

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ЛУГАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ
ВЛАДИМИРА ДАЛЯ»

На правах рукописи

КАПУСТИН ДЕНИС АЛЕКСЕЕВИЧ

**РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ ПОДГОТОВКИ И
ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ ТОПЛИВНЫХ ВОДОУГОЛЬНЫХ
СУСПЕНЗИЙ ИЗ УГОЛЬНОГО СЫРЬЯ И ШЛАМОВ**

Специальность 05.02.13 – Машины, агрегаты и процессы
(по отраслям)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Луганск – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Луганский государственный университет имени Владимира Даля»

Научный консультант: Гутько Юрий Иванович

доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Луганский государственный
университет имени Владимира Даля», первый
проректор

Официальные оппоненты:

Вишневский Дмитрий Александрович

доктор технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Донбасский государственный
технический университет», ректор (г. Алчевск,
Российская Федерация)

Терентьев Дмитрий Вячеславович

доктор технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный
технический университет им. Г.И. Носова», ректор
(г. Магнитогорск, Российская Федерация)

Сидоров Владимир Анатольевич

доктор технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Донецкий национальный технический
университет», профессор кафедры «Механическое
оборудование заводов черной металлургии»
(г. Донецк, Российская Федерация)

Ведущая организация

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Пензенский государственный технологический
университет» (г. Пенза, Российская Федерация)


Защита состоится «01» декабря 2023 года в 14-00 часов на заседании диссертационного совета Д 001.007.01 на базе ФГБОУ ВО «Донбасский государственный технический университет» по адресу: г. Алчевск, пр. Ленина, 16 (главный корпус), конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться:

в научной библиотеке ФГБОУ ВО «ДонГТУ» в читальном зале по адресу:
г. Алчевск, ул. Ленинградская, 45-а, библиотека.

Автореферат разослан «___» _____ 2023 года

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 001.007.01
канд. техн. наук, доцент



Евгений Сергеевич Смекалин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Необходимость предотвращения экологической катастрофы в сочетании с поиском дополнительных источников дешёвых топливных ресурсов, а также реорганизация угольной отрасли привела к появлению ряда проблем, связанных с переработкой отходов угольной промышленности.

Занимающие общую площадь 1975 га отстойники и действующие ило-шламонакопители, а также десятки уже не используемых общей площадью 295 га не только выводят из сферы полезного использования занимаемые ими земельные угодья, но и представляют собой объекты повышенной экологической угрозы, требующие постоянного наблюдения и контроля, а, следовательно, соответствующих расходов.

Ежегодно работающие обогатительные фабрики производят и складывают в шламонакопителях около 3,3 млн т отходов обогащения. Ориентировочные эксплуатационные затраты на транспортирование и содержание шламонакопителей составляют 18 руб./т, при этом оцениваемый экологический ущерб составляет 400 млн рублей в год. Вместе с отходами обогатительных фабрик теряется до 20 % углерода от всей поступившей на обогащение горной массы.

Существуют несколько способов утилизации отходов обогащения, но для шламов при их высокой влажности (28 – 35 %), при столь же высокой зольности, наиболее приемлемым является приготовление на их основе водоугольного топлива в виде топливной водоугольной суспензии, что позволит получить до 300 млрд МДж тепловой энергии.

В ЛНР, как и в других, угледобывающих регионах настоящее время продолжают интенсивные исследования топливных водоугольных суспензий (ТВУС), в том числе в виде продукта повторного использования высокозольных угольных шламов – отходов углеобогащения. Кроме этого, ввиду высокой экологичности сжигания (по отношению к сжиганию угля) и дешевизны, ТВУС на равных конкурирует с классическими энергоносителями (уголь, мазут, газ).

ТВУС рассматривается в совокупности ее физических, структурных, реологических и гидродинамических свойств. В этом смысле она представляет собой практически консистентную среду, закономерности движения которой, в случае линейного течения, существенно проще в сравнении с уравнением Навье-Стокса и его модификациями, и могут быть получены на основании реологического закона Ньютона с усовершенствованной распространением гипотезы Шведова-Бингама на область перемешанной вязкости.

Особенностью ТВУС является низкая теплотворная способность (35-50% от традиционных энергетических топлив), в связи с чем,

целесообразным является использование в качестве водоугольного топлива угольных суспензий с концентрацией угля 60 – 75%.

Ни один технологический процесс, связанный с водоугольными суспензиями, не обходится без организации развитой трубопроводной системы, что, учитывая необходимость обеспечения высокой концентрации твердой фазы, обуславливает необходимость корректного определения реологических и гидравлических характеристик водоугольной среды в зависимости от свойств исходного сырья, используемых реагентов, температуры окружающей среды, водородного показателя водной составляющей и других факторов влияния. Кроме того, для стабильности свойств ТВУС и обеспечения минимального сопротивления движению необходимо осуществлять ее приготовление с регламентируемым гранулометрическим составом и транспортировать в энергетически выгодном режиме, обеспечивающим сохранение структурных свойств.

В связи с вышеизложенным, актуальными являются вопросы развития основ теории подготовки и транспортирования топливных водоугольных суспензий из угольного сырья и шламов.

Степень разработанности проблемы. Вопросами исследования перемещения высококонцентрированных водоугольных суспензий по трубопроводу занимались ведущие отечественные и зарубежные ученые, такие как: Н.Д. Андрийчук, М.П. Баранова, В.С. Белецкий, Б.Ф. Брагин, Ю.Ф. Власов, Г.Н. Делягин, С.И. Криль, А.А. Круть, В.И. Мурко, М.В. Пилавов, Ю.Г. Свитлый, Е.В. Семененко, Д.А. Сёмин, А.Е. Смолдырев, Н.Б. Урьев, А.П. Юфин, Н.Б. Чернецкая, О.М. Яхно, E. Carniani, D. Ercolani и др.

Основными научными школами в данном направлении выступают: «ИГИ», «ВНИИГидроуголь», «КузНИИУглеобогащение», «УкрНИИГидроуголь» и др., которыми отмечается влияние свойств исходного угля, времени транспортирования, типа модифицирующих присадок, конфигурации трубопровода, а также условий внешней среды на качественные характеристики водоугольной суспензии. Однако работы в данных направлениях представлены в виде разрозненных исследований, без достаточной обобщающей обработки и оценки. Это ведет к снижению точности определения реологических характеристик ТВУС и обуславливает необходимость дополнительных исследований в данном направлении.

Теоретической основой расчета движения ТВУС, как правило, выступает гидродинамическая модель течения вязкой жидкости или ее модификации, что делает определение динамических и кинематических характеристик возможным лишь в случае существенных ограничений и упрощений. Кроме того, предпринятые попытки решения уравнения Букингема путем его представления в бикубической форме

сопровождаются существенным сужением области применимости при полной невозможности учета изменения вязкости от локальных параметров потока.

В ранее выполненных исследованиях не учитывалось то, что при рекомендуемых режимах течения ТВУС происходит постепенное разрушение структуры суспензии от ядра потока к периферии, что приводит к аномальному (нелинейному) изменению величины касательного напряжения и обуславливает значительные отклонения между теоретическими и экспериментальными данными при определении расхода и потерь давления.

В настоящий момент отсутствует поточная система обогащения угольных шламов, обеспечивающая заданные гранулометрические характеристики получаемого продукта.

Указанное выше состояние исследуемой проблемы определяет актуальность выбранного направления исследований.

Объект исследования – процессы приготовления и транспортирования топливных водоугольных суспензий из угольного сырья и их шламов.

Предмет исследования – закономерности определения реологических, гидродинамических и энергетических параметров приготовления и транспортирования топливных водоугольных суспензий из угольного сырья и шламов.

Цель и задачи исследований. Целью диссертационной работы является развитие теории расчета параметров подготовки и транспортирования топливных водоугольных суспензий на основе угля и шламов.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе необходимо решить **следующие задачи:**

- исследовать технологии утилизации отходов углеобогащения и способы приготовления топливной водоугольной суспензии;
- исследовать влияние типа пластификатора, температуры и времени транспортирования на свойства топливных водоугольных суспензий;
- разработать теорию подготовки и транспортирования ТВУС, описывающую его реологические свойства и параметры течения, в том числе в фасонных частях, для повышения точности их расчета;
- определить закономерности изменения касательного напряжения от скорости сдвига путем проведения многофакторных экспериментальных реологических исследований;
- провести проверку адекватности предложенных расчетно-теоретических зависимостей путем проведения стендовых исследований течения ТВУС по трубопроводу;

- разработать поточную технологию обогащения обводненных угольных шламов;
- разработать методику расчета эксплуатационных показателей приготовления и транспортирования топливных водоугольных суспензий, а также рекомендации по проектированию и эксплуатации трубопроводных систем для них;
- определить технико-экономическую эффективность утилизации шламовых отходов путем приготовления и реализации ТВУС.

Научная новизна полученных результатов. Получили дальнейшее развитие научные основы теории подготовки и транспортирования топливных водоугольных суспензий из угольного сырья и шламов путем разработки математических моделей, описывающих реологические свойства и течение ТВУС, на основании проведенного анализа предметной области с учетом факторов влияния на ее свойства, заключающиеся в следующем.

1. Установлены зависимости: коэффициента влияния пластифицирующей добавки от ее типа и концентрации твердой фазы, температуры в диапазонах от 1 до 20°C и от 20 до 50°C в виде квадратичных функций, а также изменения исходного значения критерия бимодальности от времени транспортирования в виде экспоненциального эмпирического выражения.

2. Впервые установлено, что зависимость касательного напряжения ТВУС от скорости сдвига при ее величине до 9 с^{-1} описывается монотонно возрастающей квадратичной функцией и является функцией скорости сдвиговых деформаций наряду с концентрацией твердой фазы, зольностью угля, выходом летучих веществ и фракционным составом.

3. Предложено моделирование течения вязкопластической жидкости путем представления потока ТВУС в виде совокупного движения взаимодействующих тонкостенных концентричных цилиндров.

4. Разработана математическая модель течения топливной водоугольной суспензии, основанная на расчете в зоне разрушения структуры локальных структурной вязкости и начального напряжения сдвига для соответствующего значения скорости сдвиговых деформаций.

5. Разработан метод численного расчета параметров течения ТВУС, учитывающий изменение структурной вязкости и начального напряжения сдвига по радиусу, путем определения их значений методом касательной к функции напряжения сдвига для соответствующей скорости сдвиговых деформаций.

6. Впервые для течения ТВУС получены экспоненциальные зависимости потерь давления на поворотах трубопровода и в арматуре в функции расхода среды и диаметра трубопровода с учетом его начального напряжения сдвига и структурной вязкости.

Теоретическое и практическое значение полученных результатов заключается в том, что получены зависимости для определения степени влияния пластификатора, температуры окружающей среды, водородного показателя и времени транспортирования на реологические свойства ТВУС, что позволило повысить точность их расчета до 25%, разработана математическая модель течения топливной водоугольной суспензии как совокупности тонкостенных концентричных цилиндров, на основании которой получены зависимости для определения местной скорости потока, а также расхода водоугольной среды для случаев с наличием или отсутствием ядра, что позволило повысить точность определения расхода до 70%. Получены зависимости определения перепада давления от расхода топливной водоугольной суспензии для поворотов на 90 и 180°, а также перепада давления на запорной арматуре, которые позволяют повысить точность определения суммарных потерь давления в трубопроводной технологической системе до 10%.

Разработаны алгоритм и программное приложение для автоматизации расчетов и математического моделирования течения водоугольной суспензии, что позволило ускорить процесс проектирования трубопроводной системы.

Практическая значимость заключается в разработке общей методики расчета реологических характеристик, потерь давления, мощности насосного оборудования при транспортировании ТВУС, что позволило избавиться от недостатков классического подхода и повысить точность определения реологических характеристик до 2-х раз и потерь давления до 30%, а также повысить до 2-х раз количество тепловой энергии на единицу затрачиваемой мощности при транспортировании.

Разработана технология обогащения отходов флотации с использованием ударной волны электрического разряда для последующей подготовки топливной водоугольной суспензии. Определены параметры электрогидроудара в ТВУС, обеспечивающие заданный гранулометрический состав твердой фазы, при заданных геометрических размерах разрядной камеры и производительности системы потокового обогащения шламовых отходов.

