

1.Младецкий И.К., Мостыка Ю.С. Аналитическое определение показателей раскрытия руд.-
Днепропетровск: Системные технологии, 1999 - 106 с.

*Поступила в редколлегию
Рекомендована к публикации*

УДК 541.183:622.33+622.693

А.С. МАКАРОВ д-р. техн. наук,
А.И. ЕГУРНОВ, директор ГП "ГПКИ Гипромашобогашение",
В.А. ЗАВГОРОДНИЙ, А.Л. КОХАНЮК.

Физико-химические и технологические основы получения высококонцентрированного водоугольного топлива.

В огляді висвітлено фізико-хімічні та технологічні основи створення висококонцентрованого водовугільного палива.

Ключові слова: водовугільна суспензія, тверда фаза, дисперсійне середовище, в'язкість, стабілізація.

В обзоре освещены физико-химические и технологические основы получения высококонцентрированного водоугольного топлива.

Ключевые слова: водоугольная суспензия, твердая фаза, дисперсионная среда, вязкость, стабилизация.

Производство тепловой и электрической энергии в Украине и в странах СНГ в значительной мере ориентировано на использование угля, природного газа и жидких нефтепродуктов. Помимо тепловых электростанций энергетика Украины – это тысячи котелен малой и средней мощности от 0,05 до 100 МВт, работающих на самых разнообразных видах топлива, начиная от природного газа и кончая окомкованным комбинированным топливом.

Как правило, теплогенерирующие установки малой энергетики являются экологически наименее чистыми объектами с очень низкой эффективностью использования топлива. Рост цен на газ и нефтепродукты в сочетании с ужесточением экологических требований к производству тепловой и электрической энергий, явились стимулирующим фактором в поисках новых теплоносителей. Одним из таких источников энергии является новое, более экологически чистое водоугольное топливо (ВУТ) – высококонцентрированная водоугольная суспензия (ВВУС), создаваемая на основе различных марок каменных энергетических углей и воды (природной, технической, промышленных стоков). [1-7].

В последние годы разработаны различные составы высококонцентрированного водоугольного топлива во многих странах – Японии, США, Италии, России, Китае, Украине [6-11]. Учитывая опыт первого в России экспериментального углепровода Белово-Новосибирск, подтвердившего что ВУТ легко может транспортироваться на большие расстояния по трубам (270 км), в Китае строился трубопровод для транспортирования ВУТ на расстояние 800 км. [8].

Вода в ВУТ является не балластом, а своеобразным катализатором, который улучшает

и ускоряет процесс горения, способствует более высокой полноте сгорания при меньшем расходе воздуха. При этом в продуктах сгорания значительно снижено количество сажи, оксидов азота, серы, монооксида углерода.

Возможная утечка и разлив ВУТ не вызывает негативных экологических последствий в отличии от последствий утечек нефти и нефтепродуктов [12].

Для приготовления ВУТ в качестве дисперсионной среды можно использовать промышленные отходы, например, отходы фармацевтической промышленности [13] или образующиеся в большом количестве при добыче угля шахтные воды, загрязненные угольнопородными частицами, бактериями и солями [14].

При массовой доле угля в суспензии 60-70% становится возможным сжигать ее непосредственно в котлоагрегатах без предварительного обезвоживания. Увеличение содержания угля в суспензии при сохранении ее текучести и стабильности свойств можно достигнуть, обеспечив оптимальный гранулометрический состав частичек дисперсной фазы и применив специальные химические добавки – пластификаторы и стабилизаторы.

Оптимально плотной упаковкой частичек твердой фазы в единице объема, является бимодальный характер их распределения по размерам с определенным соотношением крупной (100–250 мкм) и мелкой (<40 мкм) фракций [1,7]. При этом концентрацию мелкой фракции в твердой фазе суспензий целесообразно держать 30-40 масс. %. Верхний предел размеров крупной фракции не должен превышать 250-300 мкм, что определяется требованиями седиментационной устойчивости суспензии, а так же ограничениями, связанные с диаметром сопла в форсунке и режимом сжигания.

В зависимости от количества минеральной составляющей в угле и ее физико-химических свойств разработаны несколько технологий измельчения дробленого угля для достижения оптимального гранулометрического состава ВВУС [10,11].

