

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«Луганский государственный университет имени Владимира Даля»
(ФГБОУ ВО «ЛГУ им. В. 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)

Диссертация
на соискание ученой степени доктора технических наук

Научный консультант:
Гутько Юрий Иванович
доктор технических наук, профессор

Луганск – 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
Раздел 1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ И СТЕПЕНИ ИЗУЧЕННОСТИ ПРОБЛЕМЫ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ВОДОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА	15
1.1 Этапы развития технологии получения и применения водоугольных суспензий	15
1.2 Классификация водоугольных смесей и способы их получения.....	19
1.3 Способы и технологии утилизации ТВУС.....	26
1.4 Технологические схемы приготовления ТВУС.....	39
1.5 Способы и режимы транспортирования ТВУС	51
1.6 Схемы хранения ТВУС	64
1.7 Оценка объема отходов обогащения угля, требующих утилизации	66
1.8 Постановка цели и задач исследования.....	71
Выводы к разделу 1	72
РАЗДЕЛ 2. ИССЛЕДОВАНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТВУС.....	75
2.1 Реологические модели топливных водоугольных суспензий.....	75
2.2. Современные способы моделирования реологических свойств дисперсных сред	88
2.3 Исследование реологических свойств ТВУС	95
Выводы к разделу 2	128
РАЗДЕЛ 3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ТВУС ...	131
3.1 Уравнения движения водоугольной среды	131
3.2 Характер течения ТВУС в кольцевой области потока	141
3.3 Модель движения ТВУС по трубопроводу.....	151
3.4 Модель движения ТВУС в фасонных элементах трубопроводов и арматуре.....	172
Выводы к разделу 3	198

РАЗДЕЛ 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ И ТЕЧЕНИЯ ТВУС	201
4.1 Моделирование процессов течения концентрированной водоугольной суспензии в лабораторных условиях	201
4.2 Методика проведения экспериментальных исследований.....	205
4.3 Определение реологических характеристик ТВУС	212
4.4 Определение удельных потерь напора на прямолинейном участке и фасонных элементах.....	227
Выводы к разделу 4	242
РАЗДЕЛ 5. РЕКОМЕНДАЦИИ И МЕТОДИКА РАСЧЕТА ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ ТВУС В ТРУБОПРОВОДНЫХ СИСТЕМАХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ. РАСЧЕТ ЭКОНОМИКО-ЭКОЛОГИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА.....	245
5.1 Перспективные способы обогащения отходов	245
5.2 Методика расчета основных показателей работы трубопроводных технологических систем для ТВУС	254
5.3 Расчет экономического эффекта	266
5.4 Рекомендации по эксплуатации систем транспортирования ТВУС	274
Выводы к разделу 5	277
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	280
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	283
ПРИЛОЖЕНИЕ А	325
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	332
ПРИЛОЖЕНИЕ В	361
ПРИЛОЖЕНИЕ Г	364
ПРИЛОЖЕНИЕ Д	367
ПРИЛОЖЕНИЕ Е.....	370

ВВЕДЕНИЕ

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 высокзолных 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 переменной 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. Деягин, С.И. Криль, А.А. Круть, В.И. Мурко, М.В. Пилавов, Ю.Г. Свитлый, Е.В. Семенов, Д.А. Семин, 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 концентрических 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 концентрических 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°С и от 20 до 50°С, 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 9с^{-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 (ПИИВС-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: «Локомотив-Сервис Ростов», «Маршал», ООО «ТД «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; [3] – 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 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] – предложена новая схема обогащения шламовых отходов, произведена оценка приращения удельной поверхности от серии ударных волн; [23] – разработаны рекомендации по эксплуатации трубопроводных систем для ТВУС.

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.

Раздел 1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ И СТЕПЕНИ ИЗУЧЕННОСТИ ПРОБЛЕМЫ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ВОДОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА

1.1 Этапы развития технологии получения и применения водоугольных суспензий

Первые работы в области гидротранспорта кускового угля относятся к 40-м годам прошлого столетия, а работы по созданию угольных суспензий были начаты впервые в 50-е годы [25, 143, 166, 204, 216, 239, 312].

В качестве топлива водоугольные суспензии начали применять за рубежом в целях уменьшения выбросов в окружающую среду окислов углерода, азота, серы и канцерогенных веществ его при сжигании.

Идея создания суспензионных угольных топлив для промышленного использования взамен нефтепродуктов в двигателях внутреннего сгорания, коммунальных котельных и на тепловых электростанциях сформировалась в период нефтяного кризиса начала 70-х годов, когда резко возросли цены на нефть, что привело к экономическому кризису в США, Европе и Японии. В это время вспомнили об успешном опыте Англии во время второй мировой войны, когда из-за дефицита топливного угля на ТЭС сжигали угольные шламы, скопившиеся к тому времени в шламоотстойниках ТЭС [277, 283, 289, 295, 302, 306, 319, 331].

Однако, основное развитие технология водоугольных суспензий получила в начале 60-х годов прошлого века. В целом развитие технологии водоугольных суспензий можно условно разбить на три основных этапа [317]:

- 1 этап – начало 60-х – начало 70-х годов;
- 2 этап – середина 70-х – начало 80-х годов;
- 3 этап – середина 80-х – 90-ые годы.

На первом этапе развитие технологии водоугольных суспензий было вызвано обострением проблемы утилизации тонких угольных шламов,

возникающих в больших количествах при развитии гидравлической добычи и гидротранспорта угля и при широком распространении обогащения углей мокрым способом. В это время были введены в строй крупные обогатительные фабрики и гидрошахты с гидротранспортными системами и обезвоживающими комплексами [56, 77, 110, 268, 286, 294].