Методология и методы исследования. Для решения поставленных задач использованы следующие методы исследований: комплексный метод, включающий анализ и обобщение результатов известных исследований, при математическом моделировании внутритрубного напорного течения водоугольной суспензии в различных режимах – методы математической физики, при реализации моделей – методы численного решения дифференциальных уравнений и компьютерного моделирования, методы численного решения нелинейных алгебраических уравнений. При исследовании реологических

характеристик топливной водоугольной суспензии - теория планирования эксперимента. Методы теории вероятностей и математической статистики, при проведении и обработке результатов экспериментальных исследований, а также вычислительной математики.

Основные научные положения, выносимые на защиту:

1. Учет изменения коэффициента влияния пластифицирующей добавки в функции ее типа и концентрации твердой фазы, характера изменения реологических свойств в диапазонах температур от 1 до 20°C и от 20 до 50°C, а также степени изменения исходного критерия бимодальности от времени транспортирования позволяет повысить точность определения вязкостных характеристик ТВУС до 25%.

2. Расчет величины касательного напряжения ТВУС по пятифакторным квадратичным уравнениям регрессии в функции скорости сдвиговых деформаций, концентрации и зольности угля, выхода летучих веществ и фракционного состава позволяет при скорости сдвига до 9 с^{-1} повысить точность определения реологических свойств до 2 раз.

3. Моделирование течения ТВУС в виде совокупного движения взаимодействующих тонкостенных концентричных цилиндров позволило получить дифференциальное уравнение для изменения осевой скорости по радиусу трубопровода, а также уравнение расхода и повысить точность определения расхода на величину до 70% по отношению к уравнению Букингема.

4. Расчет локальных структурной вязкости и начального напряжения сдвига для соответствующего значения скорости сдвиговых деформаций в зоне разрушения структуры ТВУС, позволяет повысить точность определения потерь давления до 30%.

5. Численный расчет параметров течения ТВУС, учитывающий изменение структурной вязкости и начального напряжения сдвига по радиусу, путем определения их значений методом касательной к функции напряжения сдвига для соответствующей скорости сдвиговых деформаций, позволяет рассчитать эпюру скорости и величину расхода для любого вида реологического уравнения.

6. Расчет потерь давления на поворотах и в арматуре в функции расхода ТВУС и диаметра трубопровода с учетом величины начального напряжения сдвига и структурной вязкости позволяет повысить точность определения суммарного сопротивления трубопроводной технологической системы до 10 %.

Соответствие паспорту специальности. Диссертация соответствует следующим пунктам паспорта специальности: п. 1 «Разработка научных и методологических основ проектирования и создания новых машин, агрегатов и процессов; механизации производства в соответствии с современными требованиями внутреннего и внешнего рынка,

технологии, качества, надежности, долговечности, промышленной и экологической безопасности»; п. 5 «Разработка научных и методологических основ повышения производительности машин, агрегатов и процессов и оценки их экономической эффективности и ресурса»; п. 6 «Исследование технологических процессов, динамики машин, агрегатов, узлов и их взаимодействия с окружающей средой».

Степень достоверности и апробация результатов диссертации.

Достоверность результатов исследований подтверждается корректным применением современного математического аппарата гидродинамики и теории течения вязкопластических сред, использованием апробированных методов исследований, проверкой на адекватность предложенных зависимостей по расчету основных параметров течения ТВУС, применением поверенных средств измерительной техники (вискозиметр $\delta = \pm 4\%$, пьезометр $\Delta = \pm 10$ Па) при проведении экспериментальных исследований, для реологических испытаний коэффициент корреляции $R = 0,96$, а для потерь давления ТВУС $R = 0,92$, при этом коэффициент вариации v равен 9,52% и 7,19% соответственно; адекватность полученных регрессионных зависимостей расчета потерь энергии оценивалась с помощью F -критерия, который составил не более 2,61.

Исследования, выполненные в диссертационной работе, являются частью бюджетных тем ВНУ им. В. Даля: ДН-27-06 «Обоснование и разработка теоретических основ создания энергоемкого и экологического седиментационно-стабильного водоугольного топлива» (2006 г., номер гос. регистрации 0206U002228), ДН-15-09 «Исследование закономерностей приготовления и транспортирования водоугольного топлива из сырья отечественного производителя» (2009 г, номер гос. регистрации 0109U000075) и ДН-65-12 «Повышение эффективности оборудования и технологий транспортировки энергоносителей и отходов теплоэнергетического комплекса» (2012 г, номер гос. регистрации 0112U000227), связанных со снижением энергетических затрат на транспортирование суспензий с высоким содержанием твердого компонента. Автор является одним из непосредственных исполнителей указанных работ и ответственным исполнителем последней темы.

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на: II, IV, V, VI Международных научно-технических конференциях «Актуальные вопросы механики текучих сред» (Луганск), Международной научно-технической конференции «Информационные и измерительные системы и технологии» (Новочеркасск), III Международной научно-практической конференции «Программная инженерия: методы и технологии разработки информационно-вычислительных систем (ПЛИВС-2020)» (Донецк),

Международной научно-практической конференции «Аграрная наука в обеспечении продовольственной безопасности и развитии сельских территорий» (Луганск), Всероссийской (национальной) научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные исследования. Актуальные проблемы и достижения» (Санкт-Петербург).

Результаты диссертационной работы внедрены на следующих машиностроительных предприятиях: ООО «Локомотив-Сервис Ростов», ООО «Луганский завод трубопроводной арматуры «Маршал», ООО «ГД «Краснолучэнергоресурс», а также в учебном процессе в ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет имени Владимира Даля» при подготовке бакалавров и магистров по направлению «Механика и математическое моделирование».

Личный вклад автора. В работах, опубликованных в соавторстве, автору принадлежат следующие результаты: [1] – обработка результатов исследований реологического поведения и потерь напора при транспортировании водоугольного топлива; [2, 3, 4, 5, 6] – обобщение и анализ предметной области; [7] – модернизация стенда для проведения экспериментальных исследований; [8, 11] – предложены подходы к математическому описанию течения суспензии по трубопроводу с учетом особенностей среды; [9, 10] – исследование величины диапазонов изменения факторов влияния и их оценка; [12, 19] – предложена модель описания течения водоугольной суспензии по каналу круглого сечения; [13, 14, 21] – проведены экспериментальные исследования, обработка и оценка результатов; [20] – разработана методика расчета основных показателей работы технологической системы на ТВУС; [22] – произведен расчет экономического эффекта от внедрения технологии водоугольного топлива; [23] – предложена новая схема обогащения шламовых отходов, произведена оценка приращения удельной поверхности от серии ударных волн.

Публикации. Основные положения и результаты исследований диссертационной работы опубликованы в 40 научных работах, из них: 1 монография; 6 патентов на полезную модель; 21 статья в научных изданиях, включенных в перечень ВАК ЛНР и входящих в РИНЦ; 1 статья в научных изданиях, включенных в перечень ВАК Минобрнауки РФ и входящих в РИНЦ; 2 статьи в международных изданиях; 9 публикаций на научных конференциях.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти разделов (23 подразделов), выводов к разделам, заключения, списка литературы из 352 источников на 40 страницах и 6 приложений на 49 страницах. Полный объем работы составляет 371 страницу, в том числе 282 страницы основного текста, 50 полных страниц с рисунками и таблицами.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, выполнен всесторонний обзор и анализ проведенных ранее исследований, сформулированы основные направления, цель и задачи исследований. Показаны основные положения, выносимые на защиту, научная новизна, теоретическое и практическое значение полученных результатов. Представлены сведения о личном вкладе соискателя и апробации результатов диссертационной работы.

Раздел 1 «Анализ состояния и степени изученности проблемы эксплуатационных свойств водоугольного топлива».

В первом разделе представлена история развития технологий водоугольного топлива, а также приведена классификация водоугольных смесей и суспензий по содержанию твердой фазы, зольности исходного угля и крупности частиц. Предложен термин «топливные водоугольные суспензии» (ТВУС) для высококонцентрированных водоугольных суспензий топливного предназначения с концентрацией твердого компонента 55 – 80%, имеющих долю углерода свыше 0,7.

Основными технологиями реализации ТВУС являются сжигание (факельное, в кипящем слое с теплотворной способностью до 20 кДж/кг) в топках котлов энергетических установок или газификация для получения синтез-газа для последующего сжигания. В случае газификации, предпочтительными выступают следующие ее типы: паровая или кислородная, которые позволяют получить синтез-газ с теплотворной способностью до 20 МДж/м³. При этом, основным средством подачи топливной суспензии в зону горения (реакции) является распыление с помощью горелочных устройств различного типа.

Рассмотрены технологические схемы приготовления концентрированных водоугольных суспензий (водоугольного топлива) из различного сырья (рядовой уголь, отходы флотации, илы и т.д.). Наиболее распространенной выступает технология «Реокарб» (Италия), которая позволяет получить качественное водоугольное топливо, однако, для переработки угольных шламов более предпочтительным является использование в потоке кавитационных (им подобных) методов приготовления ТВУС.

Основным рекомендуемым режимом течения выступает ламинарное течение со скоростями от 0,05 до 0,7 м/с, в зависимости от диаметра трубопровода.

Установлено, что общее количество отходов углеобогащения на Донбассе превышает 63,3 млн т. Шламоотстойники и илонакопители

занимают площадь более 1975 га, выводят из сферы полезного использования, занимаемые ими земельные угодья, а также представляют собой объекты повышенной экологической угрозы, требуют постоянного наблюдения и контроля, а, следовательно, соответствующих расходов.

В ходе анализа предметной области установлено, что ни одна технологическая система, связанная с приготовлением, перемещением или использованием ТВУС, не обходится без трубопроводного транспорта. При этом, в работе подобных комплексов возникает значительное число проблем, связанных в первую очередь с течением высококонцентрированной дисперсной среды по длинному каналу круглого сечения, эксплуатацией насосного оборудования, запорной арматуры, характера течения в фасонных элементах и т.д. Исходя из выше изложенного, сформулированы основная цель и задачи диссертационных исследований.

Раздел 2 «Теоретические и экспериментальные исследования реологических свойств ТВУС».

Во втором разделе исследованы основные характеристики и свойства топливных водоугольных суспензий, которые включают: реологические показатели (напряжение сдвига, эффективную и структурную вязкость), гранулометрический состав (включая критерий бимодальности), концентрацию твердого компонента, тип используемого пластификатора, зольность исходного угля и выход летучих веществ.

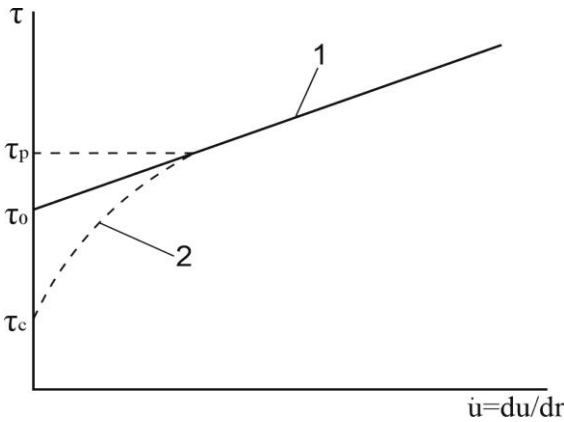


Рисунок 1 – Характер изменения касательного напряжения ТВУС в функции $\dot{u}(\dot{\gamma})$

Поскольку для внутритрубного течения ТВУС характерным является наличие центрального ядра, в поперечном сечении которого напряжение сдвига распределено линейно от 0 до значения τ_0 , и далее соответствует реологическому закону Ньютона (рис. 1, кривая 1) и распространяющему его на случай наличия ядра уравнению Шведова-

Бингама. В нем напряжение сдвига τ зависит от радиального градиента осевой скорости $\dot{u}(r)$ (c^{-1}) и определяется двумя реологическими

параметрами – пластической (структурной) вязкостью μ_{cm} (Па·с) и начальным напряжением сдвига τ_0 (Па):

$$\begin{aligned}\tau &= \mu_{cm} (\dot{\gamma}(r)) + \tau_0; \\ \dot{\gamma} &= 0 \text{ при } \tau \leq \tau_0.\end{aligned}\quad (1)$$

Модель (1) может быть принята для вязкопластических сред в качестве реологического закона, если ее дополнить соотношениями, обобщающими ее на область разрушения структуры, т.е. переменной структурной вязкости:

$$\tau_i = \mu_{cmi} \dot{\gamma}(r) + \tau_{0i} \text{ при } \mu_{cm} = var. \quad (2)$$

В области 2 (см. рис. 1, кривая 2) данное соотношение согласно предлагаемой гипотезы применяется последовательно для каждой из ее точек. При этом τ_{0i} следует рассматривать как начальное напряжение сдвига для текущего состояния каркаса структуры среды с текущей структурной вязкостью μ_{cmi} , которая уменьшается по мере увеличения скорости сдвига до постоянного значения (пластической вязкости η , что соответствует значению τ при полном разрушении структуры τ_p).