Существенную роль в механохимических процессах, влияющих на интенсивность процесса помола углей, играют состав минеральных примесей и дисперсионная среда, в которой осуществляется помол. Например, наличие в жидкой фазе алкилсульфатов, алкилфенолов, алкилфосфатов, замедляет процесс помола угля симбатно числу атомов углерода в цепи. Снижение интенсивности помола, по-видимому, связано с тем, что, являясь хорошими смачивателями, указанные химические реагенты увеличивают сорбцию молекул воды угольными частицами, что приводит к набуханию последних и уменьшению их хрупкости [15], а также к снижению сил трения между частицами, играющих решающую роль в процессе диспергирования угля [16].

Многие химические добавки, например продукт поликонденсации β -нафталинсульфо кислоты с формальдегидом (НФУ), гидроксид натрия (NaOH), лигносульфонат на натриевом основании (ЛСТ), сочетание ЛСТ с NaOH в соотношении 3:1 (ЛСУ), триполифосфат натрия (ТПФNa), приводят к интенсификации процессов механодеструкции [11,15] по связям C-O-, C-C-, C-H, и разрушению исходной структуры органических веществ угля. При механическом воздействии в присутствии щелочных компонентов происходят механохимические реакции, связанные с выделением в дисперсионную среду солей гуминовых кислот, которые впоследствии играют важную роль в разжижении и стабилизации ВВУС [4-7]. Ускорение процесса диспергирования сопровождается ростом величины контактной разности потенциалов (КРП), возникающей между исследуемым электродом (образцом) и эталонным платиновым электродом, образующими динамический конденсатор [4,11,17]. Возрастание потенциала поверхности частиц угля может указывать на эффективность разжижающего действия химических добавок в суспензиях [4].

Решение проблем устойчивости ВВУС и сохранение требуемых реологических характеристик при хранении и транспортировании, решается введением в систему специальных химических добавок.

Анализ патентной литературы показывает, что в качестве понизителей вязкости и стабилизаторов ВВУС используют практически все основные классы поверхностно-активных веществ, защитные коллоиды, полиэлектролиты, продукты переработки угля, а также многокомпонентные композиции [5,6]. Особую группу составляют защитные коллоиды, обладающие сильной стабилизирующей способностью, а часто и разжижающим действием. К ним относятся высокомолекулярные соединения, например, глюкозиды, природные полисахариды, лигносульфоновые кислоты и их соли, полиэферы и их производные и т.д.

Высокомолекулярные ПАВ адсорбируясь на поверхности частиц, образуя студнеобразный слой толщиной в десятки и сотни нанометров, обуславливают высокую стабильность дисперсных систем. Низкомолекулярные ПАВ, как правило, обеспечивают диспергирующие свойства, снижая межфазное натяжение. В зависимости от количества ПАВ в системе, они могут оказывать как агрегирующее, так и пептизирующее (стабилизирующее) действие. Таким образом, значительную роль при создании ВВУС с заданными свойствами играет выбор оптимальных концентраций добавок и соотношение компонентов комплексных композиций [2-5].

При использовании комплексных добавок, включающих стабилизатор и разжижитель, возможна различная последовательность введения компонентов. В ряде патентных публикаций предлагается сначала вводить понизитель вязкости, а затем стабилизатор. В других работах наоборот, сначала вводится стабилизатор, препятствующий агрегации твердых частиц, а затем реагент, обеспечивающий уменьшение трения между частицами.

Стабилизация грубодисперсных систем поверхностно-активными веществами, согласно П.А. Ребиндеру, обусловлена двумя основными факторами: во-первых, образованием на поверхности частиц суспензии двойного электрического слоя, создающего электростатическое отталкивание между частицами дисперсной фазы (электростатический фактор), и, во-вторых, созданием на поверхности частиц сольватных и адсорбционно-сольватных слоев, обладающих особой структурой и свойствами и приводящих к возникновению структурной (сольватной) составляющей расклинивающего давления (структурно-механический фактор).

При выборе сочетания двух или большего числа добавок для получения маловязких и устойчивых суспензий следует учитывать их влияние на гранулометрический состав суспензии в процессе помола, отдавая предпочтение тем из них, которые наряду со стабилизацией частиц, способствуют улучшению гранулометрического состава.

