качестве водной составляющей водоугольных топлив. Показано, что присутствие фенола в воде не только облегчает процесс приготовления топлива, но и улучшает реологические свойства готовой суспензии. Применение методов кавитационной обработки в процессе приготовления и сжигания водоугольного топлива позволяет утилизировать и обезвредить фенольные стоки.

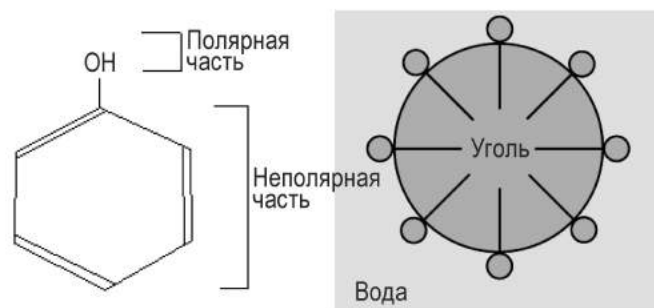
**Ключевые слова:** водоугольное топливо, вязкость, кавитация, очистка сточных вод, роторно-пульсационный аппарат, поверхностно-активное вещество, седиментация, фенолы.

В условиях роста цен на основные углеводородные энергоносители теплоэнергетика испытывает потребность в замене газа и мазута более доступным жидким топливом. Альтернативой может стать водоугольное топливо (ВУТ), обладающее определенными преимуществами. В состав традиционных ВУТ входят: уголь (60–70 %), вода (29–39 %) и реагент-пластификатор (около 1 %).

Сжигание ВУТ происходит при температуре 900–1100 °С, в то время как при пылеугольном сжигании температура составляет порядка 1300 °С. За счет снижения температуры горения использование ВУТ дает меньше газообразных выбросов оксидов азота в атмосферу [1].

Ранее проведенные эксперименты по производству и сжиганию водомазутного топлива на основе фенольной воды показали возможность эффективного обезвреживания фенольных сточных вод в топочной камере энергоустановки [2].

Фенол является поверхностно-активным веществом, поскольку его молекула дифильна (рис. 1), имеет полярную (гидроксильная группа) и неполярную (бензольное кольцо) части. Молекулы фенолов концентрируются на поверхности раздела фаз, ориентируются полярной группой в сторону воды, а неполярной – к угольным зернам, что облегчает их смачивание. Фенолы стабилизируют суспензию, предотвращая оседание угольных частиц, что позволяет использовать фенольные стоки в качестве ПАВ для водоугольных суспензий. Также фенолы обладают слабовыраженными пластифицирующими свойствами, ослабляя силы взаимодействия макромолекул состава между собой и облегчая взаимную перегруппировку угольных частиц под влиянием внешних воздействий, что способствует повышению подвижности водоугольной суспензии.



**Рисунок 1 – Структура молекулы фенола. Ориентирование молекул фенола в водоугольной суспензии**

Были проведены серии экспериментов по приготовлению топлива на основе фенольной воды. Уголь добавляли в воду, перемешивали в емкости мешалкой и затем обрабатывали в кавитаторе. Для одной серии экс-

периментов водоугольное топливо готовилось на основе чистой воды, для второй и третьей – на основе воды, содержащей 1,5 и 25 г/л фенола. Выбор указанных концентраций обусловлен тем, что концентрация фенолов, соответствующая среднему значению для фенольных сточных вод коксохимических заводов, – 1,5 г/л; максимальное содержание фенолов в сточных водах одного из предприятий – 25 г/л.

Для диспергации и гомогенизации водоугольной суспензии использовали роторно-пульсационный аппарат (РПА). Обработка в РПА обеспечивает условия интенсивного взаимодействия молекул и позволяет добиться высокой дисперсности частиц угля и гомогенности суспензии.