Соотношения (1) и (2) полностью охватывают реологию ТВУС во всех режимах течения и создают теоретическую основу для применения вычислительных методов при определении параметров потока среды.

Ввиду того, что для высококонцентрированных ТВУС напряжение сдвига является функцией, по крайней мере, 5-ти существенных факторов: концентрации твердого компонента C ; градиента скорости сдвига $\dot{\gamma}$; зольности исходного угля A^d ; выхода летучих веществ V^f ; критерия бимодальности Γ , корректным является определение реологических характеристик τ и вязкости η (μ_{cm}) водоугольного топлива из углей Донбасского региона посредством реализации матрицы планируемых экспериментов.

Наряду с уже приведенными факторами, на реологическое поведение ТВУС значительное влияние оказывают тип пластификатора, температура окружающей среды t , водородный показатель жидкой фазы pH , а также время транспортирования T , учет степени воздействия которых следует производить на основании соответствующих коэффициентов.

Зависимости касательных напряжений от градиента скорости сдвига для различных пластификаторов имеют сходный криволинейный характер, что позволяет осуществить пересчет их значений с помощью соответствующего коэффициента:

$$K_{\tau} = \frac{\tau_i}{\tau_{\delta/\delta}} = \frac{\mu_i}{\mu_{\delta/\delta}}, \quad (3)$$

где $\tau_{\delta/\delta}$, $\mu_{\delta/\delta}$ – значения напряжения сдвига и эффективной вязкости без добавки; τ_i , $\mu_{\delta/\delta}$ – значения напряжения сдвига и эффективной вязкости для соответствующей добавки.

Значения вязкостных показателей снижаются от двух до пяти раз при использовании пластификаторов (см. рис. 2), что обуславливает целесообразность применения диспергирующих добавок. При этом минимальные величины реологических характеристик достигаются при использовании Дофена.

Эмпирическое уравнение для расчета K_{τ} имеет вид

$$K_{\tau} = -0,918 + \frac{1,42}{X^{0,5}} + \frac{0,207}{C^2}, \quad (4)$$

где X – условный номер пластификатора.

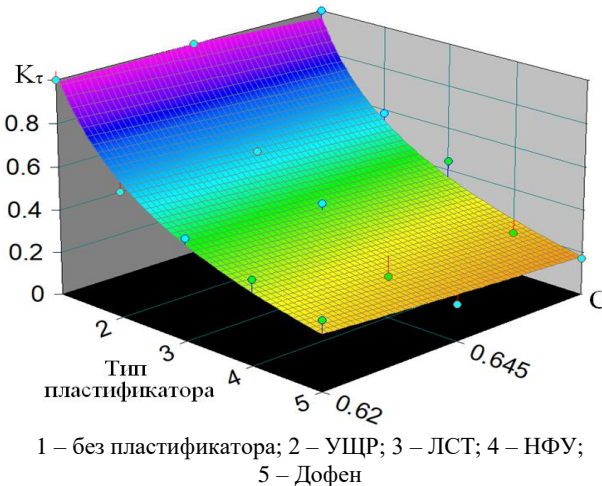


Рисунок 2 – Значение коэффициента K_{τ} при различных типах пластификаторов и концентрациях C

Установлено, что величина K_{τ} не зависит от скорости сдвига и остается постоянной на всем диапазоне ее изменения. С увеличением концентрации твердой фазы предпочтительным является использование пластификаторов (Дофен, НФУ), в большей степени снижающих величину τ и μ_{δ} .

Для определения зависимости коэффициента пропорциональности K_{μ} от температуры проведен ряд опытов с водоугольной суспензией из угля марки Г при скорости сдвига 9 с^{-1} . В качестве пластификатора использовался лигносульфонат (ЛСТ). На основании экспериментальных значений τ и μ_{δ} , рассчитаны величины коэффициента K_{μ} , который опреде-

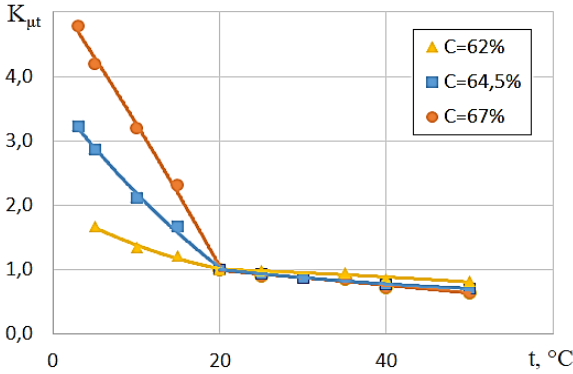


Рисунок 3 – Влияние температуры t на величину коэффициента K_{μ}

ляет отношение τ_i и μ_{zi} при данной температуре к их значениям при 20°C и построены соответствующие зависимости (рис. 3).

Анализ кривых приведенных на рисунке 3 позволил установить, что зависимость коэффициента K_{μ} от температуры носит сложный характер.

В диапазоне температур от 3 до 20°C наблюдается резкое падение вязкостных характеристик ТВУС (до 5 раз в зависимости от концентрации твердой фазы). При температурах от 20 до 50°C степень снижения реологических характеристик для всех концентраций замедляется (максимальное падение не превышает 35%).

Эмпирические зависимости для расчета коэффициента K_{μ} на участках до 20°C и более имеют вид:

от 3 до 20°C

$$K_{\mu} = 8,30 + 2,00t - 0,84C + 0,0007t^2 + 0,012C^2 - 0,033t \cdot C, \quad (5)$$

от 20 до 50°C

$$K_{\mu} = 6,04 + 0,054t - 0,17C + 0,00012t^2 + 0,0014C^2 - 0,0011t \cdot C, \quad (6)$$

где t – температура ТВУС, $^{\circ}\text{C}$; C – концентрация твердой фазы, %.

Исследования по определению зависимости реологических характеристик от значения водородного показателя рН проведены для тех же концентраций твердого материала при температуре 20°C . Диапазон изменения кислотности водной фазы рН составил от 4 до 12 , для которого рассчитан коэффициент $K_{\mu\text{pH}}$ (рис. 4), который определяется как

$$K_{\mu\text{pH}} = \frac{\tau_{\text{ipH}}}{\tau_{0\text{pH}}} = \frac{\mu_{\text{ipH}}}{\mu_{0\text{pH}}}, \quad (7)$$

где τ_{ipH} , μ_{ipH} – значения касательного напряжения и эффективной вязкости при текущем рН; $\tau_{0\text{pH}}$, $\mu_{0\text{pH}}$ – значения касательного напряжения и эффективной вязкости при рН = 7 .

Установлено, что с ростом кислотности среды наблюдается монотонное снижение величины $K_{\mu pH}$. Зависимость носит близкий к линейному характер и незначительным искривлением при значениях pH выше 8. При этом, наблюдается значительное снижение реологических характеристик с ростом водородного показателя от 1,25 при pH = 4 до 0,5 при pH = 12 (рис. 4).

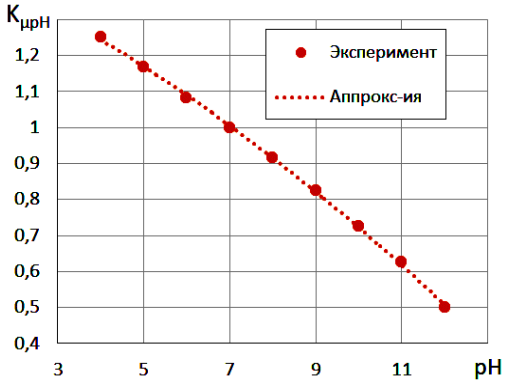


Рисунок 4 – Влияние величины кислотности среды pH на значение коэффициента $K_{\mu pH}$

Аппроксимация результатов произведена нелинейной функцией ($R^2 = 0,99$) и имеет вид

$$K_{\mu pH} = \left(2,17 - 0,31(\ln pH)^2\right)^{0,5}. \quad (8)$$

Установлено, что одним из путей получения топливных суспензий с заданными вязкостными характеристиками является изменение водородного показателя жидкой фазы.

Произведена оценка величин среднего диаметра твердых частиц d_{cp} в суспензии и критерия бимодальности Γ ТВУС, которые для обеспечения минимального сопротивления при течении по трубопроводу должны находиться в пределах рациональных значений: $d_{cp} = 30 - 40$ мкм, $\Gamma = 1,5 - 2,1$. Зависимость критерия бимодальности Γ от времени транспортирования представлена на рис.5.

Анализ приведенной на рисунке 4 функции позволил установить, что изменение критерия бимодальности с ростом времени перемещения происходит по экспоненциальному закону и может быть аппроксимировано следующей зависимостью ($R^2=0,99$)

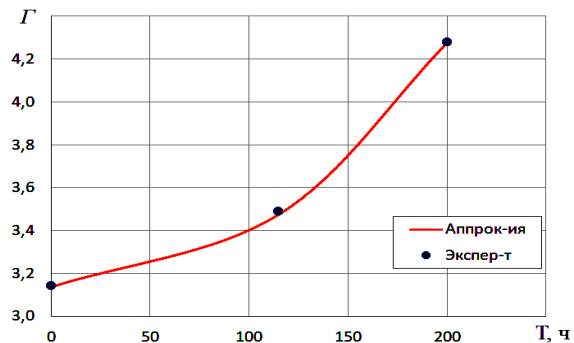


Рисунок 5 – Изменение критерия бимодальности Γ от времени транспортирования T

$$\Gamma = \Gamma_0 \cdot \exp(0,00136 + 7,66 \cdot 10^{-6} T^2), \quad (9)$$

где Γ_0 – значение критерия Γ в начальный момент времени; T – время движения суспензии в технологической системе, ч.

Установлено, что тип пластификатора, температура окружающей среды, величина водородного показателя, а также время транспортирования в значительной степени оказывают влияние на реологические свойства, что следует учитывать при расчете параметров процессов приготовления, перемещения и использования ТВУС.

Раздел 3 «Математическое моделирование течения ТВУС».

В разделе 3, с целью анализа условий течения концентрированной водоугольной суспензии (топлива) по трубопроводу, в частности определения величины скорости сдвига, а также построения эпюр скоростей в трубопроводе при течении с различными заданными начальными условиями, произведено моделирование движения ТВУС по классическим реологическим моделям с использованием современных информационных подходов.

Во время движения бингамовской среды наблюдается зона упругих деформаций (ядро потока), которая с ростом скорости течения уменьшается, при этом происходит частичное разрушение структуры концентрированной дисперсной системы за счет роста градиента скорости сдвига.

Для ТВУС критическую величину скорости сдвиговых деформаций принимают равной 9 с^{-1} , что обуславливает необходимость определения доли сечения трубопровода (кольца), в пределах которой реализуется указанные значения $\dot{\gamma}$.

Установлено, что при малых скоростях транспортирования $u_{cp} \leq 0,25 \text{ м/с}$, доля площади трубопровода с реализуемыми скоростями сдвига менее 9 с^{-1} стремится к 0,95, а с ростом значения u_{cp} до рекомендуемой для данного диаметра трубопровода величины наблюдается снижение ее доли до 0,26. Это обуславливает необходимость учета специфики движения данной зоны при расчете потерь давления для произвольных сочетаний размеров трубопроводов и режимов течения ТВУС.

Модель течения водоугольной среды для зоны разрушения каркаса структуры с переменной структурной вязкостью и с затратой части энергии сил внешнего давления на перманентную тиксотропность ТВУС разработана в подразделе 3.2.