Эффективность действия того или иного химического реагента на водоугольные суспензии, определяется качеством угля (прежде всего зольностью, составом минеральной части, степенью окисленности, стадией метаморфизма), а также зависит от условий получения ВВУС, и химического состава водной среды. Химические добавки, дающие временный стабилизирующий и разжижающий эффект (порядка несколько суток), можно успешно применять при создании ВВУС, которые непосредственно подвергаются сжиганию без длительного хранения и транспортирования.

Наиболее перспективными с точки зрения эффективности воздействия на водоугольные системы и с экономических позиций, являются добавки на основе технических лигносульфанатов (ЛСТ), гуматных реагентов (УЦР), полифосфатов и диспергатора НФУ [4]. Влияние указанных химических реагентов на характеристики

поверхности угля и реологические свойства ВВУС показаны в таблице.

Эффективность разжижающего и стабилизирующего действия лигно-сульфанатов, УЩР, НФУ, в значительной степени определяется широким диапазоном их молекулярной массы и функциональным составом. Низкомолекулярная фракция указанных реагентов обладает большим разжижающим эффектом, в то время как высокомолекулярная фракция стабилизирует водоугольные суспензии.

Триполифосфат натрия не имеет высокомолекулярной фракции, поэтому состав ВВУС на его основе не стабилен, но в сочетании с УЩР седиментационная устойчивость гидродисперсии угля повысилась и составила 20 суток (табл.).

Таблица

Наименование добавки к ВВУС (массовая доля добавки 1% на сухой уголь).	рН 20% -го раствора добавки	Характеристика поверхности угольных дисперсий		Реологические характеристики 62% ВВУС			Седиментационная устойчивость, суток
		Теплота смачив. водой, Дж/г	КРП мV	Эффективная вязкость, Па·с при $D=9c^{-1}$		Предельное напряжение сдвига, Па.	
				Свежеприготовленная	Через 5 суток		
Без добавки	–	10,55	71	8,74	–	24,0	0
ЛСТ Na	4,50	15,28	178	1,49	2,67	10,0	1,0
ЛСТ Na	7,75	15,83	196	0,90	1,98	4,0	2,0
ЛСТ Na	11,20	16,08	216	0,65	0,84	1,5	>30
ЛСТ Ca	11,20	14,95	102	2,04	5,18	12,0	20.0
ФХЛС	12,07	16,29	247	0,45	0,61	0,1	30.0
НФУ	7,14	16,62	267	1,20	1,43	6,9	>30
УЩР	9,05	15,16	107	1,93	4,93	11,4	3.0
ТПФ Na	10,05	16,37	288	0,38	0,53	0,3	0.1
УЩР + ТПФ Na	10,40	15,20	175	0,76	1,16	2,1	20.0

Технические лигносульфанаты обладают широким спектром распределения по молекулярной массе. Это делает указанную добавку до определенной степени универсальной. Перспективным является путь направленного модифицирования ЛСТ с целью увеличения его эффективности для получения суспензии с заданными свойствами [5,9]. Модифицирование лигносульфанатов проводят обычно по двум основным направлениям: первое – перевод лигносульфанатов в другое основание по валентности катиона; второе – введение в лигносульфоновый комплекс дополнительных

функциональных групп. При частичной или полной замене катиона натрия (табл.) на двухвалентные катионы Ca^{+2} и Mg^{+2} разжижающее действие ЛСТ на водоугольные суспензии значительно ослабляется. Это, возможно, связано с уменьшением растворимости лигносульфонового комплекса. Однако введение указанных выше катионов оказывает положительное влияние на повышение стабильности системы.

Особый интерес представляют лигносульфанаты, содержащие трехвалентные катионы хрома и железа, так называемые феррохром лигносульфанаты (ФХЛС), получаемые обработкой лигносульфовых кислот сернокислыми солями хрома и железа. Введение катионов Fe^{+3} и Cr^{+3} способствует увеличению молекулярной массы лигносульфанатов вследствие образования комплексов. ФХЛС обладают рядом преимуществ перед лигносульфатами кальция, алюминия, натрия. ФХЛС придает суспензии устойчивость в минерализованных средах при пониженной вязкости (табл.), что особенно важно при получении водоугольных композиций на шахтных водах. Кроме того, катионы хрома повышают термостойкость лигносульфанатов при приготовлении ВВУС способом мокрого измельчения. Изменяя соотношение между количествами железа и хрома, можно регулировать свойства реагента. При увеличении количества катионов хрома, ФХЛС приобретает в основном свойства понизителя вязкости, а при увеличении содержания катионов железа – свойства стабилизатора, понизителя водоотдачи.