Для получения и подготовки к сжиганию ВУТ использовалась трехстадийная технология приготовления эмульсионных и суспензионных топлив, разработанная в отделе нетрадиционных энерготехнологий Института проблем машиностроения НАН Украины [3], в основе которой лежит принцип кавитационной активации. Применяемая в технологии установка состоит из двух роторно-пульсационных аппаратов (РПА) и смесителя-форсунки. Принципиальная технологическая схема установки показана на рис. 2. Вследствие кавитационного воздействия на обрабатываемую смесь использование данной технологии позволяет повысить эффективность теплообмена, улучшить структурно-реологические, теплофизические и экологические характеристики водоугольного топлива.

Немаловажной особенностью технологии является кавитационная обработка топлива непосредственно перед сжиганием, так как в рабочей камере смесителя-форсунки происходит дополнительное диспергирование твердых частиц, активация топлива за счет образования свободных химических связей и смешение с воздухом с образованием большой площади поверхности контакта топлива с окислителем. Следовательно, для максимальной эффективности сжигания рекомендуется подвергать ВУТ кавитационной активации непосредственно перед подачей в камеру сгорания, так как при хранении его химическая активность снижается.

При дальнейшем сжигании ВУТ, благодаря механохимической активации в процессе его кавитационной обработки, сгорание топлива происходит с высокой степенью выжигания фенольных соединений. Применение иных известных методов подготовки топлива не обеспечивает требуемой полноты сгорания вредных компонентов. Ранее показано [2], что традиционные методы распыливания водомазутного топлива на основе фенольной воды не обеспечивают требуемой дисперсности топливно-воздушной смеси. Анализ продуктов сгорания топли-

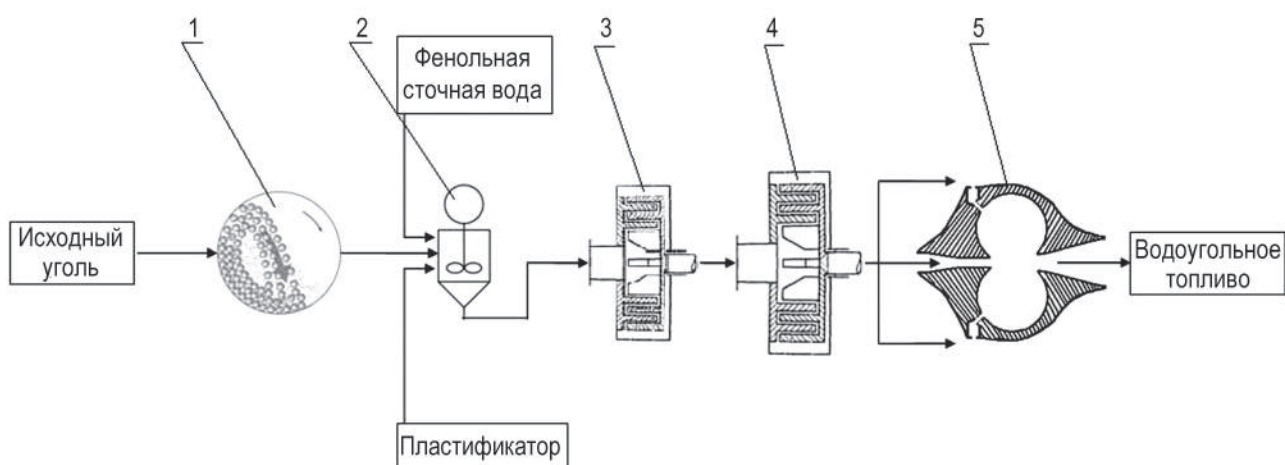


Рисунок 2 – Принципиальная технологическая схема станда по приготовлению и подготовке к сжиганию ВУТ:

1 – шаровая мельница; 2 – мешалка; 3, 4 – роторно-пульсационные аппараты;

5 – гидровихревой преобразователь (смеситель-форсунка)

ва, распыленного с помощью центробежной форсунки, показал наличие в них несгоревшего фенола. Причиной тому – большой размер капель топлива для данной длины камеры сгорания. При распыливании гидровихревой форсункой за счет столкновения вихревых потоков происходит высокоэффективное диспергирование, а также химическая активация, что позволяет снизить недожог.