В предлагаемом решении последний эффект учитывается введением коэффициента k , в виде выражения $k_0 - k$ (k_0 численно равно единице) для отражения относительной доли потерь мощности сил давления на

преодоление дискретных во времени молекулярных сил разрушения структуры, действующих в течении неопределенного промежутка времени на неопределенном расстоянии и поэтому является размерным ($\text{Вт/Н} = \text{м/с}$). Эта поправка качественно отличается от сил классического напряжения сдвига, которая характерна для течения ньютоновских жидкостей. Из соображения общности понятий оставим для сред ТВУС общепринятый термин «напряжения сдвига», хотя в данном случае он применен с учетом указанной поправки k . Кроме этого, ввиду переменного характера изменения вязкости по радиусу потока, целесообразно моделировать реальную физическую картину силового взаимодействия конечно-малого произвольно расположенного слоя жидкости с соседними слоями и силами внешнего давления следующим образом (рис. 6).

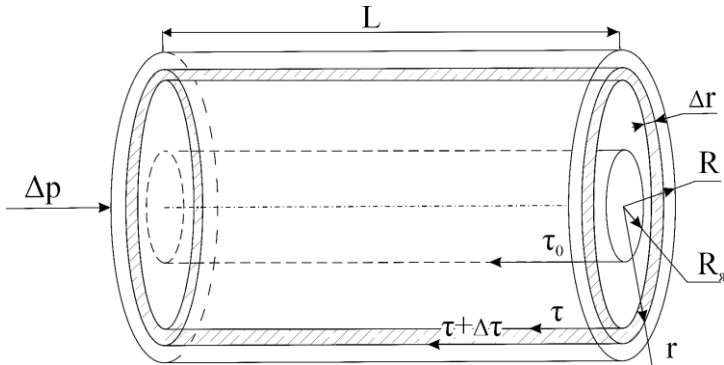


Рисунок 6 – Модель силового взаимодействия произвольного слоя жидкости с соседними слоями и с силами внешнего давления

На внутреннюю поверхность переднего кольца элементарного слоя i в направлении движения со стороны центральных слоев, движущихся с большей линейной скоростью, действует напряжение сдвига τ . На наружную поверхность i -го слоя для преодоления сил напряжения сдвига $\tau + \Delta\tau$, обратных по направлению, приложенных со стороны внешних более медленных слоев, действует сила, пропорциональная разности данных напряжений с учетом радиусов поверхностей приложения $2\pi \cdot \Delta p \cdot r \cdot dr$, обусловленная внешним давлением:

$$(k_0 - k) \cdot 2\pi \cdot \Delta p \cdot r dr = 2\pi r L \cdot (\tau + \Delta\tau)(r + \Delta r) - 2\pi r \cdot \tau \cdot r \cdot L, \quad (10)$$

где L – расстояние, на котором реализуется перепад давления Δp , м.

После перемножения соответствующих членов в правой части имеем:

$$(k_0 - k) \cdot 2\pi \cdot \Delta p \cdot r dr = 2\pi r L \cdot (\tau \cdot r + \Delta\tau \cdot r + \tau \cdot \Delta r + \Delta\tau \cdot \Delta r - \tau \cdot r). \quad (11)$$

После оценки порядка малости слагаемых в правой части уравнения и пренебрежения членами высшего порядка, а также замены дифференциала τ его выражением, полученным из закона Ньютона, общая сила противодействия сил трения всех j слоев среды, в сумме представляющих радиус r_j , силам давления, составит, с учетом возможности представления r_j в виде dr_j ($j = 1, \dots, i$)

$$\sum F_{mp} = 2\pi\mu_{cm}L \sum_1^i r_j \frac{d^2u}{dr}. \quad (12)$$

Проведя дальнейшее упрощение представленного выше выражения для r_i преобразуем исходное уравнение (10) к виду

$$(k_0 - k) \frac{\Delta p}{\mu_{cm}L} dr dr = du \cdot du. \quad (13)$$

После двукратного интегрирования данного выражения по разделенным переменным, радиусу и скорости, получаем выражение для местной скорости течения жидкости в осесимметричном потоке радиуса R в следующем виде:

$$u = \sqrt{\left((k_0 - k) \frac{\Delta p}{\mu_{cm}L} \right) \cdot (R^2 - r^2)}. \quad (14)$$

Далее, определяем расход суспензии:

$$Q = \frac{2\pi}{3} R^3 \sqrt{\left((k_0 - k) \frac{\Delta p}{\mu_{cm}L} \right)}. \quad (15)$$

При наличии в потоке ядра течения, выражение для скорости преобразуем к виду

$$u = \sqrt{\left((k_0 - k) \left(\frac{\Delta p}{\mu_{cm}L} - \frac{2\tau_0}{\mu_{cm}(R-r)} \right) \right) \cdot (R^2 - r^2)}. \quad (16)$$

Скорость ядра находим из выражения:

$$u_{я} = \sqrt{(k_0 - k) \left(\frac{\Delta p}{\mu_{cm} L} - \frac{2\tau_0}{\mu_{cm} (R - R_{я})} \right) (R^2 - R_{я}^2)}. \quad (17)$$

Радиус ядра при этом определяется выражением $R_{я} = 2\tau_0 L / \Delta p$.

Соответствующий наличию ядра течения расход ТВУС представим аналитической зависимостью

$$Q = \pi \left(\frac{2\tau_0 L}{\Delta p} \right)^2 \sqrt{(k_0 - k) \left(\frac{\Delta p}{\mu_{cm} L} - \frac{2\tau_0}{\mu_{cm} (R - R_{я})} \right) (R^2 - R_{я}^2)} + \frac{2\pi}{3} \sqrt{(k_0 - k) \left(\frac{\Delta p}{L\mu_{cm}} - \frac{2\tau_0}{\mu_{cm} (R - R_{я})} \right) [R^2 - R_{я}^2]^3}. \quad (18)$$

Уравнение (18) является альтернативой известному «классическому» уравнению Букингема и позволяет повысить точность определения расхода ТВУС до 70%.

Недостатком приведенных выше зависимостей для определения локальной скорости и расхода ТВУС является принятое по умолчанию постоянство структурной вязкости μ_{cm} в любой точке потока, что, для области разрушения структуры потока, невозможно. Поэтому, в ходе дальнейших исследований задача корректного определения указанных зависимостей решена численным методом с использованием полученных эмпирических уравнений для реологических параметров ТВУС.

Таким образом, наряду с развитием математической модели высококонцентрированных дисперсных сред, для обеспечения точности расчета необходим учет динамически изменяющихся от скорости сдвига касательных напряжений $\tau = \Phi(\dot{\gamma})$ и эффективной вязкости $\mu_s = \Phi(\dot{\gamma})$.

Так как величина вязкостных сил зависит от скорости сдвиговых деформаций для их определения в соответствующем цилиндрическом слое толщиной dr необходимо применение численных методов с использованием ЭВМ (рис.7).

Реализация данного машинного алгоритма, т.е. определение расхода суспензий с динамически изменяющимися реологическими показателями проводилась следующим образом.

Для выполнения данного расчета, тело потока радиусом R предварительно условно разбивают на ядро радиусом $R_я$ и область разрушения структуры (переменной структурной вязкости), к которой, как правило, примыкает пристенная зона с полностью разрушенной структурой (со стабильной вязкостью). Однако в связи с принятыми ранее (разд. 2) положениями относительно реологии потока (связь динамического напряжения сдвига для каждой точки зависимости τ от скорости сдвига $\dot{\gamma}$) соответствует уравнению Шведова-Бингама $\tau = \tau_0 + \mu_{ст} \dot{\gamma}$ расчет проводится однообразно, по аналогичным схемам для неизокинетических зон течения.

Соответствующие значения τ для дискретных точек всей области «граница ядра-стенка трубы» предварительно определены в виде зависимости $\tau = \Phi(\tau)$, найденной ранее по результатам реализации матрицы пятифакторных планируемых экспериментов.

Пересчет вязкостных и расходных характеристик потока от одной расчетной точки к другой осуществляют по следующей схеме: 0-вая расчетная точка располагается на границе ядра, при этом $\tau = \tau_0$. Радиус ядра равен

$$r_я = \frac{2L\tau_0}{\Delta p}. \quad (19)$$

Начальное напряжение сдвига на границе ядра $\tau_{0_я}$:

$$\tau_0 = \tau(\dot{\gamma} = 0). \quad (20)$$

Далее осуществляется расчет структурной вязкости суспензии на границе ядра $\mu_{ст_я}$ (в данном случае при $\dot{\gamma}_я = 0 \text{ c}^{-1}$).

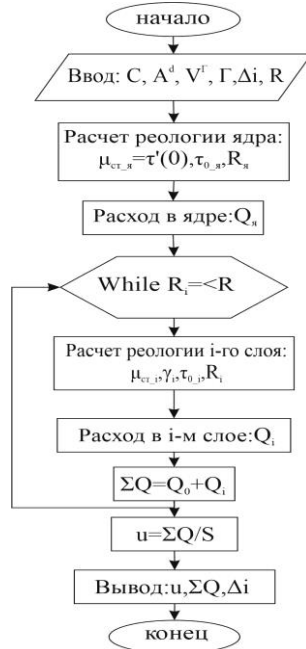


Рисунок 7 – Блок-схема расчета параметров течения

$$\mu_{cm_я} = \frac{\partial \tau}{\partial \dot{\gamma}(0)} = \frac{d\Phi(\tau)}{d\dot{\gamma}_я}. \quad (20)$$

Для 1-й точки от ядра к стенке трубы, отстоящей от 0-ой точки на расстоянии Δr – конечно малого шага по радиусу имеем:

$$r_1 = R_я + \Delta r. \quad (21)$$

Для упрощения дальнейшего изложения используем известную зависимость скорости от радиуса, соответствующую одномерному осесимметричному течению. Поскольку в данном случае $(d\dot{\gamma}/dr)_1 = \Delta p/2L \mu_{cm1} \approx \Delta p/2L \mu_{cm_я}$ соответствующая

$$\dot{\gamma}_1^1 = \frac{1}{\mu_1^1} \frac{\Delta p}{2L} dr + \dot{\gamma}_я = \frac{1}{\mu_1^1} \frac{\Delta p}{2L} dr. \quad (22)$$

Для расчета $\mu_{ст1}$ определяется производная функции динамического напряжения сдвига по скорости сдвига в точке $\dot{\gamma}_1^1$

$$\mu_{cm1} = d\Phi(\tau) / d\dot{\gamma}_1^1. \quad (23)$$

Для уточнения определяется (в данном случае верхний индекс – номер итерации)

$$\dot{\gamma}_1^2 = (1/\mu_1) \cdot (\Delta p / 2L(R_я + \Delta r) - \tau_0). \quad (24)$$

Окончательно имеем $\dot{\gamma}_1 = (\dot{\gamma}_1^1 + \dot{\gamma}_1^2) / 2$.

Для вычисления τ_{01} для 1-й расчетной точки на пересечении прямой $a_1 \dot{\gamma} + b_1$ в координатах $(\dot{\gamma}, \Phi(\tau))$ с осью $\Phi(\tau)$; при этом $a_1 = d\Phi(\tau) / d\dot{\gamma}_1$, α_1 – угол, образуемый данной прямой с осью $\dot{\gamma}$

$$\alpha_1 = \arctg(d\Phi(\tau) / d\dot{\gamma}_1), \quad (25)$$

тогда

$$b_1 = \Phi(\tau)_1 ((\Phi(\tau)_1 \operatorname{ctg} \alpha_1) - \dot{\gamma}_1) / \Phi(\tau)_1 \operatorname{ctg} \alpha_1 = \tau_{01}. \quad (26)$$

Локальную расходную скорость u_1 в пределах первого от ядра кольца находим по соотношению

$$u_1 = \frac{1}{\mu_{cm1}} \left[\frac{\Delta p}{4L} \left(R^2 - \left(\frac{R_y + r_1}{2} \right)^2 \right) - \tau_{01} \left(R - \left(\frac{R_y + r_1}{2} \right) \right) \right] \quad (27)$$

либо зависимости (16).

Элементарный расход, проходящий через 1-е кольцо,

$$\Delta Q_1 = \pi u_1 (r_1^2 - R_y^2). \quad (28)$$

Для 2-й точки с радиальной координатой $r_2 = r_y + 2\Delta r$ и соответственно 2-го кольца расчет производится идентично изложенному выше. При этом предыдущие значения (1-ые) принимают в качестве начальных (0-ых).