Окисление лигносульфанатов приводит к повышению эффективности их действия как понизителя вязкости. Это связано с тем, что в процессе окисления молекулярные цепочки лигносульфанатов разрушаются, образуя активные кислородсодержащие группы, увеличивающие сорбционную активность лигносульфонового комплекса [18].

Установлено также существенное влияние рН растворов лигносульфанатов на реологические свойства ВВУС. Вязкость при всех скоростях сдвига и предельное напряжение сдвига уменьшаются с повышением рН раствора от 4,5 до 12 (табл.). Указанные изменения происходят, по-видимому, в результате деполимеризации (уменьшения молекулярной массы) лигносульфонового комплекса в щелочной среде [19]. Кроме того, щелочной гидролиз в условиях мягкого окисления позволяет видоизменять молекулы лигносульфанатов, придавать им более высокую поверхностную активность и диспергирующую способность. Модифицированные путем щелочного гидролиза лигносульфанаты содержат больше фенольных оксигрупп, а также карбоксильных групп [18], что способствует их адсорбции на поверхности минеральных частиц угля. Использование добавок в щелочных средах также благоприятно с точки зрения коррозионной защиты трубопроводов и оборудования.

Как уже упоминалось, способность действовать как понизители вязкости и стабилизаторы, обладают реагенты на основе гуминовых кислот. Вследствие низкой стоимости и доступности материалов, эти реагенты быстро получили широкое распространение. Эффективность действия этих добавок на водоугольные суспензии описана как в научной, так и в патентной литературе [4].

Гуминовые кислоты представляют собой смесь органических коллоидных веществ с конденсированными ароматическими ядрами, имеющими боковые цепи и различные функциональные группы (карбоксильные, карбонильные, фенильные, метоксильные и др.). В боковой цепи глюкозидной связью присоединен углеводородный комплекс и амидной связью – аминокислотный комплекс. Основные структурные единицы молекулы гуминовых кислот соединены между собой простыми эфирными связями, которые могут быть гидролизованы [18]. Гуминовые кислоты являются высокомолекулярными соединениями с молекулярной массой 4000-8500. Молекулы гуминовых кислот склонны к

ассоциации за счет образования водородных связей (мостиков) и за счет ван-дер-ваальсовского взаимодействия их ароматических колец с увеличением молекулярной массы до 30000-40000. Ассоциация гуминовых кислот возрастает с повышением концентрации электролитов в растворе.

При низких значениях рН гуминовые кислоты ассоциированы в крупные мицеллы, имеющие симметричное строение с гидрофильной наружной оболочкой. Адсорбция гуминовых кислот на твердой поверхности при всех концентрациях электролита осуществляется мономицеллярно.

Укрупнение молекул гуминовых кислот является причиной снижения их активности в малощелочных и минерализованных системах.

В щелочной среде медленная диффузия ионов OH^- внутрь мицеллы приводит к последовательному разрушению мицелл гумата до отдельных ионов. Установлено [18], что при повышении рН до 10 происходит полное диспергирование гуминовых кислот и повышение их сорбционной активности.

Гуминовые кислоты способны также к обменным реакциям катионов, причем обменная емкость гуматов (натриевых солей гуминовых кислот) растет с увеличением рН. Нецелесообразно применение гуматов при наличии в системе поливалентных катионов, так как происходит резкое уменьшение растворимости гуматов и выпадение их в осадок с образованием твердообразных структурированных солей.

В водоугольных суспензиях растворы гуматов натрия адсорбируются на поверхности угольных частиц и минеральной составляющей. Адсорбция вызывается водородными связями, а также частично носит ионообменный характер. Адсорбируясь на поверхности частиц дисперсной фазы, гуматы подобно лигносульфанатам и полифосфатам образуют сольватный слой, при этом увеличиваются теплоты смачивания и поверхностный потенциал частиц (рис. 1,2), обеспечивая, тем самым, структурно-механический и электростатический фактор устойчивости [4].