В процессе приготовления ВУТ на основе фенольной воды заметно ускорилось смачивание угольных частиц. При механическом перемешивании на основе фенольной воды ВУТ не комковалось, в отличие от ВУТ на основе чистой воды. После приготовления топлива существенно уменьшился запах фенола – это обусловлено тем, что уголь сорбирует фенол из воды: фенол из растворенного состояния переходит в адсорбированное.

Для определения концентрации фенола в водной фазе водоугольных смесей был проведен анализ ВУТ при различных начальных концентрациях фенола в смеси и при различной степени кавитационной обработки. Были приготовлены водоугольные суспензии с исходным содержанием фенола в воде 1,5 и 25 г/л. Первый отбор пробы из каждой смеси проводился перед кавитационной обработкой, остальные пробы прошли кавитационную активацию длительностью 5, 7,5 и 10 минут. Из проб водоугольных смесей отфильтровывалась вода, после чего концентрация фенола в ней определялась фотоколориметрическим методом на приборе КФК-3-01. Водоугольные смеси, гомогенизированные с помощью мешалки, имели наивысшую концентрацию фенола. Концентрации фенола в пробах, прошедших кавитационную обработку, были несколько ниже, но существенно друг от друга не отличались (рис. 3). Следовательно, кавитация увеличивает глубину адсорбции фенола углем из водной фазы за счет увеличения удельной поверхности

адсорбента. При концентрации фенола 1,5 г/л длительность кавитационной обработки существенно не влияет на глубину адсорбции.

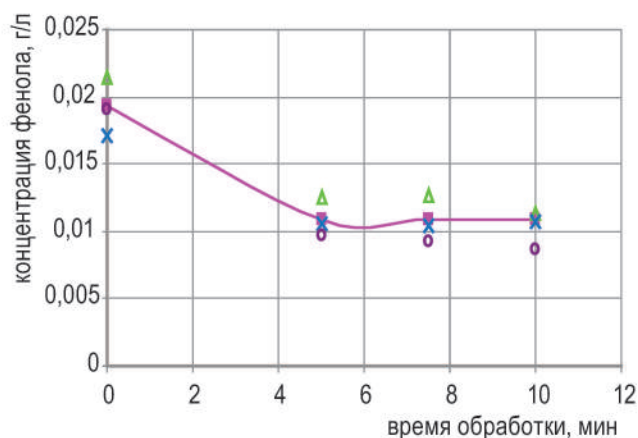


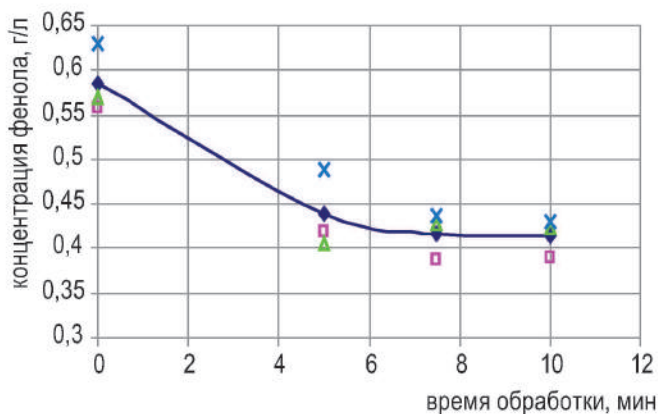
Рисунок 3 – Зависимость концентрации фенола в водной фазе от длительности кавитационной обработки при начальной концентрации фенола 1,5 г/л

При максимальной начальной концентрации фенола (25 г/л) прослеживается существенное уменьшение концентрации фенола в водной фазе при увеличении длительности кавитационной обработки (рис. 4).

Благодаря тому, что уголь, входящий в состав ВУТ, адсорбирует фенол, хранение фенольной воды в составе ВУТ становится более безопасным.