Величина касательного напряжения и структурной вязкости для каждой точки i в ходе расчета пересчитываются, по аналогии с представленным выше подходом, текущей скорости сдвига $\dot{\gamma}_i$. Для каждого последующего кольца совместно с определением текущих реологических параметров определяют также локальную скорость u_i и элементарный расход ΔQ_i .

Расчет проводят до тех пор, пока $r_i < R$. Суммарный расход через расчетный трубопровод составит при заданном перепаде давлений

$$Q_\Sigma = \sum \Delta Q_i. \quad (29)$$

По предложенной выше расчетной схеме произведены вычисления эпюр скоростей течения ТВУС по известной зависимости для вязкопластической жидкости и уравнению (18) для постоянных и изменяющихся реологических показателей (рис. 8).

Расчеты проводились для трубопровода диаметром $D = 80$ мм, при концентрации $C = 62\%$, зольности угля $A^d = 15\%$, выходе летучих $V^f = 25\%$, величине критерия бимодальности $\Gamma = 2$, при этом средняя скорость течения составила $u = 0,125$ м/с для всех случаев.

Анализ эпюр скорости, приведенных на рисунке 8, позволил установить, что учет динамического изменения реологических показателей ТВУС от скорости сдвига приводит к уменьшению размера ядра потока до 4-х раз (см. эпюры авторского уравнения (д/р) и зависимости Букингема (д/р)). Кроме того изменяется форма эпюры скорости, которая от квадратичного закона для классического уравнения Букингема переходит к сложной форме, а для авторского уравнения (18) характерен кубический закон изменения скорости от радиуса

трубопровода. Такое поведение обусловлено в первую очередь использованием иной модели течения, а также изменением характера поведения потока в пределах зоны разрушения структуры.

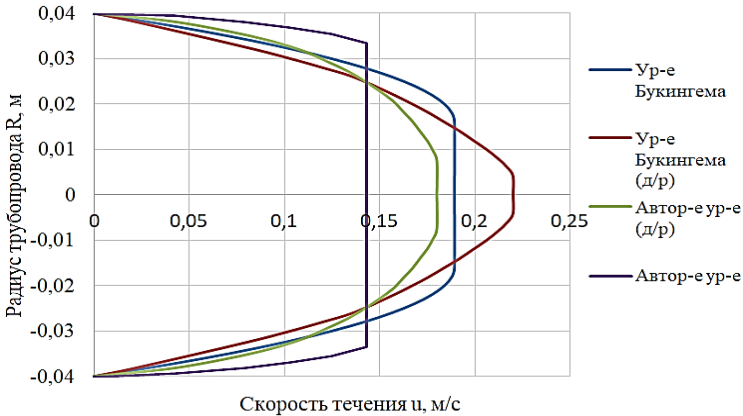


Рисунок 8 – Эпюры скорости течения ТВУС в канале круглого сечения

Для определения потерь давления и построения эпюр течения в отводах на 90° и 180° произведено численное моделирование движения ТВУС методом конечных объемов в приложении COMSOLmultiphysics (полнофункциональная пробная версия) для D от 0,05 до 0,25 м при $\tau_0 = 3,04 - 16,5$ Па, $\mu_{cm} = 0,54 - 2,2$ Па·с, $R_{изг90} = 0,5R - 3R$, $R_{изг180} = 1,5R - 4,5R$.

Установлена линейная зависимость потерь давления от расхода топливной водоугольной суспензии, как для отвода на 90° (рис.9а), так и на 180° (рис.9б).

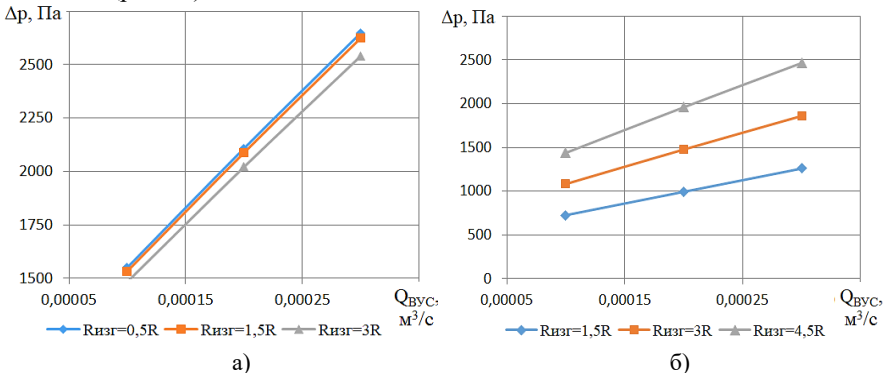


Рисунок 9 – Потери давления на поворотах 90° (а) и 180° (б) при различных расходах ТВУС для угля марки Г ($D = 0,05$ м; $\tau_0 = 16,5$ Па, $\mu_{cm} = 2,2$ Па·с)

Влиянием радиуса изгиба трубопровода для поворота на 90° на потери давления в нем можно пренебречь, так как при увеличении радиуса кривизны $R_{изг}$ в 6 раз (от $0,5R$ до $3R$) Δp снижается менее чем на 10% (см. рис. 9а).

Аппроксимирующая зависимость для расчета удельных потерь давления в повороте на 90° принимает вид

$$\Delta p_{90} = \rho_{BVC} \cdot g \cdot \exp(a + b \cdot \ln D + c \cdot \ln Q_{BVC}), \quad (30)$$

где ρ_{BVC} - плотность ТВУС, кг/м^3 ; g - ускорение свободного падения, м/с^2 ; a, b, c - коэффициенты; Q_{BVC} - расход суспензии, $\text{м}^3/\text{с}$.

Для поворота на 180° имеем

$$\Delta p_{180} = k_R \cdot \rho_{BVC} \cdot g \cdot \exp(a + b \cdot \ln D + c \cdot \ln Q_{BVC}), \quad (31)$$

где k_R - коэффициент, зависящий от радиуса изгиба трубопровода.

Значения коэффициентов a, b, c зависят от величины начального напряжения сдвига τ_0 и структурной вязкости μ_{cm} .

$$k_R = (0,86 + 0,43 \ln D - 0,43 \ln R_{изг})^{-1}. \quad (32)$$

Следует отметить, что коэффициент k_R не зависит от начального напряжения сдвига τ_0 и структурной вязкости μ_{cm} , и определяется только геометрическими характеристиками трубопровода, его диаметром D и радиусом изгиба отвода $R_{изг}$, что обусловлено, постоянством кинетической структуры течения ТВУС в присущем ему ламинарном режиме.

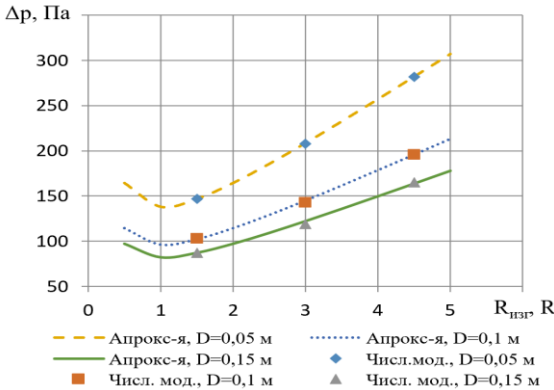


Рисунок 10 – Зависимость потерь давления от радиуса кривизны поворота на 180°

Для определения радиуса изгиба поворота на 180° , обеспечивающего минимизацию потерь давления, произведено построение и анализ зависимости Δp от кривизны фасонной части $R_{изг}$ для угля марки А с концентрацией твердого компонента в ТВУС 62% и плотностью среды 1215 кг/м^3 (рис.10).

Анализ кривых, приведенных на рисунке 10, позволил установить, что связь кривизны $R_{изг}$ [м] фасонной части и потерь давления Δp носит нелинейный характер и с точностью $R^2=0,991$ аппроксимируется выражением

$$\Delta p = \left(a + b (\ln(R_{изг})) \right)^2, \quad (33)$$

где a и b – коэффициенты аппроксимации, $\text{Па}^{1/2}$.

У функции наблюдается локальный минимум при значении радиуса кривизны $R_{изг} = R$, однако, исходя из особенностей производства колен на 180° , минимальным значением следует считать $R_{изг} = 3R$.

Расчетные эпюры скоростей в фасонных элементах для $D = 0,05\text{м}$ при $Q_{ТВУС} = 0,0003 \text{ м}^3/\text{с}$ и значении радиуса изгиба $3R$ приведены на рис.11.

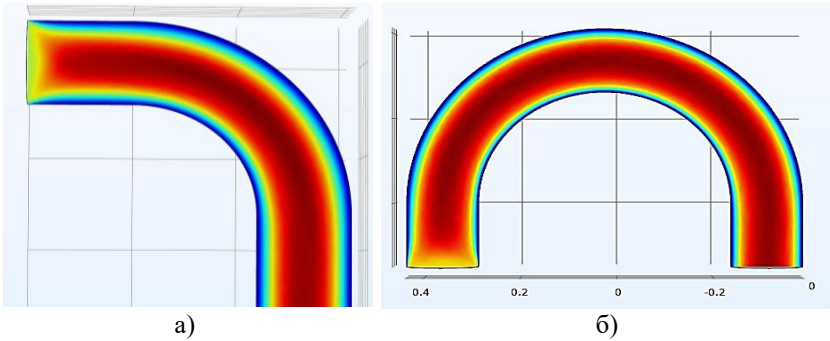


Рисунок 11 – Характер распределения скорости течения ТВУС в поворотах на 90° (а) и 180° (б) для угля марки Г

Отчетливо виден характер течения данного варианта водоугольной суспензии: начальный участок – зона формирования стационарного характера течения с образованием ядра потока – выраженной центральной областью практически постоянной линейной скорости.

В результате анализа результатов экспериментальных исследований гидравлического сопротивления шибберных задвижек, при течении дисперсных сред, получена эмпирическая зависимость расчета потерь давления от величины расхода ТВУС с учетом диаметра условного прохода задвижки ($R^2 = 0,98$):

$$\Delta p = \exp \left(2,35 - \frac{0,036}{\sqrt{Q_{ВУС}}} + \frac{0,90}{\sqrt{D_y}} \right), \quad (34)$$

где D_y - диаметр условного прохода задвижки, м.

Для получения результатов расчета в паскалях, необходимо правую часть выражения (34) умножить на размерную единицу (1 Па).

Следует отметить, что зависимость сопротивления трубопроводной арматуры от расхода жидкости является линейной, с коэффициентом пропорциональности, зависящим только от D_p . При рекомендованных скоростях транспортирования ТВУС потери давления на открытой задвижке на порядок меньше, по сравнению с сопротивлением фасонных элементов трубопровода. Вследствие этого, при незначительном их количестве (1–5 ед.), в трубопроводной системе потерями давления на арматуре можно пренебречь.

Раздел 4 «Экспериментальные исследования свойств и течения ТВУС».

Исследования по изучению реологических свойств ТВУС проведены на основе углей марок Г и ОС, а также антрациты (А), при массовом содержании твердого компонента C от 62 до 67%, с зольностью A^d от 15 до 35%, величина критерия бимодальности Γ составила от 1 до 3. Результаты опытов для угля марки Г с выходом летучих веществ $V^G = 45\%$ и концентрацией твердой фазы $C = 62\%$ представлены на рисунке 12, кривые 1, 4, 7; 2, 5, 8; 3, 6, 9 соответствуют $\Gamma = 1; 2; 3$, а 1-3; 4-6; 7-9 - $A^d = 13,6; 25,2; 35\%$.

Из анализа приведенных зависимостей (рис. 12) подтверждена существенная нелинейность кривой напряжения сдвига в области значений скорости сдвига от 0 до 9 c^{-1} .

Следует отметить, что проведенные эксперименты во многом подтверждают и дополняют теоретические аспекты поведения ТВУС, а также коррелируют с экспериментальными данными других авторов.