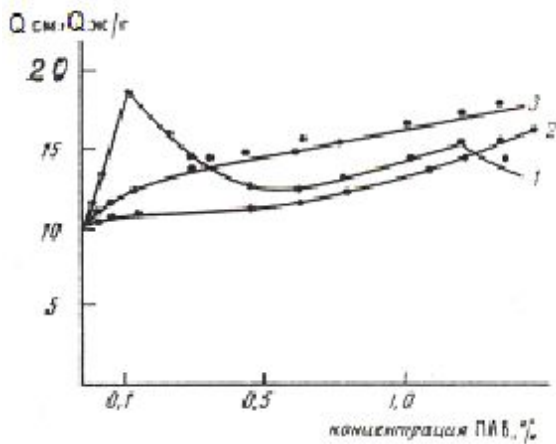


Рис. 1. Зависимость теплоты смачивания поверхности угля водой от концентрации введенной добавки ПАВ: 1-ЛСТ; 2-УЩР; 3-ТПФ.

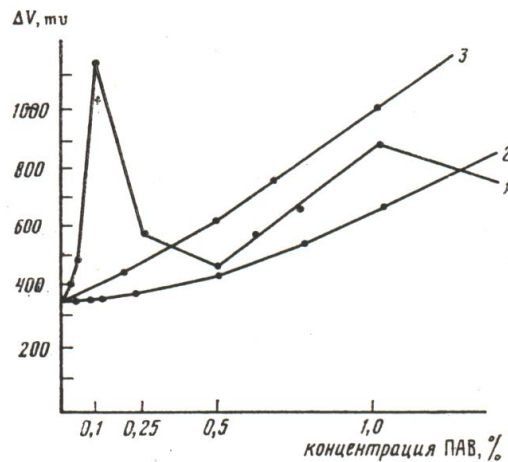


Рис. 2. Зависимость потенциала поверхности угля (КРП) от концентрации введенной добавки ПАВ: 1-ЛСТ; 2-УЩР; 3-ТПФ.

К числу химических реагентов на основе гуминовых кислот относятся углещелочной реагент (УЩР) и торфощелочной реагент (ТЩР). Качество этих реагентов зависит от содержания гуминовых веществ в исходном материале, а также степени их извлечения щелочью.

Одним из перспективных классов разжижителей и интенсификаторов помола высококонцентрированных водоугольных суспензий являются конденсированные фосфаты. Конденсированные или молекулярно обезвоженные фосфаты представляют собой соли полифосфорных кислот после удаления молекулярной (химически связанной) воды; при этом получают две обезвоженные формы: метафосфаты и пирофосфаты. При взаимодействиях мета- и пирофосфатов получают полифосфаты [19].

В зависимости от соотношения между Na_2O и P_2O_5 при медленном охлаждении могут быть получены полифосфаты, имеющие цепочечную или кольцевую кристаллические структуры.

Производство полифосфатов несложно. При любом методе основным является удаление молекулярной воды. Фосфаты характеризуются отношением Na_2O/P_2O_5 , которое имеет величины от 0,9 до 2,0. С увеличением отношения Na_2O/P_2O_5 повышается активность фосфатов, как понизителей вязкости. Из группы пирофосфатов лучшими свойствами разжижителей обладают четырехзамещенный пирофосфат натрия $Na_4P_2O_7$ и кислый пирофосфат натрия $Na_2H_2P_2O_7$.

Из мета- и пирофосфатов, взятых в различных соотношениях при различной температуре в течение некоторого времени можно получить комплексные полифосфаты, химический состав которых отвечает различным формулам, в которых количество атомов фосфата постепенно возрастает. Состав этих фосфатов характеризуется общей формулой $Na_{n+2}P_nO_{3n+1}$. Типичными представителями этого класса соединений являются триполифосфат натрия $Na_5P_3O_{10}$ и тетраполифосфат натрия $Na_6P_4O_{13}$.

В водных растворах конденсированные фосфаты гидролизуются и частично теряют свои свойства понизителей вязкости. Однако, скорость гидролиза в нормальных условиях при низкой температуре и высоком рН чрезвычайно низка. С увеличением температуры до 80-100 °С скорость гидролиза возрастает почти в миллион раз. Скорость гидролиза фосфатов также значительно возрастает в суспензиях, что связано с химическим взаимодействием между частицами твердой фазы (особенно минеральной составляющей) и фосфатами. Ионы водорода являются катализаторами гидролиза, поэтому фосфаты целесообразно применять в щелочных растворах. В присутствии поливалентных катионов выпадают нерастворимые осадки солей. Снижение вязкости дисперсных систем фосфатами связано с блокированием активных участков поверхности дисперсной фазы и повышением потенциала поверхности частиц [4].