При механическом обезвоживании углей, а также при гидродобыче и гидротранспорте угля образуются высокообводненные мелкие классы углей – шламы, наиболее крупные из которых (более 0,05 мм) улавливаются и выдаются вместе с крупными классами углей. Тонкие частицы (менее 0,05 мм) улавливаются менее эффективно, а часто практически не улавливаются при сгущении и обезвоживании и сбрасываются либо в наружные шламовые отстойники, либо в водоемы. При сбросах в отстойники происходит накопление шламов. Количество сбросов составляет в зависимости от производительности фабрики от 130 до 350 тыс. тонн в год при средней зольности угля в них от 20 до 60% мас. [13, 41, 119, 315, 326]. В это время многие научно-исследовательские институты: ИГИ, ВНИИГидроуголь, КузНИИУглеобогащение, УкрНИИГидроуголь и др., производственные предприятия комбината Кузбассуголь и другие организации начинают активно заниматься изучением и решением проблемы утилизации обводненных угольных шламов путем их сжигания в виде водоугольных суспензий. Одновременно получают развитие работы, в которых исследуется теория горения водоугольных суспензий, изучаются их свойства и влияние на эффективность горения, появляются первые экспериментальные и полупромышленные установки по приготовлению и сжиганию ТВУС [110, 114, 126, 290, 291, 303].

Несомненно, наиболее существенный вклад в развитие теории горения водоугольных суспензий и исследование их свойств внесли фундаментальные работы Делягина Г.Н. и Канторовича Б.В. [61, 63, 327], которые получили дальнейшее развитие в трудах их учеников: Давыдовой И.В. [21, 60], Онищенко А.Г. [82], Исаева В.В. [62], Бутильковой Т.Н. [64, 329] и др.

За рубежом наиболее значительные результаты работ по гидротранспорту и сжиганию водоугольных суспензий в этот период опубликованы учеными: Шварц О. и Мертен Г. [150, 164, 268, 344, 349], Тайдзо И. и Сутиэро С.[338, 339] и др. Причем, если в США исследовательские работы в этом направлении носили чисто промышленный характер и были связаны в основном с эксплуатацией трубопроводов для гидротранспорта угля в виде водоугольной гидросмеси (трубопроводы «Ист-Лейк» и «Блэк Меса»), то в ФРГ были проведены достаточно обширные исследовательские работы, например, по теме «Непосредственное сжигание водоугольных суспензий на электростанциях» [307, 308, 340, 345].

Несмотря на то, что эксперименты по приготовлению и сжиганию водоугольных суспензий из угольных шламов были весьма успешными, широкого промышленного и полупромышленного применения данные технологии не получили из-за отсутствия методов глубокой деминерализации тонкодисперсных шламов.

На втором этапе во многих странах развитие работ по водоугольным и частично нефтеугольным суспензиям было обусловлено разразившимся в середине 70-х – начале 80-х годов нефтяным кризисом. Повышение цен на нефть обусловило появление нового интереса к исследованиям водоугольных суспензий с точки зрения снижения зависимости крупных потребителей энергетического топлива от поставщиков нефти. Развернуты работы по приготовлению, транспортированию и сжиганию водотопливных суспензий с целью изучения возможности замены ими дорогостоящей и дефицитной нефти и нефтепродуктов [54, 153, 314, 325, 352].

В нашей стране возобновление работ по технологии водоугольных суспензий в это время было вызвано решением правительства развивать магистральный гидравлический транспорт угля. В соответствии с этим решением была разработана программа работ по созданию крупного опытнопромышленного трубопровода для гидротранспорта угля из Беловского угольного района Кузбасса (ш. Инская) на ТЭЦ №5 г. Новосибирска, как

первого этапа магистрального гидротранспорта угля из Кузбасса на Урал и в Европейскую часть страны. В качестве прототипа трубопроводной системы была принята технологическая схема гидротранспортного топливно-энергетического комплекса «Блек Меса», эксплуатирующегося в США с 1972 года. В соответствии с принятой схемой, одним из важнейших технологических звеньев опытно-промышленного трубопровода, во многом определяющим эффективность всей гидротранспортной системы, является обезвоживающая фабрика, на которой производится обезвоживание угольной гидросмеси перед сжиганием и осветление технологической воды [54, 168, 266, 267, 270].

Разработана технологическая схема сжигания угля после гидротранспорта, включающая операции: обезвоживание угля и осветление технологической воды, помол, подсушка и пылевидное сжигание обезвоженного угля, сгущение тонких классов угля и их сжигание в виде водоугольной суспензии. Однако строительство опытно-промышленного трубопровода с технологией гидротранспорта угля кл. 0–1(3) мм, предусматривающей на конечном терминале операции обезвоживания угля и осветления технологической воды, не было осуществлено в связи с тем, что в 1983 г. Правительством СССР было принято решение вместо разработанной в техническом проекте технологии предусмотреть применение новой технологии гидротранспортирования угля в виде высококонцентрированной водоугольной суспензии, позволяющей на ТЭЦ производить прямое сжигание суспензии в топке котлов, исключая при этом операции обезвоживания и осветления технологической воды. Такое решение правительства было вызвано, в первую очередь, тем, что к этому времени во многих странах мира возник наибольший интерес к водоугольным суспензиям, тем более что развитие технологии приготовления и гидротранспорта водоугольных суспензий достигло уровня промышленного применения. Отработка технологии получения стабильных высококонцентрированных водоугольных суспензий позволила обратить внимание на возможность удачного сочетания в одном агрегате нескольких

стадий приготовления топлива (измельчения, смешения и гомогенизации), позволяющее осуществлять транспортирование, хранение и прямое его сжигание в топках котлов. В результате этого, себестоимость приготовления существенно уменьшается, а конкурентоспособность водоугольных суспензий по сравнению с другими видами топлива резко возрастает. Для реализации принятого постановления была разработана программа научно-исследовательских, конструкторских и опытно-промышленных работ. На этом этапе были выполнены фундаментальные работы по изучению структурно-реологических характеристик водоугольных суспензий, изысканию различных поверхностно-активных веществ для использования в качестве реагентов-пластификаторов с целью регулирования вязкости и стабилизации ТВУС при хранении и гидротранспортировании, созданию специального оборудования для приготовления, гидротранспортирования и переработки суспензий (насосы, смесители, классификаторы, фильтры, запорное оборудование, приборы и др.) [81, 178, 181, 198, 222, 266].