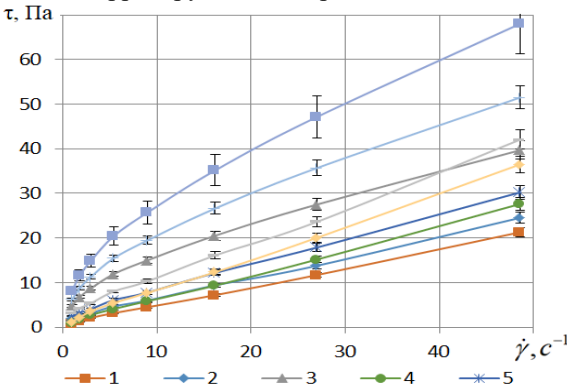


Рисунок 12 - Зависимость напряжения от скорости сдвига для угля марки Г

Для планирования эксперимента использовано приложение Statistica (ознакомительная версия) и инструменты DOE для матриц планирования с тремя уровнями варьирования факторов. Ввиду сложности и разнохарактерности определяемых зависимостей выбран

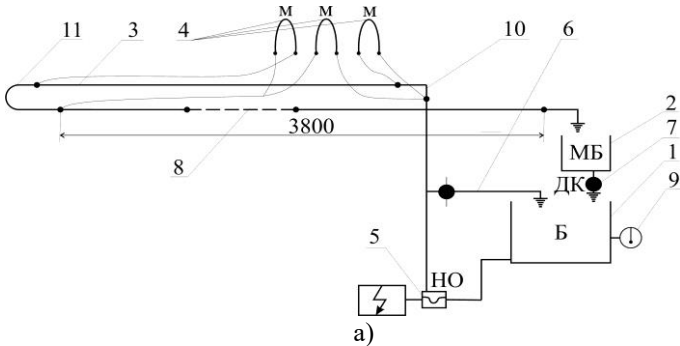
полнофакторный пятифакторный план и получены квадратичные регрессионные зависимости для криволинейного ($\dot{\gamma}$ от 1,8 до 9 с⁻¹) и прямолинейного ($\dot{\gamma}$ от 9 до 48,6 с⁻¹) участков.

Полученные квадратики имеют общий вид:

$$\Phi(x_i) = a_0 + \sum_{i=1}^5 a_i x_i + \sum_{\substack{i=1 \\ j=1}}^{\substack{i=5 \\ j=5}} a_{i,j} x_i^2 x_j + \sum_{i=1}^5 a_{ii} x_i^2, \quad (35)$$

где a – постоянные коэффициенты квадратики; x_i, x_j – факторы влияния в действительных переменных.

Для проверки разработанных моделей течения водоугольной среды проведен констатирующий эксперимент по определению удельных потерь давления на прямолинейном участке, а также в фасонных элементах трубопровода на экспериментальном стенде (рис. 13). Установка включает: емкость 1 для ТВУС, мерный бак 2, кольцевой трубопровод с измерительным участком 3, пьезометры 4, одновинтовой насос 5, перепуск 6, сливной патрубком с краном 7, прозрачный участок трубопровода 8, термометр 9, колено на 90° 10, а также колено на 180° 11.



б)

Рисунок 13 – Схема (а) и фото (б) экспериментального стенда для исследования характеристик течения ТВУС

В ходе анализа полученных экспериментальных данных, и оценки значимости коэффициентов уравнений регрессии установлено, что значения коэффициентов должны быть не менее чем 55,1; 37,3; 114 – соответственно для прямолинейного участка и поворотов на 90° и 180°.

Значения всех расчетных значений критерия меньше табличного $F_{on} < F_{\alpha}$, следовательно, все полученные регрессионные зависимости адекватно описывают происходящие процессы ($u = 0,05 - 0,15$ м/с; $C = 62 - 67\%$; $A^d = 15 - 35\%$; $\Gamma = 1 - 3$) и запишутся в виде:

- прямолинейный участок

$$\begin{aligned} \Delta i = & 367 \cdot 10^3 - 264 \cdot 10^3 u - 10,4 \cdot 10^3 C - 579 A^d - 13,6 \cdot 10^3 \Gamma + \\ & + 11,7 \cdot 10^3 u^2 + 75,3 C^2 + 242 \Gamma^2 + 4,1 \cdot 10^3 u \cdot C + 26,4 u \cdot A^d + \\ & + 6,7 \cdot 10^3 u \cdot \Gamma + 9,23 C \cdot A^d + 191 C \cdot \Gamma + 12,4 A^d \cdot \Gamma; \end{aligned} \quad (36)$$

- вертикальный поворот 90°

$$\begin{aligned} \Delta p_{90} = & 366 \cdot 10^3 - 67,8 \cdot 10^3 u - 11,4 \cdot 10^3 C - 169 A^d - 2,8 \cdot 10^3 \Gamma - \\ & - 6,9 \cdot 10^3 u^2 + 88,7 C^2 + 0,996 A^{d2} + 317 \Gamma^2 + 1,2 \cdot 10^3 u \cdot C + \\ & + 2,19 C \cdot A^d + 26,4 C \cdot \Gamma; \end{aligned} \quad (37)$$

- горизонтальный поворот 180°

$$\begin{aligned} \Delta p_{180} = & 391 \cdot 10^3 + 668 u + 11,5 \cdot 10^3 C - 726 A^d - 35 \cdot 10^3 \Gamma + \\ & + 8,85 A^d \cdot C + 37,6 A^d \Gamma + 480 C \cdot \Gamma + 84,96 C^2 + 1,2 \cdot 10^3 \Gamma^2. \end{aligned} \quad (38)$$

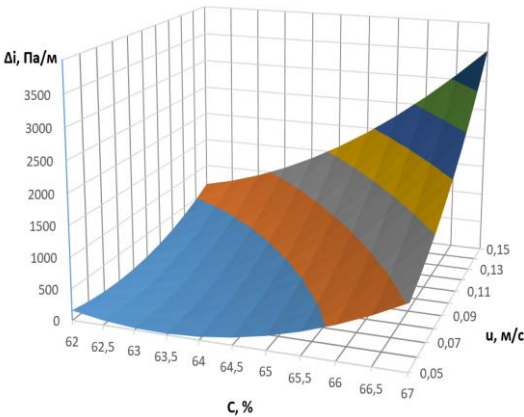


Рисунок 14 – Зависимость Δi для прямолинейного участка от концентрации угля C и скорости течения u ($A^d = 25\%$, $\Gamma = 2$)

Поверхность отклика для прямого участка представлена на рис. 14.

При фиксированных на нулевом уровне значениях зольности исходного угля и критерия бимодальности изменение удельных потерь давления от концентрации твердой фазы носит квадратичный характер с минимумом при $C = 63-64\%$, в то же время аналогичный характер носит зависимость Δi от скорости, при

этом локальный минимум соответствует области $u = 0,07 - 0,09$ м/с.

Произведена проверка адекватности предложенной математической модели течения водоугольной суспензии, путем сравнения расчетных и экспериментальных значений потерь давления для $D = 0,05$ м при $C = 64,5\%$; $A^d = 25\%$; $V^T = 25\%$; $\Gamma = 2$ (рис.15).

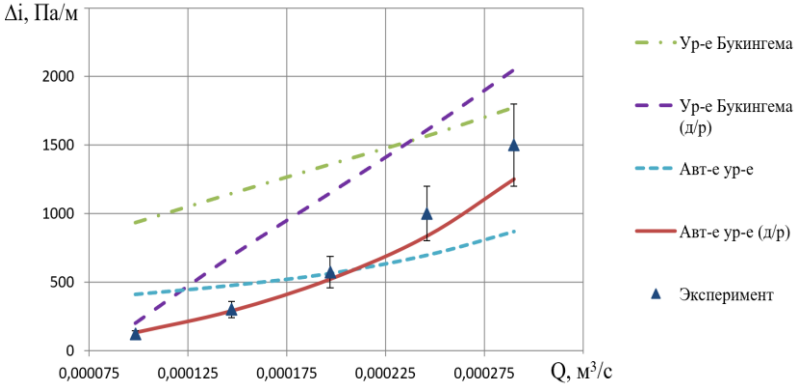


Рисунок 15 – Зависимость удельных потерь давления от расхода ТВУС

Приведенные кривые позволяют установить, что предложенные зависимости для расчета расхода высококонцентрированных дисперсных сред по величине потерь давления для стержневого течения позволяют получить более точные результаты расчёта.

Величина отклонения во многом зависит от точности определения реологических характеристик движущейся среды и ее скорости.

Раздел 5 «Рекомендации и методика расчета основных параметров движения ТВУС в трубопроводных системах технологических процессов. Расчет экономико-экологического эффекта».

В пятом разделе разработана усовершенствованная технологическая схема подготовки отходов углеобогащения, позволяющая получить водоугольную суспензию с заданными характеристиками (рис. 16).

Шламовые воды после операции сгущения 1 попадают под воздействие ударной волны высоковольтного электрического разряда в узле измельчения 2, затем обогащаются в процессе гидросепарации 3 при одновременной подаче реагентов для подготовки пульпы. При скорости вращения ротора гидросепаратора 150 - 200 об/мин частицы плотностью 1800 - 2000 кг/м под действием центробежной силы осаждаются на внутренней поверхности ротора, транспортируются шнеком и в обезвоженном виде выгружаются в породный бункер. Частицы

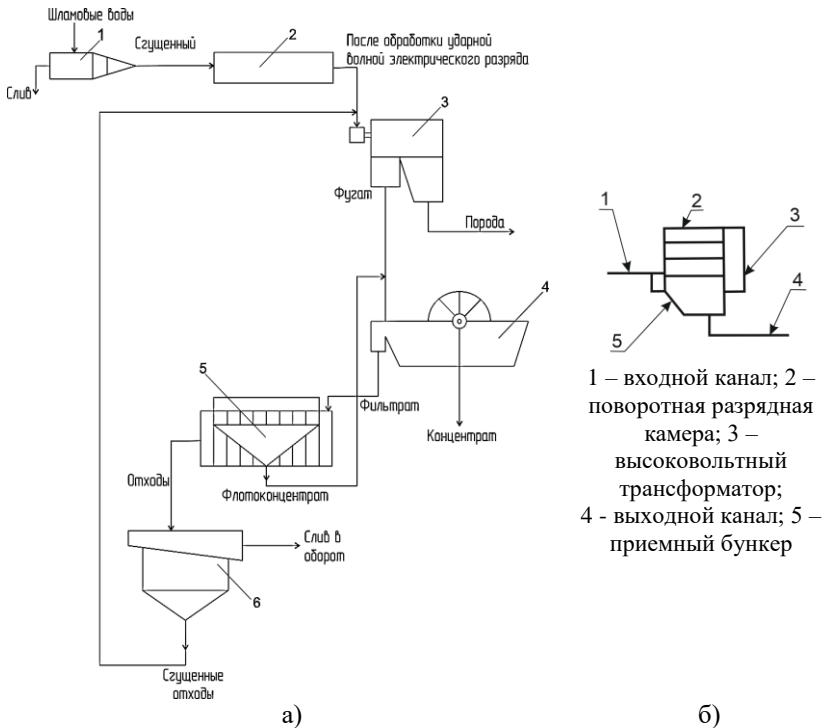


Рисунок 16 – Схема поточного обогащения шламов для подготовки ТВУС

плотностью менее 1400 - 1800 кг/м создаваемым виброкипящим слоем удерживаются во взвешенном состоянии и выносятся фугатом через сливные окна. Фугат, обработанный реагентами, после выделения твердой фазы в процессе обезвоживания 4 подается на флотацию 5. Пенный продукт обезвоживается и затем присаживается к концентрату. Отходы флотации поступают на сгущение 6, а затем возвращаются в процесс гидросепарации 3 для дополнительного обогащения, т.е. выделения малозольных крупных частиц плотностью менее 1400 - 1800 кг/м в фугат. Отходы, оседая на внутренней поверхности ротора, выгружаются вместе с породой.

Разработана методика определения энергетических затрат на течение по трубопроводу ТВУС в технологических системах, что позволило с учетом свойств транспортируемого материала определить потери напора в трубопроводе, рациональный диаметр трубопровода, а также параметры водоугольной среды для обеспечения необходимой

надежности, энергоэффективности и производительности технологической системы.

На основе проведенных исследований разработаны рекомендации обеспечения бесперебойной работы технологической трубопроводной системы для транспортирования ТВУС.

Произведена оценка эффективности работы трубопроводной технологической системы по перемещению топливной водоугольной суспензии на основе критерия количества получаемой тепловой энергии $Q_{ТВУС}$ на 1 кВт затрачиваемой мощности N (рис.17).