Сложность применения фосфатов в водоугольных суспензиях связана прежде всего с тем, что фосфаты не в состоянии обеспечить седиментационную устойчивость системы, так как они обладают способностью предотвращать образование коагуляционной структуры глинистой составляющей. Адсорбируясь на выступающих краях частиц, они предотвращают притяжение между ними, обусловленное силами свободных валентностей. Кроме того, при наличии высокого содержания минеральной составляющей, повышается вероятность гидролиза полифосфатов.

Однако, несмотря на эти ограничения, применение фосфатов весьма перспективно, особенно в случае приготовления ВВУС на основе малозольных углей, а также в составе комплексных химических добавок.

Таким образом, эффективность действия добавок на водоугольные суспензии в достаточной степени определяется их способностью изменять поверхностные свойства дисперсной фазы ВВУС (гидрофильность, поверхностный потенциал (рис. 1,2)). Именно эти величины могут служить одними из критериев выбора добавок при приготовлении высоко концентрированных водоугольных суспензий. Однако, выбор той или иной

добавки и способ ее применения в каждом конкретном случае определяется целым рядом факторов и прежде всего зависит от марки угля, зольности и технологии приготовления ВВУС.

Следует отметить, что на основе ЛСТ, УЦР, ТПФ *Na* и других реагентов можно разработать более эффективные комплексные добавки позволяющие получать ВВУС с концентрацией угля на несколько процентов выше, чем с индивидуальными добавками [5]. Нами установлены области ингредиентов трехкомпонентных составов добавок, в которых достигается их устойчивое синергетическое действие на уменьшение вязкости ВВУС. При этом отмечен также повышенный уровень теплот смачивания и контактной разности потенциалов угольной дисперсии [5].

В экономическом плане представляется целесообразным для рационального использования энергетических ресурсов применять ВУТ вместо сжигания дефицитного топливного мазута, газа, а в перспективе, в качестве моторного топлива для дизелей, над чем усиленно работают зарубежные фирмы, т.к. запасы нефти, по сравнению с запасом угля, ограничены.

Несмотря на уменьшение добычи угля, в угледобывающих регионах Украины сохраняется сложившаяся неудовлетворительная экологическая ситуация. Одна из причин, это накопленное большое количество угольных шламов, которые являются постоянно действующим источником загрязнения окружающей среды. Учитывая, что шламы содержат до 50% горючего материала, наиболее перспективным направлением утилизации, (не требующим сушки) может быть получение на его основе низкосортного жидкого топлива по аналогии с водоугольным топливом со всеми его преимуществами – полнотой сгорания, уменьшением выбросов оксидов азота, серы и монооксида углерода.

В связи с изложенным, нами проведены исследования, которые показали, что применяемые при получении ВВУС химические реагенты, играющие роль пластификаторов, стабилизаторов рН среды, при определенной технологии, вполне применимы для получения ВУТ с необходимыми реологическими свойствами и высокой концентрацией твердой фазы на основе угольных шламов.

Учитывая сравнительно малое содержание горючих веществ в ВУТ на основе шламов, его необходимо производить с массовой долей твердого не менее 65-70%. Переоборудование существующих котлов на сжигание ВУТ не требует замены теплоагрегатов. При сжигании в них водоугольного топлива на основе шлама возможно параллельное горение разных систем при переводе не всех горелок на углешламовые гидродисперсии. Несмотря на пониженную калорийность, использование ВУТ на основе шламов, является целесообразным в экономическом и экологическом аспектах.

Список литературы

1. **Олофинский Е. П.** Исследования гидромеханики трубопроводного транспортирования суспензии. – М.: ВНИИПИ гидротрубопровод, 1985.-с. 4-8.
2. Заявка 58–27795 Япония, МКИ С 10 L 5/00 L 1/32. Приготовление водоугольной суспензии с желаемой вязкостью /**М.Канэру, А.Хисинума, К.Рюити** и др. – Оpubл. 18.02.03
3. Пат. 1559693 А1 Украина, С 10 L 1/32. Спосіб одержання водовугільної суспензії та пристрій для його здійснення /**Завгородній В.А., Дегтяренко Т.Д., Макаров А.С.** і др. Заявл. 29.08.88 Оpubл. 30.09.96 Бюл.№3.
4. **Макаров А.С., Дегтяренко Т.Д., Олофинский Е.П.** и др. Влияние добавок ПАВ на свойства высококонцентрированных водоугольных суспензий для магистрального гидротранспорта. //ХТТ. 1987. – №3 – с. 26-29.
5. **Васильев В.В., Дегтяренко Т.Д., Макаров А.С.** и др. Влияние различных добавок на реологические характеристики высококонцентрированных водоугольных суспензий. //ХТТ – 1988 – №2 –

с. 123-127.