Теоретически обоснованные и практически важные результаты были достигнуты в области изучения факторов, влияющих на формирование структурно-реологических характеристик, статическую и динамическую стабильность ТВУС, благодаря работам ученых под руководством Урьева Н.Б. [44, 47, 71, 81, 241].

Для систематизации водоугольных суспензий, оценки и определения рациональной области их использования была разработана условная классификация ТВУС в зависимости от значений параметров и основных технологических признаков [124, 129, 153, 242].

1.2 Классификация водоугольных смесей и способы их получения

Водоугольные суспензии — это смеси угля с водой, возникшие вначале в виде отходов мокрых процессов обогащения и побочных продуктов обезвоживания угля. Первые попытки использования водоугольного топлива и

разработанные для этого составы ТВУС относятся к середине 1960-х – началу 1970-х гг. (см. табл .1.1) [18, 45, 56, 158, 253, 254].

Таблица 1.1. – Первые установки приготовления и сжигания ТВУС

Предприятие годы работы	Технология, производительность	Зольность	Твердое		Котел, паропроизводит.
			ср, %	P ₉₀ , %	
г. Луганск, шахта «Северная», 1963-64 гг.	Дробление угля 0-3(6), измельчение в шаровой мельнице, классификация в центрифуге. Производительность по сухому 800-1000 кг/ч	17-27	40-49	16-35	ДКВР 6,5/1,3; 6,5т пара/ч
г. Анжеро- Судженск, Анжерская ЦЭС, Кузбасс, 1964-66 гг.	Сгущение шлама в радиальных сгустителях и гидроциклонах; классификация на дуговом сите. Производит. по сухому 4 т/ч	14	46-57	P ₁₀₀ =17- 19	ЛМЗ 14,5т пара/ч
г. Жилево, Жилевская ОПОФ, Московская обл., 1964-65	Смешивание угольной мелочи и угольной пыли с водой. Производит. по сухому углю 1000 кг/ч	19,6	45-50	P ₁₀₀ =1-2	Циклонная топка для получения 10000 нм ³ /ч горючих газов с t=1400-1450°С
г. Магнито- горск, ОФ ММК, Челябинская обл.	Последовательное сгущение шламовых вод в суспензионных сгустителях и барабанных вакуум- фильтрах. Смешивание полученной суспензии с продуктом мокрого измельчения шлама в шаровых мельницах и классификацией полученной ТВУС на дуговом сите; производительность по ТВУС до 40 т/ч	24-34	45-55	P ₁₀₀ =5	Проведены эксперименты по сжиганию ТВУС, выполнен рабочий проект установки

Однако в настоящее время водоугольные суспензии, в т.ч. с использованием реагентов-пластификаторов – одна из оптимальных форм нового вида топлива – водоугольного топлива, успешно разрабатываемого во

многих странах мира (Россия, Китай, Япония, Италия, США, Швеция, и др.). Водугольные суспензии характеризуются следующими основными параметрами и технологическими признаками: гранулометрическим составом, в т.ч. максимальной крупностью угольных частиц в суспензии, массовой долей твердой фазы, зольностью угля в суспензии, реологическими характеристиками, наличием или отсутствием реагентов-пластификаторов, способностью сохранять свои свойства при хранении и транспортировании (см. Табл. 1.1) [279, 281, 296, 301, 318, 320, 328].

В соответствии с граничными значениями диапазонов изменения максимальной крупности частиц и их долей в суспензии предлагается следующая классификация ТВУС по группам (см. Табл. 1.2) [62, 236, 332].

Таблица 1.2. – Классификация угольных суспензий

Параметры	Обозначение и единица измерения	Диапазон изменения	Вид водугольной суспензии
Максимальная крупность частиц в суспензии	d_{max} , мм	$d_{max} < 0,01$	Ультратонкие
		$0,010 < d_{max} < 0,5$	Тонкодисперсные
		$0,2 < d_{max} < 13$	Грубодисперсные
		$13 < d_{max}$	Угольные шламы
Массовая доля твердой фазы в суспензии	c_p , %	$0 < c_p < 45$	Низкоконцентрированные
		$45 < c_p < 55$	Среднеконцентрированные
		$55 < c_p < 75$	Высококонцентрированные
		$c_p < 75$	Угольные пасты
Зольность угля в суспензии	A^d , %	$A^d < 1$	Ультрачистые
		$1 < A^d < 8$	Малозольные
		$8 < A^d < 20$	Среднезольные
		$20 < A^d < 70$	Высокозольные
		$70 < A^d$	Отходы

При гидравлической и механогидравлической добыче угля образуются низко концентрированные угольные пульпы с максимальной крупностью частиц до 100 мм. Гидротранспорт угольных пульп осуществляется, как правило, на небольшие расстояния (до 10-15 км) с помощью высоконапорных насосов по трубопроводам в турбулентном режиме.