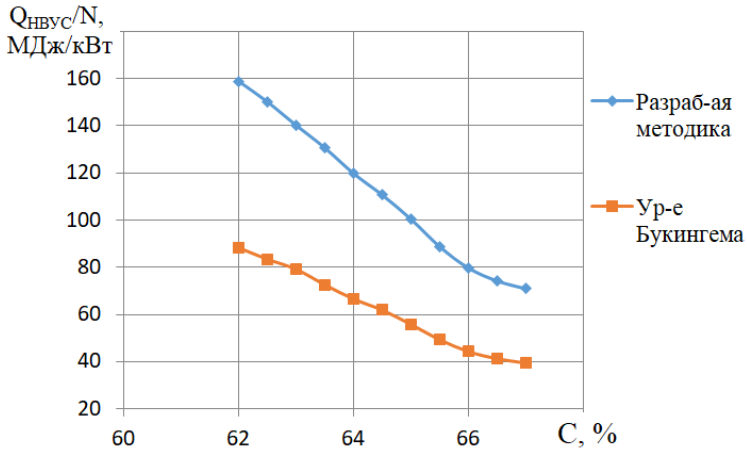


Рисунок 17 – Количество тепловой энергии, приходящееся на единицу затрачиваемой мощности при различных концентрациях угля (марка Г)

Установлено, что целесообразным является приготовление и транспортирование ТВУС с величиной критерия бимодальности Γ не более 2, что обуславливает минимизацию затрачиваемых потерь энергии при течении среды по трубопроводу. Ввиду отсутствия экстремумов на представленных функциях (рис.17) концентрацию твердого компонента следует принимать на основании величины теплотворной способности (при сохранении текучести) получаемого водоугольного топлива т.е. 66-67%. Следует отметить, что внедрение результатов диссертационной работы позволило до 2 раз повысить величину тепловой энергии приходящуюся на единицу затрачиваемой мощности на транспортирование.

Приведена и реализована методика для расчета экономического эффекта с учетом предотвращения экологического ущерба от внедрения результатов диссертационной работы, позволяющая определить как затраты на обслуживание технологической трубопроводной системы, так

и экономический эффект от утилизации шламов, что в денежном эквиваленте составило более 30 млн. руб. в год.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе предложено решение актуальной научно-прикладной проблемы развития теории подготовки и транспортирования топливных водоугольных суспензий из угольного сырья и шламов путем разработки новых методов расчета их реологических, гидродинамических характеристик.

Основные результаты работы заключаются в следующем:

1. В процессе анализа предметной области установлено, что общий объем жидких отходов углеобогащения превышает 63,3 млн т, что соответствует 300 млн ГДж в тепловом эквиваленте. При этом, утилизация угольных отходов тесно связана с приготовлением ТВУС и ее последующим сжиганием в адаптированных для этого котельных установках; кроме того, в последнее время набирает популярность газификация водоугольной суспензии.

2. Существует несколько технологических схем приготовления ТВУС, в основе которых выступают измельчение в шаровых или струйных мельницах (одно-, двух- или многостадийный помол), кавитационное (гидродарное) измельчение и дробление механическим способом, с использованием прессформ и т.д.

3. Установлено, что основными факторами влияния на свойства ТВУС и параметры его течения являются: градиент скорости сдвига, концентрация твердого компонента, зольность исходного угля, выход летучих веществ, критерий бимодальности, тип пластификатора, температура окружающей среды, водородный показатель жидкой фазы, а также время транспортирования.

4. Предложены эмпирические зависимости для расчета коэффициентов влияния пластификатора, температуры окружающей среды, а также закономерности изменения исходного критерия бимодальности, что позволило количественно учесть степень влияния пластифицирующей добавки, повысить точность расчета реологических характеристик до 25% при температурном режиме течения от 20°C до 50°C и спрогнозировать динамику их изменения в процессе транспортирования.

5. Изучены математические модели реологических свойств и течения водоугольных сред с высоким содержанием тонкодисперсной твердой фазы. Наиболее точно водоугольные суспензии описываются реологическими моделями Шведова-Бингама, Баркли-Гершеля и

Шульмана, а для определения параметров течения, используются гидродинамические модели вязкой жидкости и уравнение Букингема.

6. Для осуществления обобщенного расчета основных реологических свойств ТВУС предложена пятифакторная квадратичная регрессная зависимость, полученная в результате проведения планируемых экспериментов для определения напряжения сдвига и эффективной вязкости в диапазонах реализуемых скоростей сдвига ($1,8 - 9 \text{ с}^{-1}$ и $9 - 48,6 \text{ с}^{-1}$) с учетом влияния скорости сдвига, концентрации твердой фазы, критерия бимодальности, зольности исходного угля и выхода летучих веществ, коэффициент корреляции представленных выражений - $R = 0,98$.

7. Разработана физико-математическая модель движения жидкости, основанная на моделировании течения как суммарного перемещения совокупности тонкостенных цилиндров, реализация которой позволила получить уточненные зависимости для местной скорости и расхода ТВУС, что позволило повысить точность определения расхода на величину до 70% по отношению к уравнению Букингема.

8. Разработана математическая модель течения топливной водоугольной суспензии, основанная на расчете локальных значений начального напряжения сдвига и структурной вязкости для соответствующей скорости сдвига при ее величине до 9 с^{-1} , которая позволяет повысить точность определения потерь давления до 30%.

9. Разработан метод численного расчета параметров течения ТВУС, учитывающий изменение структурной вязкости и начального напряжения сдвига по радиусу, путем определения их значений методом касательной к функции напряжения сдвига для соответствующей скорости сдвиговых деформаций, что позволяет осуществить расчет эпюры скорости и величины расхода для любого вида реологического уравнения.

10. Произведены экспериментальные исследования течения топливной водоугольной суспензии по трубопроводу, с целью проверки предложенных теоретических зависимостей. Установлено, что максимальное отклонение теоретических и экспериментальных данных практически во всем массиве подконтрольных экспериментальных точек замера не превысило 17%.

11. Получены функциональные зависимости для определения местных потерь давления при трубопроводном транспортировании ТВУС за счет корректного учета сопротивления на поворотах и в арматуре, что позволяет повысить достоверность расчета сопротивления технологической системы до 10 %, в зависимости от ее конфигурации.

12. Разработан новый способ приготовления ТВУС из обводненных угольных шламов, заключающийся в организации электрического разряда в водоугольной среде, что сопровождается образованием

дробящей ударной волны и предложено устройство для перманентного осуществления данного метода. Предложена технологическая система подготовки ТВУС из указанного сырья, что позволит решить проблему утилизации флотохвостов, что позволит получить значительный экологический эффект.

13. Разработана и реализована методика расчета, и предложены рекомендации для проектирования и эксплуатации трубопроводных систем, включая насосное оборудование, для топливных водоугольных суспензий с учетом особенностей их физических и реологических свойств, что позволило до 2 раз повысить величину тепловой энергии, приходящуюся на единицу затрачиваемой мощности на транспортирование.

14. Произведен расчет экономической эффективности при утилизации шламовых отходов путем приготовления и использования ТВУС, общий расчётный эколого-экономический эффект (в том числе и от предотвращения экологического ущерба) составил для республики более 30 млн рублей.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

Монографии, брошюры, учебники и учебные пособия

1. Андрийчук, Н.Д. Гидравлические системы для ВУТ: моделирование, оптимизация: монография / Н.Д. Андрийчук, М.В. Пилавов, А.А. Коваленко, А.М. Шворникова, Г.С. Калюжный, Д.А. Капустин. – Луганск: ВНУ им. В. Даля, 2013. – 239 с.

Статьи, опубликованные в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, рекомендованных ВАК Луганской Народной Республики

2. Чернецкая-Белецкая Н.Б. Оценка эффективности работы промышленной гидротранспортной системы (ПГТС)/ Н.Б. Чернецкая-Белецкая, А.В. Кущенко, Д.А. Капустин // Вестник Восточноукраинского национального университета им. В. Даля. - Луганск, 2013. - №4(193) – С. 296-300.

3. Капустин, Д.А. Определение факторов транспортируемой среды (водоугольного топлива) влияющих на точность показаний измерительных устройств / Д.А. Капустин, А.В. Кущенко, В.В. Швыров, Р.Н. Сентяй // Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля. – Луганск: Изд-во Луганского государственного университета имени Владимира Даля, 2018. – №11(17) – С. 62-69.

4. Капустин, Д.А. Факторы влияющие на надежность работы гидротранспортной системы / Д.А. Капустин, Р.Н. Сентяй, В.В. Швыров, М.В. Орешкин, В.П. Ермак // Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля. – Луганск: Изд-во Луганского государственного университета имени Владимира Даля, 2019. – №11(29) – С. 67-71.

5. Капустин, Д.А. Технологии утилизации отходов обогащения / Д.А. Капустин, Ю.И. Гутько, М.В. Орешкин, В.В. Швыров // Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля. – Луганск: Изд-во Луганского государственного университета имени Владимира Даля, 2020. – №6(36) – С. 43-49.

6. Капустин, Д.А. Оценка объема отходов обогащения угля, требующих утилизации / Д.А. Капустин, Ю.И. Гутько, М.В. Орешкин, Р.Н. Сентяй// Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля. – Луганск: Изд-во Луганского государственного университета имени Владимира Даля, 2020. – №7(37) – С. 202-207.

7. Капустин, Д.А. Совершенствование стенда для исследования характеристик движения водоугольных суспензий высокой концентрации/ Д.А. Капустин, Ю.И. Гутько, А.В. Кущенко// Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля. – Луганск: Изд-во Луганского государственного университета имени Владимира Даля, 2020. – №8(38) – С. 215-220.

8. Капустин, Д.А. Характер течения водоугольных суспензий в кольцевой области потока / Д.А. Капустин, А.В. Кущенко, В.В. Швыров, Р.Н. Сентяй// Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля. – Луганск: Изд-во Луганского государственного университета имени Владимира Даля, 2020.– №11(41) – С. 58-63.

9. Гутько, Ю.И. Выбор рациональных диапазонов изменения параметров высококонцентрированной водоугольной суспензии при моделировании ее поведения / Ю.И. Гутько, Д.А. Капустин, А.В. Кущенко // Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля. – Луганск: Изд-во Луганского государственного университета имени Владимира Даля, 2021.– №1(43) – С. 198-205.

10. Гутько, Ю.И. Исследование зависимости эффективной вязкости водоугольного топлива от факторов влияния регрессионной модели / Ю.И. Гутько, Д.А. Капустин, М.В. Орешкин, В.П. Ермак // Научный вестник ГОУ ЛНР «ЛНАУ». – Луганск: Изд-во ЛНАУ, 2021. – №1 (10) – С. 394-401.

11. Капустин, Д.А. Современный метод расчета внутритрубного течения концентрированных водоугольных суспензий / Д.А. Капустин, Ю.И. Гутько, А.В. Кущенко // Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля. – Луганск: Изд-во Луганского

государственного университета имени Владимира Даля, 2021.– №3(45) – С. 104-109.

12. Капустин, Д.А. Полуэмпирическая модель течения неньютоновских жидкостей / Д.А. Капустин, А.В. Кущенко // Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля. – Луганск: Изд-во Луганского государственного университета имени Владимира Даля, 2021.– №7(49) – С. 30-35.

13. Капустин, Д.А. Результаты планированного эксперимента по определению реологических характеристик высококонцентрированной водоугольной суспензии / Д.А. Капустин, А.В. Кущенко // Вестник Донецкого национального технического университета. – Донецк: Изд-во ДОННТУ, 2021. – №4(26) – С. 55-62.

14. Капустин, Д.А. Реологические исследования водоугольных суспензий на основе каменных углей / Д.А. Капустин, А.В. Кущенко // Вестник Донбасского государственного технического института. – Алчевск: Изд-во ДонГТИ, 2021.– №24(67) – С. 33-39.

15. Капустин, Д.А. Моделирование течения высококонцентрированных водоугольных суспензий в фасонных элементах трубопроводов / Д.А. Капустин // Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля. – Луганск: Изд-во Луганского государственного университета имени Владимира Даля, 2021. – №9(51) – С. 123-133.

16. Капустин, Д.А. Исследование влияния пластификаторов на реологические свойства ВУС (ВУТ) / Д.А. Капустин // Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля. – Луганск: Изд-во Луганского государственного университета имени Владимира Даля, 2021.– №11(53) – С. 48-55.

17. Капустин, Д.А. Влияние температуры и водородного показателя на реологические свойства водоугольных сред / Д.А. Капустин // Современные наукоемкие технологии. – 2022. – № 2 – С. 44-49.