6. Кучер Р.В., Тітов Е.В., Урьев Н.Б. і др. Хімічні стабілізатори і пластифікатори висококонцентрованих водовугільних суспензій. //Вісник АНУССР. – 1988. – №1 – с. 41-50.
7. Макаров А.С., Олофінський Е.П., Дегтяренко Т.Д. Фізико-хімічні основи одержання висококонцентрованих водовугільних суспензій //Вісн. АН УРСР, 1989, №2 – с. 66-75.
8. Хілько С.Л., Тітов Е.В., Башкатова І.М., Попов А.Ф. Перспективи використання колоїдного палива в енергетиці. Хім. промисл. України, – 1999 – №4 – с. 7-12.
9. Дегтяренко Т.Д., Заргородний В.А., Васильев В.В., Макаров А.С. Свойства высококонцентрированных водоугольных суспензий с добавкой лигносульфоната и щелочного компонента. //ХТТ – 1988 – №3 – с. 81-86.
10. Пат. 1545606 А1 Україна, С 10 L 1/32. Добавка до водовугільної суспензії /Зав городній В.А., Макаров А.С., Дегтяренко Т.Д. і др. Заявл. 03.03.88 Опубл. 30.09.96 Бюл. №3.
11. Дегтяренко Т.Д., Завгородний В.А., Макаров А.С., Гамера А.В. Особенности получения высококонцентрированных водоугольных суспензий из малозольных углей. //ХТТ – 1989 – №5 – с. 99-103.
12. Мурко В.И., Корочкин Г.К., Горлов Е.Г., и др. Экологические аспекты приготовления и транспорта водоугольных суспензий. //ХТТ – 1999 – №1 – с. 81-87
13. Макаров А.С., Гамера А.В., Борук С.Д., Завгородний В.А. Использование промышленных сточных вод при получении водоугольного топлива. /ж. Химия и техн. воды, 2002, т.24, №5 – с. 440-446.
14. Красавин А.П. Защита окружающей среды в угольной промышленности. – М.: Недра. 1991-221с.
15. Щукин Е.Д., Конторович С.И., Бессонов А.И. и др. Влияние жидкой среды на прочность и диспергируемость угля. //Коллоид.журн. – 1987. – №4 – с. 728-737.
16. Фейгин Л.А., Рожанский. О возможности полного рентгенографического дисперсионного анализа графитовых порошков и коллоидных препаратов. //Докл. АН СССР. 1957. Т.113 №5. – с. 1102-1105.
17. Руди В.П., Орыняк М.В., Смокоржевский А.В. и др. Исследование поверхностного потенциала бисчетвертичных аммониевых солей на границе фаз раствор-воздух. //Коллоид. журн. 1984 Т.46 №5 – с. 951-954.
18. Чудаков М.И. Промышленное использование лигнина. – М.: Лесн. промышленность – 1983 – с. 200
19. Паус К.Ф. Буровые промывочные жидкости. – М.: Лесн. промышленность – 1981 – 203 с.

*Поступила в редколлегию
Рекомендована к публикации*

УДК 622.271.63

В.Ю. КУХАРЬ

КРИТЕРИЙ ПОДОБИЯ ФИЛЬТРАЦИОННОГО ПОТОКА, ОБРАЗОВАННОГО В ГРУНТЕ ВОДЯНОЙ СТРУЕЙ

Визначено критерій подібності об'ємного фільтраційного потоку, який створений при поширенні у водонаповнений пухкий ґрунт турбулентного осьосиметричного водяного струменя.

Ключові слова: критерій подібності, розмив ґрунту, фільтраційний потік, піддонна зона розмиву.

Определен критерий подобия объемного фильтрационного потока, образованного при распространении в водонаполненный несвязный грунт турбулентной осесимметричной водяной струи.

Ключевые слова: критерий подобия, размыв грунта, фильтрационный поток, поддонная зона размыва.

Проведенные на лабораторной установке экспериментальные исследования