Проведено исследование режимов истечения ВУТ через отверстие 5 мм. В характере истечения суспензий имелось существенное различие: ВУТ с фенолом истекло непрерывной струей, а ВУТ без фенола – отдельными каплями. Время прохождения 50 мл суспензии через отверстие было больше для ВУТ без фенола.

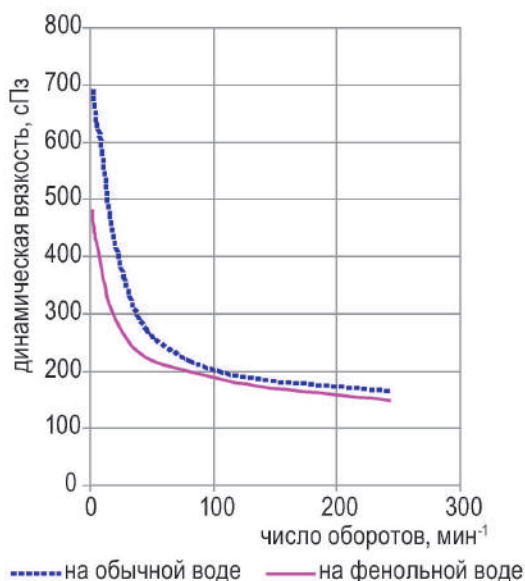




**Рисунок 4 – Зависимость концентрации фенола в водной фазе от длительности кавитационной обработки при начальной концентрации фенола 25 г/л**

ВУТ не обладает седиментационной устойчивостью без ввода дополнительных стабилизирующих агентов (например, КМЦ – карбометилцеллюлозы [4]). Для стабилизации и улучшения реологических свойств водоугольных суспензий обычно используются ПАВ и пластификаторы [5] (например, С-3, Дофен, ЛСТ, УЦР). Исследования реологических свойств ВУТ на основе фенольной воды показали, что она обладает слабовыраженными пластифицирующими свойствами.

Вязкость ВУТ определяли с помощью вискозиметра Реотест 2 на цилиндрическом измерительном устройстве. Результаты измерения динамической вязкости при различных скоростях вращения измерительного цилиндра приведены на рис. 5. Вязкость образцов без фенола оказалась выше, чем с фенолом.



**Рисунок 5 – Исследование динамической вязкости ВУТ**

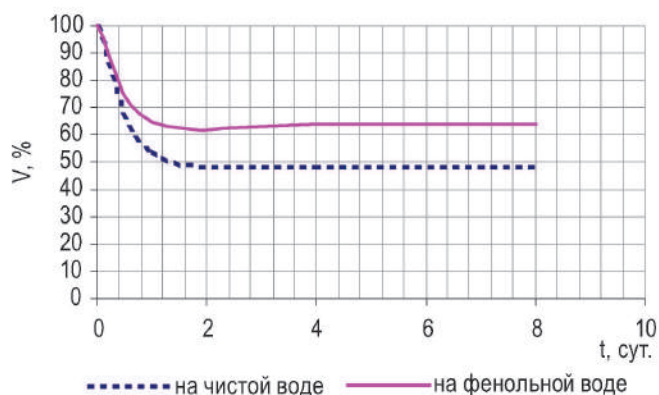
Установлено, что использование фенольной сточной воды для получения ВУТ с требуемой вязкостью (0,5 Па·с) позволяет снизить количество реагента-пластификатора с 1 % от массы твердой фазы до 0,5.

Исследован процесс осаждения угольных частиц в водоугольной смеси. Для большей наглядности водоугольное топливо было приготовлено с повышенным содержанием воды (70 % воды, 30 % угля). После приготовления пробы отстаивали, измеряя уровень осадка в цилиндре. На рис. 6 показаны фотографии проб спустя 4 суток после их приготовления. В пробах, приготовленных на основе фенольной воды, седиментация оказалась на 25–30 % меньше, чем в пробах, приготовленных на основе чистой воды, а уровень осадка, соответственно, выше.