18. Капустин, Д.А. Оценка степени измельчения угольных частиц ВУТ в процессе транспортирования по трубопроводу / Д.А. Капустин // Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля. – Луганск: Изд-во Луганского государственного университета имени Владимира Даля, 2022.– №4(58) – С. 195-200.

19. Капустин, Д.А. Развитие теоретических основ движения высококонцентрированной суспензии / Д.А. Капустин, Ю.И. Гутько, А.В. Кущенко // Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля. – Луганск: Изд-во Луганского государственного университета имени Владимира Даля, 2022.– №8(62) – С. 145-151.

20. Капустин, Д.А. Методика расчета основных показателей работы трубопроводных технологических систем для ВУТ (ВУС) /

Д.А. Капустин, М.А. Сосновский, А.А. Тивоненко // Вестник Луганского государственного педагогического университета. Серия 5 Гуманитарные науки. Технические науки. – Луганск: Изд-во Книта, 2022.– №3 (89) – С. 95-107.

21. Гутько, Ю.И. Экспериментальные исследования течения высококонцентрированных водоугольных суспензий / Д.А. Капустин, М.В. Орешкин, А.В. Кущенко // Научный вестник ГОУ ЛНР «ЛНАУ». – Луганск: Изд-во ЛНАУ, 2022. – №4 (17) – С. 302-314.

22. Капустин, Д.А. Расчет экономического эффекта от совершенствования теоретических основ течения водоугольных сред / А.В. Кущенко, М.А. Сосновский // Вестник Луганского государственного педагогического университета. Серия 5 «Технические науки». – Луганск: Изд-во Книта, 2022.– №4 (92) – С. 80-88.

23. Гутько, Ю.И. Современные тенденции совершенствования технологии водоугольного топлива (суспензий) / Ю.И. Гутько, Д.А. Капустин, А.В. Кущенко // Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля. – Луганск: Изд-во Луганского государственного университета имени Владимира Даля, 2022.– №12 (66) – С. 35-41.

Статьи в профессиональных журналах и научных сборниках

24. Сентяй, Р.Н. Исследование и сравнительный анализ систем и способов поточного определения зольности угля на предприятиях / Р.Н. Сентяй, Д.А. Капустин, Г.В. Короп, В.В. Швыров // Вестник Луганского государственного педагогического университета. Серия 5. Гуманитарные науки. Технические науки. – Луганск: Книта, 2022. - №1(79) – С. 99-107.

25. Капустин, Д.А. Повышение эффективности работы форсунок совершенствованием их проточной части/ Д. А. Капустин, П.Н. Гавриленко // Вестник Луганского государственного педагогического университета. Серия 5. Гуманитарные науки. Технические науки. – Луганск: Книта, 2022. - №4 (69) – С. 85-92.

Доклады на научных конференциях и другие научные публикации

26. Чернецкая-Белецкая Н.Б. Оценка эффективности работы промышленной гидротранспортной системы (ПГТС)/ Н.Б. Чернецкая-Белецкая, А.В. Кущенко, Д.А. Капустин // Інноваційні технології на залізничному транспорті. IV міжнародна науково-практична конференція: збірник наукових праць конф., 24 - 31 березня 2013 р., м. Париж (Франція)/ відп. ред. Н.Б. Чернецька-Білецька. – Луганськ:

СНУ ім. В. Даля, 2013. – С. 83-85.

27. Капустин, Д.А. Роль и место измерительных устройств, как элемента перспективной системы получения теплоты в малой мощности / Д.А. Капустин, А.В. Кущенко, Г.В. Короп // Информационные и измерительные системы и технологии : сб. науч. ст. по материалам Междунар. науч.-техн. конф. – Новочеркасск, 2016. – С. 116-119.

28. Капустин, Д.А. Определение факторов транспортируемой среды (водоугольного топлива) влияющих на точность показаний измерительных устройств / Д.А. Капустин, А.В. Кущенко, В.В. Швыров, Р.Н. Сентяй // II Международная научно-техническая интернет-конференция «Актуальные вопросы механики текучих сред» : сайт. – 2018 – URL: <http://gdynamic.dahlniver.ru/node/60> (дата обращения: 05.04.2023).

29. Капустин, Д.А. Характер течения водоугольных суспензий в кольцевой области потока / Д.А. Капустин, А.В. Кущенко, В.В. Швыров, Р.Н. Сентяй // IV Международная научно-техническая конференция «Актуальные вопросы механики текучих сред» : сайт. - 2020 – URL: <http://gdynamic.dahlniver.ru/node/76> (дата обращения: 06.04.2023).

30. Капустин, Д.А. Компьютерное моделирование течения водоугольного топлива как вязкопластической жидкости / Д.А. Капустин, В.В. Швыров, Р.Н. Сентяй // Программная инженерия: методы и технологии разработки информационно-вычислительных систем (ПИИВС-2020) : сборник научных трудов III Международной научно-практической конференции, Донецк, 25–26 ноября 2020 года. – Донецк: Донецкий национальный технический университет, 2020. – С. 137-143.

31. Гутько, Ю.И. Исследование зависимости эффективной вязкости водоугольного топлива от различных факторов путем построения регрессионной модели / Ю.И. Гутько, М.В. Орешкин, В.П. Ермак, Д.А. Капустин // Сборник материалов Международной научно-практической конференции «Аграрная наука в обеспечении продовольственной безопасности и развитии сельских территорий» (Луганск, 25 января–08 февраля 2021 г.). – Луганск: ГОУ ВО ЛНР ЛГАУ, 2021. – С. 85-87.

32. Капустин, Д.А. Исследование влияния пластификаторов, температуры и величины pH на реологические свойства ВУС (ВУТ) / Д.А. Капустин // V Международная научно-техническая конференция «Актуальные вопросы механики текучих сред». – 2021 – URL: <http://gdynamic.dahlniver.ru/node/96> (дата обращения: 05.04.2023).

33. Капустин, Д.А. Модель поведения высококонцентрированной водоугольной суспензии как неньютоновской жидкости / Д.А. Капустин, В.В. Швыров // Сборник избранных статей по материалам научных

конференцій ГНІИ «Нацразвитие» : Матеріали Всеросійських (національних) науково-практичних конференцій, Санкт-Петербург, 10–13 вересня 2021 року. – Санкт-Петербург: ГНІИ «Нацразвитие», 2021. – С. 31-33. – ISBN 978-5-907437-33-3. – DOI 10.37539/SEP320.2021.40.54.001. – EDN IYVQUM.

34. Гутько, Ю.І. Сучасні тенденції удосконалення технологій водовугільного палива (суспензій) / Ю.І. Гутько, Д.А. Капустин, А.В. Куценко // «Актуальні питання механіки текучих серед»: збірник тезисів доповідей VI науково-технічної конференції 13-16 грудня 2022 – Луганськ: Вид-во ЛГУ ім. В. Даля, 2023. – С. 8-9.

Патенти

35. Пат. №52357 Україна, МПК F17D 1/14. Пальник для спалювання водовугільного палива : № u201001720 : заявл. 18.02.2010 : публік. 25.08.2010 / Чернецька Н.Б., Коваленко А.О., Шворнікова Г.М., Варакута Є.О., Капустін Д.О., Соколов В.І., Рисухін Л.І., Андрійчук М.Д. ; заявник Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля. – 2 с.

36. Пат. №65996 Україна, МПК F17D 1/14. Пальник для спалювання водовугільного палива : № u201105028 : заявл. 20.04.2011 : публік. 26.12.2011 / Чернецька Н.Б., Коваленко А.О., Шворнікова Г.М., Варакута Є.О., Капустін Д.О., Соколов В.І., Рисухін Л.І., Андрійчук М.Д. ; заявник Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля. – 2 с.

37. Пат. №69849 Україна, МПК F17D 1/14. Пальник для спалювання водовугільного палива : № u201114155 : заявл. 30.11.2011 : публік. 10.05.2012 / Пілагов М.В., Коваленко А.О., Капустін Д.О. ; заявник Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля. – 4 с.

38. Пат. №78283 Україна, МПК F17D 1/14. Пальник для спалювання водовугільного палива : № u201211428 : заявл. 12.10.2012 : публік. 11.03.2013 / Пілагов М.В., Коваленко А.О., Шворнікова Г.М., Капустін Д.О. ; заявник Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля. – 4 с.

39. Пат. №87622 Україна, МПК F23K 1/02, G01F 1/46. Пристрій для вимірювання швидкості потоку суспензії по перерізу трубопроводу : № u201311292 : заявл. 23.09.2013 : публік. 10.02.2014 / Чернецька Білецька Н.Б., Куценко О.В., Коваленко А.О., Шворнікова Г.М., Капустін Д.О., Баранов І.О. ; заявник Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля. – 5 с.

40. Пат. №90142 Україна, МПК F23B 90/00. Спосіб спалювання водовугільного палива : № u201315337 : заявл. 27.12.2013 : публік.

12.05.2014 / Чернецька-Білецька Н.Б., Кущенко О.В., Коваленко А.О., Шворнікова Г.М., Капустин Д.О., Баранов І.О., Крайнюк А.О. ; заявник Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля. – 3 с.

АННОТАЦИЯ

Капустин Д.А. Развитие теории подготовки и транспортирования топливных водоугольных суспензий из угольного сырья и шламов. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.02.13 – Машины, агрегаты и процессы (по отраслям) – ФГБОУ ВО «ДонГТУ». – Алчевск, 2023.

В диссертационной работе изложены результаты исследований по развитию теории подготовки и транспортирования ТВУС из угольного сырья и шламов.

Исследованы технологии утилизации отходов углеобогащения и способы приготовления топливной водоугольной суспензии, а также определены значимые факторы влияния на свойства ТВУС.

Предложены зависимости определения напряжения сдвига и эффективной вязкости с учетом влияния концентрации твердой фазы, критерия бимодальности, зольности исходного топлива, выхода летучих веществ, а также скорости сдвига; разработана модель течения ТВУС по трубопроводу и произведена ее экспериментальная проверка.

Разработана методика расчета параметров работы технологической системы по подготовке и транспортированию ТВУС, осуществлен расчет экономической эффективности и представлены рекомендации по проектированию и эксплуатации технологических трубопроводных систем.

Результаты исследований опубликованы в 40 научных работах.

Ключевые слова: топливная водоугольная суспензия, отходы обогащения, напряжение сдвига, течение, трубопровод, расход, кольцевая область потока, уравнение регрессии, анализ результатов, достоверность, математическое моделирование, утилизация.

SUMMARY

Kapustin D.A. Development of the theory of preparation and transportation of fuel-water-coal suspensions from coal raw materials and sludge. - Manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences in the specialty 05.02.13 - Machines, units and processes (by industry) – FSE HE «DonSTU» - Alchevsk, 2023.

The dissertation work presents the results of research on the development of the theory of preparation and transportation of FWCS from coal raw materials and sludge.

The technologies of utilization of wastes of coal enrichment and methods of preparation of fuel-water-coal suspension have been studied, as well as significant factors of influence on the properties of FWCS have been determined.

Dependences for determining the shear stress and effective viscosity are proposed taking into account the influence of the concentration of the solid phase, the bimodality criterion, the ash content of the initial fuel, the yield of volatile substances, and the shear rate; a model of the FWCS flow through the pipeline has been developed and its experimental verification has been carried out.

A technique for calculating the parameters of the operation of a technological system for the preparation and transportation of FWCS has been developed, a calculation of economic efficiency has been carried out, and recommendations for the design and operation of technological pipeline systems have been presented.

Research results are published in 40 scientific papers.

Keywords: fuel water-coal suspension, enrichment waste, shear stress, flow, pipeline, flow rate, annular flow area, regression equation, analysis of results, reliability, mathematical modeling, utilization.

Подписано в печать 24.08.2023 г.
Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура Times.
Печать лазерная. Усл. печ. лист 2,0.
Тираж 100 экз. Изд. № 1563. Зак. № 1762.
Цена договорная.

Издательство «Ноулидж»
(ФЛП «Лазарев А.И.»)
Свидетельство о регистрации №11-0015382 от 26.07.2016
Адрес: 91034, г. Луганск, ул. Ватутина, д.91, кв.75
Тел. +7(959) 514-97-90, email: nickvnu@yandex.ru