Для магистрального гидротранспорта на расстояние 100 км и далее, наиболее приемлемыми являются грубодисперсные средне концентрированные и тонкодисперсные высококонцентрированные водоугольные суспензии (трубопровод «Блэк Месса» и опытно-промышленный углепровод «Белово-Новосибирск»).

Высоконцентрированные водоугольные суспензии являются готовым энергетическим топливом, максимальная крупность частиц твердой фазы в котором соответствует при пылевидном сжигании угля (от 200 до 500 мкм). Крупность частиц в водоугольных суспензиях, предназначенных для сжигания в тепловых двигателях, должна быть значительно меньше (не более 10 мкм), для того чтобы обеспечить максимальное выгорание топлива при малом времени пребывания в активной зоне горения.

Минералогический и фракционный состав твердых частиц может существенно влиять на физико-механические свойства гидросмесей. Так, тонкодисперсные гидросмеси (суспензии) по своим свойствам приближаются к структурным (мел, глина, отдельные марки углей и др.), а грубодисперсные – к неоднородным (крепкие измельченные руды, крупный кварцевый песок).

Исследования, проведенные различными авторами [12, 34, 60, 63, 100, 185, 336] показали, что для твердых частиц, относящихся к каждому из указанных выше видов гидросмесей, характерно определенное гидродинамическое воздействие при обтекании их потоком. Для структурных гидросмесей это воздействие определяется законом Стокса (область преимущественного влияния вязкости), для неоднородных грубодисперсных гидросмесей – квадратичной зависимостью сопротивления движению и скорости, для грубодисперсных – сопротивлением определенной вязкости и турбулентности потока. Гидродинамическое воздействие жидкости на твердые частицы в полидисперсных гидросмесях может иметь одновременно все указанные особенности.

На основе приведенной классификации различных типов гидросмесей характеристика их может быть представлена следующим образом.

Структурные гидросмеси – с точки зрения динамики отличительной особенностью является то, что вследствие малых размеров частиц и большого их количества в потоке (обычно более 25%), активная роль в движении принадлежит твердой фазе. В этом случае, соприкасающиеся твердые частицы передают друг другу движение и давление, а жидкость, заключенная внутри образованной твердыми частицами пространственной структуры, переносится вместе с твердой фазой, причем движение определяется перемещениями, подобными деформациям твердого тела.

Тонкодисперсные гидросмеси, как правило, перемещаются турбулентными потоками при объемной концентрации твердого компонента до 0,5. При течении таких гидросмесей характерно участие твердых частиц в турбулентном перемешивании, и при средней скорости $v_{cp} \ll 1,5 v_{кр}$ (здесь $v_{кр}$ – критическая скорость) обеспечивается примерно равномерное распределение твердых частиц по сечению потока, а гидросмесь приобретает свойства фиктивной однородной жидкости повышенной плотности.

Грубодисперсные гидросмеси в процессе движения характеризуются существенной перестройкой их структуры по сравнению с однородной жидкостью. При этом возникают новая форма напряжения трения в придонной области и деформация профиля скорости, концентрации и крупности твердых частиц по вертикальному диаметру трубопровода. При средних скоростях потока гидросмеси менее v на дне трубопровода образуется неподвижный слой из осевших твердых частиц.

Неоднородные грубодисперсные гидросмеси перемещаются с ярко выраженной неравномерностью распределения твердых частиц по вертикальному диаметру трубопровода. Твердые частицы большей частью перемещаются скачкообразно волочением и перекачиванием по нижней стенке трубы. Характерна наибольшая деформация скоростей при наличии подвижной шероховатости в нижней части трубопровода.

Полидисперсные гидросмеси характеризуются совместным перемещением твердых частиц во взвешенном состоянии, скачкообразно,

волочением и перекачиванием. Взаимное влияние отдельных фракций частиц на их движение существенно зависит от наличия тонкодисперсных фракций.

Отметим, что тонкодисперсные гидросмеси могут быть стабильными и нестабильными по условиям их расслоения в неподвижном состоянии, в зависимости от содержания тонких фракций и их концентрации.

Структурные гидросмеси всегда стабильны и обладают устойчивостью в статическом состоянии. Для успешного сжигания в энергетических установках угольная суспензия должна быть тонкодисперсной – максимальный размер частиц не должен превышать 0,2 мм при преимущественном содержании мельчайших частиц (менее ОД – 0,05 мм). Исследования по транспортированию в трубопроводах суспензий из угля при высоких объемных концентрациях ранее почти полностью отсутствовали.

К первым подобным исследованиям могут быть отнесены опыты А.П. Юфина (1949 г.) [116, 119, 152]. Исходный уголь крупностью 0-6 мм, сильно измельчившись в процессе экспериментов, образовывал затем тонкодисперсную высококонцентрированную угольную суспензию. Эксперименты были проведены только при высоких скоростях движения, поэтому аномальные свойства у этих суспензий не были обнаружены и изучены [118, 117, 309, 46].

В более поздних работах некоторых зарубежных исследователей [304, 309, 310, 311, 312, 321, 348] отмечалась важность проблемы, и указывалось на существование аномальных свойств у угольных суспензий. При этом приводились некоторые опытные данные, полученные не на трубопроводах, а на вискозиметрах.

Наиболее полно с точки зрения трубопроводного транспорта угольные суспензии исследованы в работах В.В. Трайниса [237, 264]. Позднее к изучению транспортирования угольных суспензий приступили и другие исследователи: Н.Е. Оффенгенден, Э.Г. Кшондзер, А.Е. Смолдырев, О.Н. Листопадов, А.А. Белов, С.Ф. Ерохин [120, 121] и др.