**Рисунок 6 – Визуализация осаждения угольных частиц ВУТ, обработанных в кавитаторе в течение 5 минут: слева – на основе чистой воды, справа – на основе фенольной воды**

Динамика седиментации водоугольной суспензии показана на рис. 7.



**Рисунок 7 – Динамика осаждения частиц угля (процент водоугольной части от общего объема жидкости)**



Таким образом, экспериментально доказано, что фенол, содержащийся в сточных водах, при использовании в качестве водной фазы в водоугольных суспензиях повышает их седиментационную устойчивость.

Испытания по распыливанию водоугольного топлива с помощью кавитационной форсунки показали высокое качество распыла, достаточное для полного обезвреживания фенольной воды при сжигании ВУТ в камере сгорания.

## ВЫВОДЫ

Водоугольные топлива, приготовленные на основе фенольной воды, обладают улучшенными эксплуатационными характеристиками по сравнению с традиционными.

Важным экологическим аспектом является снижение токсичности фенольных вод в процессе их хранения в составе ВУТ перед их обезвреживанием в топочной камере.

Выбранный способ получения и подготовки перед сжиганием водоугольного топлива на основе фенольных стоков позволяет достигнуть максимальной эффективности обезвреживания сточной воды при сжигании в составе композиционного топлива.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Мурко, В.И.** Результаты измерений вредных выбросов при сжигании суспензионного угольного топлива / В.И. Мурко,

Розглянуто енергетичні та екологічні аспекти використання фенольних стічних вод як водної складової водоугольних палив. Показано, що наявність фенолу у воді не тільки полегшує процес приготування палива, але й покращує реологічні властивості готової суспензії. Застосування методів кавітаційної обробки в процесі приготування і спалювання водоугольного палива дозволяє утилізувати та знешкодити фенольні стоки.

В.И. Федяев // Сб. докладов Междунар. науч.-практ. конф. «Управление отходами – основа восстановления экологического равновесия в Кузбассе. – Новокузнецк, 2008. – С. 177.

2. Метод огневого обесфеноливания сточных вод коксохимических заводов / Е.Ю. Андриенко, А.В. Бастеев, О.В. Кравченко, П.В. Карножицкий, Л.В. Тарасенко, К. Юссеф // Углекимический журнал. – 2009. – № 5–6. – С. 69–74. – ISSN 1681-309X.
3. Пат. 79617 Украина, МПК<sup>с</sup> C10G15/00. Спосіб кавітаційної гідрогенізації та гідролізу вуглеводнів і пристрій для його здійснення / Мирошніченко І.І., Мацевитий Ю.М., Мирошніченко І.І., Кравченко О.В., Тарелін А.А.; заявитель и патентообладатель Инст. проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины. – № а200500188; заявл. 10.01.05; опубл. 10.07.07, Бюл. № 10. – 6 с.: ил.
4. Пат. 2178455 Российская Федерация, МПК<sup>с</sup> C10L1/32. Способ получения водоугольного топлива / Делягин Г.Н., Петраков А.П., Ерохин С.Ф., Дуняшева В.Л.; заявитель и патентообладатель ГУП НПО «Гидротрубопровод». – № 2000127871; заявл. 09.11.00; опубл. 20.01.02, Бюл. № 2. – 5 с.: ил.
5. Пат. 2054455 Российская Федерация, МПК<sup>с</sup> C10L1/32. Способ получения водоугольной суспензии / Каган Я.М., Кондратьев А.С., Корнилов В.В.; заявитель и патентообладатель НПО «Гидротрубопровод». – № 93015358; заявл. 23.03.93; опубл. 20.02.96, Бюл. № 5. – 11 с.: ил.

*Поступила в редакцию 17.02.2011*

Energy and environmental aspects of phenolic waste water use as a water component of water-coal fuels are considered. It is shown that phenol presence in water not only facilitates the process of fuel preparing, but also improves the rheological properties of the finished suspension. Application of cavitation methods for processing during preparation and combustion of coal-water fuel enables utilizing and neutralizing phenolic wastewater.