Вода в суспензии является инертным материалом, снижающим теплотворную способность топлива. Поэтому в процессе приготовления необходимо добиваться максимального значения массовой концентрации твердой фазы, при обеспечении необходимой текучести суспензии. Эффективными способами для достижения оптимального с точки зрения теплотворных свойств и транспортабельности водоугольных суспензий является управление гранулометрическим распределением частиц твердой фазы и применение реагентов-пластификаторов.

Одной из важнейших характеристик водоугольных суспензий является их зольность, определяемая содержанием негорючих минеральных компонентов в рабочей массе водоугольной суспензии, а фактически в исходном угле. Повышение зольности угля в водоугольной суспензии, также как и влажности приводит к снижению энергетической ценности топлива. Наибольшая эффективность использования и экологическая чистота топлива обеспечивается естественно при сжигании ультрачистых и малозольных суспензий, но при этом резко повышается стоимость приготовления суспензии. Отметим, что в настоящее время процесс глубокого обогащения углей, для обеспечения зольности рабочей массы угля в диапазоне 1–2,5%, находится в стадии разработки [5, 112, 147, 223, 257, 333].

Сырьевой базой для приготовления водоугольных суспензий в нашей стране могут являться рядовые угли и угольные шламы, а в данной работе рассматриваются и исследуются суспензии, полученные из угольных шламов с исходной зольностью, как правило от 18 до 30% мас., подвергнутых обогащению и имеющие зольность после обогащения 10-15% мас. (мало- и средnezольные суспензии).

Важнейшими характеристиками водоугольных суспензий, как искусственного энергетического топлива, определяющими теплотворную способность и транспортабельность, являются реологические параметры и стабильность, т.е. способность сохранять внутреннюю структуру и длительное время не расслаиваться на жидкую и твердую фазы. Характерные свойства

ТВУС формируются на стадии приготовления суспензии из исходного энергетического угля марок Г (газовый) или Д (длиннопламенный). Исходная крупность угля может быть класса: крупный (К) – 50...100 мм; орех (О) – 25...50 мм; мелкий (М) – 13...25 мм. Могут быть и более мелкие классы исходного угля, например, штыб (Ш) – 6 мм [22, 50]. Исходная крупность угля в конечном итоге определяет себестоимость водоугольной суспензии. Основная доля затрат приходится на дробильные и измельчительные операции технологического процесса приготовления ТВУС.

1.3 Способы и технологии утилизации ТВУС

Простейшим способом использования угольных шламов в качестве дополнительного котельного топлива является добавка его к отгружаемому фабрикой продукту, который используется в качестве штатного топлива, как для мощных пылеугольных энергоблоков крупных электростанций, так и для котлов со слоевым сжиганием, котлоагрегатов бытовой и промышленной сферы. Эффективность такого способа не может быть оценена однозначно, поскольку при этом увеличиваются зольность и влажность топлива, а, следовательно, снижается его теплотворная способность и увеличиваются потери от механического недожога [17, 99, 123]. Как следствие, стоимость угля, базирующаяся на его энергетическом потенциале, с увеличением зольности снижается, однако при этом ухудшаются теплотехнические и топочные характеристики и увеличивается расход топлива. К тому же, факельное сжигание угольной пыли при зольности топлива более 25% требует обязательной «подсветки» природным газом или мазутом. Повышенная зольность котельного топлива вызывает необходимость увеличения газомазутной подсветки. Кроме того, существенно возрастают затраты на золоудаление и возмещение экологического ущерба [103, 115, 244, 265].

В ещё большей степени эти недостатки проявляют себя при использовании угля с повышенной зольностью в топках слоевого сжигания с

высоким недожогом и без него при несоответствии экологическим требованиям.

Что касается влажности шламов, то исследованиями факельного сжигания «сухих» и «мокрых» высокозольных отходов углеобогащения, проведенными Днепропетровским химико-технологическим университетом [117, 141], показали, что при влажности более 10% потери от механического недожога резко возрастают и превышают нормальные в 3–4 раза. Следовательно, с энергетической точки зрения, добавки шлама к штатному топливу не должны увеличивать общую влажность смеси больше этой величины [75].

Другим путём использования высокозольных угольных шламов является их вторичное обогащение и использование концентрата в качестве штатного топлива. Институтом «УкрНИИУглеобогащение» разработана адаптивная схема технологического комплекса переработки шламов из илонакопителей с полной утилизацией продуктов производительностью до 120 т/ч и 300 т/ч. Схема является полностью замкнутой и обеспечивает полную утилизацию всех продуктов переработки шламов. Ориентировочная величина капиталовложений на создание одного такого комплекса составляет 26–28 млн рублей.

В этом плане оптимальной технологией, проверенной мировой практикой, является сжигание в топках циркулирующего кипящего слоя (ЦКС), однако эффективное использование этой технологии возможно в существенно модифицированных или специально сконструированных котлоагрегатах, а также при тщательном соблюдении регламентных требований к их эксплуатации. Затраты на модификацию энергетических котлоагрегатов под технологию ЦКС составляют от 400 до 600 долларов США на 1 кВт установленной мощности, а на сооружение нового котла специальной конструкции – до 1400 долларов США.

Кроме того, высокая (более 85%) зольность делает проблематичным сжигание в топках ЦКС сухих отходов угольной промышленности, которых в отвалах шахт и обогатительных фабрик накопилось около 3 млрд т. Известные

к настоящему времени технологии повторного обогащения позволяют извлекать из отходов зольностью менее 75% до 70% углерода. Стоимость продукта обогащения зольностью 35% при аналогичном содержании минеральных включений может составить до одной третьей стоимости антрацитового штыба. Такая технология требует создания соответствующих мощностей, что связано с продолжительным временем и значительными капиталовложениями, и это откладывает её реализацию на отдалённую перспективу [118].

Что касается мокрых отходов обогащения, то их высокая влажность ($W_t' = 28-35\%$) при столь же высокой зольности вызывает необходимость сжигания в подсушенном виде. Кроме того, шламовые отходы содержат большое количество очень мелких частиц, что существенно затрудняет их использование в топках ЦКС без добавки грубой фракции измельчённого угля с целью стабилизации кипящего слоя и циркулирующего потока.

И, наконец, ещё один вариант использования шламов предполагает приготовление на их основе вод угольного топлива в виде водоугольной суспензии высокой концентрации (ТВУС). При этом, следует иметь в виду, что в таком случае отпадает необходимость обезвоживания исходного шлама, гранулометрический состав и крупность которого будут способствовать существенному снижению энергоёмкости измельчения по сравнению с рядовым углем [234].

ТВУС как котельное и печное топливо могут быть использованы в топках котлов всех типов для полной или частичной замены природного газа в качестве основного или дожигаемого топлива с целью повышения степени выгорания углерода и снижения выхода оксидов азота.

Одним из основных преимуществ ТВУС является возможность её приготовления не только на основе высококачественного угля, но также и высокозольной угольной мелочи, удаление которой в шламонакопители сопряжено с ощутимой потерей энергетического потенциала, а накопление в больших объёмах создаёт определённую экологическую угрозу. Кроме того,

технология ТВУС даёт возможность вовлечения в сферу полезного использования промышленных и бытовых отходов, а также сточных вод, засорённых твёрдыми и жидкими энергоносителями [31, 177].

Использование высокозольных угольных шламов в качестве исходного продукта для приготовления ТВУС позволяет отказаться от дорогостоящей и экологически небезопасной сушки, устраняет технологические проблемы с мокрой угольной мелочью у потребителя, снижает или даже полностью исключает расходы на поддержание и эксплуатацию действующих шламонакопителей и капитраты на сооружение новых. Приносит, таким образом, энергетические и экологические выгоды.

Качественные характеристики ТВУС определяются, прежде всего, энергетическим потенциалом и элементным составом исходного угля, от которых зависит эффективность сжигания и образование вредных веществ в очаговых остатках [228]. По содержанию в угле серы, составу золы и ионному составу воды оценивается возможная степень связывания серы при сжигании ТВУС. Оксиды серы, образующиеся при сжигании угля в результате окисления серосодержащих компонентов топлива, достаточно хорошо связываются оксидами щелочноземельных и щелочных металлов (CaO , MgO , Na_2O , K_2O), а также их соединениями, образуя твёрдые сульфаты, которые выводятся с твёрдыми очаговыми остатками. Если содержания оксидов щелочноземельных и щелочных металлов, а также их соединений в угле и воде недостаточно, в композицию ТВУС вводятся соответствующие присадки [226].

Монооксид азота NO и диоксид азота NO_2 (объединяемые общим символом NO_x) образуются при сжигании топлива за счёт окисления азота воздуха при высоких температурах (термические оксиды азота) и в результате химических реакций азотсодержащих соединений в угле с кислородом воздуха и содержащимися в топливе кислородсодержащими соединениям (топливные оксиды азота). Более низкий при сжигании ТВУС коэффициент избытка воздуха (3–7%), восстановление азота монооксидом углерода при температурах 800–900°C ($2\text{NO} + 2\text{CO} \leftrightarrow \text{N}_2 + 2\text{CO}_2$), а также гетерогенные реакции

с коксовым остатком ($\text{NO} + \text{коксовый остаток} \rightarrow \text{N}_2$) в условиях более низких температур (на $100\text{--}200^\circ\text{C}$) при камерном горении угля приводят к существенному снижению выбросов NO_x . При необходимости в композицию ТВУС вводятся химические присадки – денитрофикаторы [218]. Оценка качества ТВУС, как и любого другого топлива, производится в первую очередь по низшей теплоте сгорания, Q_i^r ккал/кг (кДж/кг), определяющей то количество тепловой энергии, которое выделилось в результате полного окисления горючих компонентов топлива с учётом потери её с водяным паром, содержащимся в очаговых остатках [215].

Величина основной теплотехнической характеристики водоугольного топлива – теплоты сгорания Q_i^r (ккал/кг, кДж/кг) зависит от его концентрации (влажности), содержания в исходном продукте и вида минеральных (негорючих) компонентов, в общем плане учитываемых зольностью. Изучению влияния зольности на характеристики ТВУС было посвящено большое количество исследований, как в нашей стране, так и за рубежом [7, 8, 13, 189, 278, 280, 282, 284, 321]. Диапазон изменения зольности, исходя из назначения ТВУС как заменителя природного газа и мазута, т.е. основного котельного и печного топлива в топках котлов мощных энергоблоков ТЭС, ограничен соображениями достижения максимального энергетического потенциала. Поэтому результаты этих исследований дают только общее представление о закономерности изменения энергетического потенциала топлива в зависимости от его зольности.

Специалистами итальянской фирмы «Снампроджетти» в процессе наладки опытно-промышленного трубопровода Белово-Новосибирск (Россия, Кузбасс) [10, 12, 171] были проведены исследования характеристик ТВУС, полученной на основе угля марки ГД с зольностью на сухую массу 15,32%; 12,68%; 10,06%; 7,43% и 4,79%. ТВУС приготавливалась по технологии «Реокарб». Дроблёный до крупности 3 мм уголь в количестве 45% от общей массы измельчался мокрым способом в шаровой мельнице в присутствии химической добавки НФУ и направлялся совместно с 55% дробленого

исходного продукта в стержневую мельницу. Полученная водоугольная суспензия доводилась до кондиции в гомогенизаторе. Анализ результатов этих исследований показал, что при зольности исходного продукта $A^d=4,79\%$ ТВУС в статических условиях полностью нестабильна. Стабильность ТВУС возрастает по мере увеличения зольности исходного угля. Прослеживается чёткая зависимость реологических характеристик ТВУС от зольности.

С понижением зольности в исследованном интервале при градиенте скорости $\varepsilon=11 \text{ с}^{-1}$ скорость снижается с $\eta=10,21 \text{ Пз}$ до $\eta=5,40 \text{ Пз}$. В тех же условиях показатель степени отклонения поведения ТВУС от ньютоновской жидкости изменяется от 0,54 до 1,15. При зольности $A^d=0-15\%$ ТВУС ведёт себя как дилатантная жидкость [38, 61].

Что касается динамической стабильности ТВУС, исследованной итальянскими специалистами, то с увеличением зольности она падает [30, 300]. Время, необходимое для завершения процесса деградации ТВУС, практически удваивается при снижении зольности от 16 до 5%.

В то же время уже известны результаты исследований, которые подтверждают возможность приготовления ТВУС на базе угля со сравнительно высокой зольностью. Так, специалистами НПО «Хаймек» была приготовлена ТВУС на базе антрацитового шлама зольностью 34,5% с массовой концентрацией 62,8% и эффективной вязкостью 0,82 Па·с. С такими параметрами при градиенте скорости 9 с^{-1} ТВУС остаётся в стабильном состоянии в течение 15 суток. Там же была приготовлена ТВУС из шламов газовых углей с зольностью 42,86% с массовой концентрацией 63,1% и эффективной вязкостью 1,1 Па·с, стабильная при градиенте скорости 9 с^{-1} в течение 10 суток [27, 187].

Из литературы [323, 335] известны случаи приготовления ТВУС с зольностью угля 1,7% для использования, в частности, в качестве дизельного топлива. Стабилизирующей добавкой при этом была смола ксантана. Данных о седиментационной стабильности такой ТВУС не приводится. Однако известно,

что ее перевозка осуществлялась в цистернах со струйными перемешивателями, а хранение – в танках с тихоходными мешалками.

В работе В.И. Мурко [150] водоугольная суспензия рассматривается как сложная система, состоящая из стабилизированной дисперсной системы (СДС), т.е. жидкой фазы, включающей тонко диспергированные твёрдые частицы (средний размер <5 мкм), в основном представленные минеральными составляющими и более крупными частицами органической части угля. Основной упор в этих исследованиях был сделан на изучение влияния содержания и вида минеральных включений на энергоёмкость диспергирования угля и стабильность ТВУС.

Известно, что зольность наряду с крупностью исходного угля оказывает существенное влияние на скорость и энергоёмкость измельчения. Сопоставление экспериментальных данных с теоретическими показало, что основная доля частиц твёрдой фазы ТВУС (при $D < D_{max} = 350$ мкм) агрегируется в достаточно прочную структуру только при наличии необходимого количества тонкодисперсных гидрофильных частиц дисперсионной среды. При этом увеличение зольности исходного угля обеспечивает необходимую устойчивость ТВУС при меньшей массовой доле твердой фазы. Происходящее при этом увеличение вязкости нейтрализуется применением соответствующих химических добавок-пластификаторов.

Влияние зольности на реологические характеристики ТВУС возрастает при одностадийном измельчении исходного угля. Значимость этого положения подчёркивается тем обстоятельством, что энергоёмкость процесса одностадийного измельчения более чем в 2,4 раза ниже по сравнению с принятым в технологии «Реокарб» двухстадийным измельчением.

Особенностью технологии одностадийного измельчения является то обстоятельство, что достаточное количество тонкоизмельчённых угольных частиц образуется только при зольности исходного угля не ниже $A^d = 14\%$. Увеличение выхода крупных классов в продукте одностадийного измельчения при зольности $A^d = 10\%$ и менее приводит к снижению стабильности ТВУС.

Заданные характеристики ТВУС обеспечиваются приготовлением ее по разработанной специалистами Новокузнецкого ГНИП «Экотехника» (Россия) технологии с частичной циркуляцией. Необходимые режимы приготовления ТВУС с заданными структурно-реологическими характеристиками обеспечиваются изменением циркуляционной нагрузки в порядке, обратно пропорциональном зольности исходного угля.

Представляет интерес изучение влияния на реологические характеристики ТВУС отдельных составляющих минеральной части угля на основании общего понятия «зольность угля» [80]. В работе [117] сделана попытка определения влияния двух природных сравнительно чистых компонентов минеральной части, всегда сопутствующих углю – алюмосиликатных глин и кварцитов – на реологические свойства высококонцентрированных водоугольных суспензий (см. рис. 1.1). Результаты экспериментов показывают, что содержание в минеральной части угля алюмосиликатных глин способствует снижению вязкости, тогда как кварциты её увеличивают.

Таким образом, рационально иметь в составе минеральной части исходного продукта приготовления ТВУС алюмосиликаты и оксиды алюминия. Добавку глины можно было бы расценивать как новое техническое решение, направленное на снижение вязкости, если бы это не приводило к уменьшению энергетического потенциала ТВУС. Основным требованием к такому топливу является более высокий энергетический потенциал, что и ограничило диапазон зольности исследованных углей 15–20%. Опыт сжигания такой ТВУС показал жизнеспособность этой технологии, однако развитие и широкое внедрение её сдерживалось, в первую очередь, соотношением между стоимостью угля и стоимостью природного газа и нефти.

Таким образом, одним из наиболее рациональных способов применения водоугольного топлива является его газификация с последующим целевым использованием полученного синтез-газа путем сжигания в газотурбинных или

парогазовых установках [101, 138, 234] или в качестве исходного продукта для термохимического каталитического синтеза.

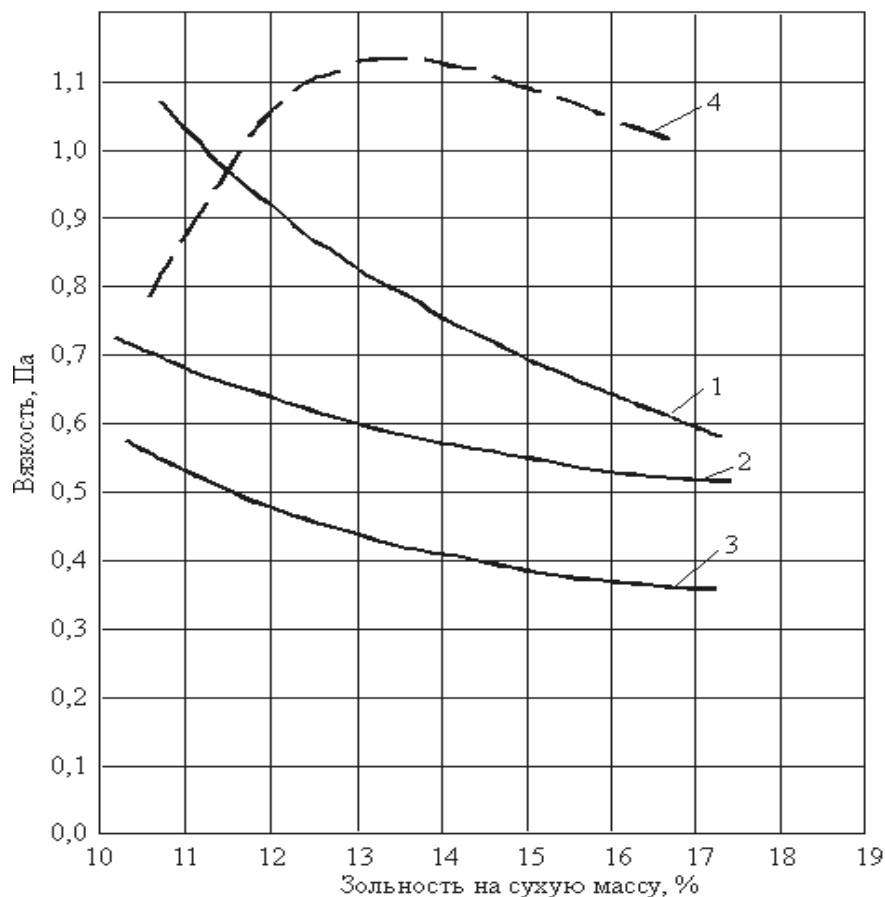


Рисунок 1.1 – Влияние минеральных составляющих угля на вязкость ТВУС при добавлении в исходный уголь: 1 – породы; 2 – гидралуомосиликатной глины; 3 – оксид алюминия; 4 – песка

Технология проведения газификации ВУТ обладает рядом преимуществ. При организации процесса в потоке топливо в газогенератор подается насосами, что обеспечивает непрерывность процесса. Влага ВУТ при взаимодействии с органической массой угля приводит к увеличению количества водорода и монооксида углерода, что способствует получению синтез-газа заданного состава с целью его дальнейшего использования в различных областях промышленности. Высокая температура процесса обеспечивает полноту конверсии в газ, очистка которого от частиц золы, оксидов серы и азота значительно упрощена по сравнению с очисткой продуктов сгорания. Недостаток окислителя в реакционной зоне способствует

образованию сероводорода, конверсия которого в товарную серу – технологически отработанная операция. Количество полициклических ароматических углеводородов и других загрязнителей, образующихся при газификации водоугольного топлива и сжигании синтез-газа, значительно ниже нормативных [141].

Условно весь процесс газификации можно разделить на этапы:

- нагрев и сушка топлива;
- пиролитическое разложение топлива на газообразные продукты и коксовый остаток (выход летучих компонентов);
- термохимическое превращение компонентов смеси.

Состав летучих компонентов, образующихся на этапе термического разложения органической массы топлива, зависит, в основном, от температуры процесса, вида топлива и скорости нагрева частиц. К примеру, при 550°C летучие компоненты представляют собой смесь паров воды, смол, кислот и неконденсирующихся газов (CO_2 , CO , H_2 , CH_4 , C_nH_m), а при температуре свыше 800°C – в основном, CO и H_2 [51].

Газификация топлив проводится в условиях недостатка окислителя, в качестве которого применяются воздух, чистый кислород, водяной пар, а также смесь пара и воздуха или пара и кислорода [71]. В зависимости от дутья получают синтез-газ различного состава и с определенными свойствами.

На рисунке 1.2 приведена классификация методов газификации, в зависимости от применяемого окислителя, свойства и области использования синтез-газа.

При воздушной газификации, где в качестве окислителя используется кислород воздуха, получают воздушный генераторный газ с низкой теплотворной способностью, состоящий, в основном, из горючих компонентов – оксида углерода и водорода, разбавленных азотом воздуха и углекислым газом. Температура в реакторе определяется скоростью подачи воздуха и топлива. Низшая теплота сгорания воздушного генераторного газа составляет

3,5–4,8 МДж/м³, что делает возможным его использование в котлах и двигателях внутреннего сгорания.

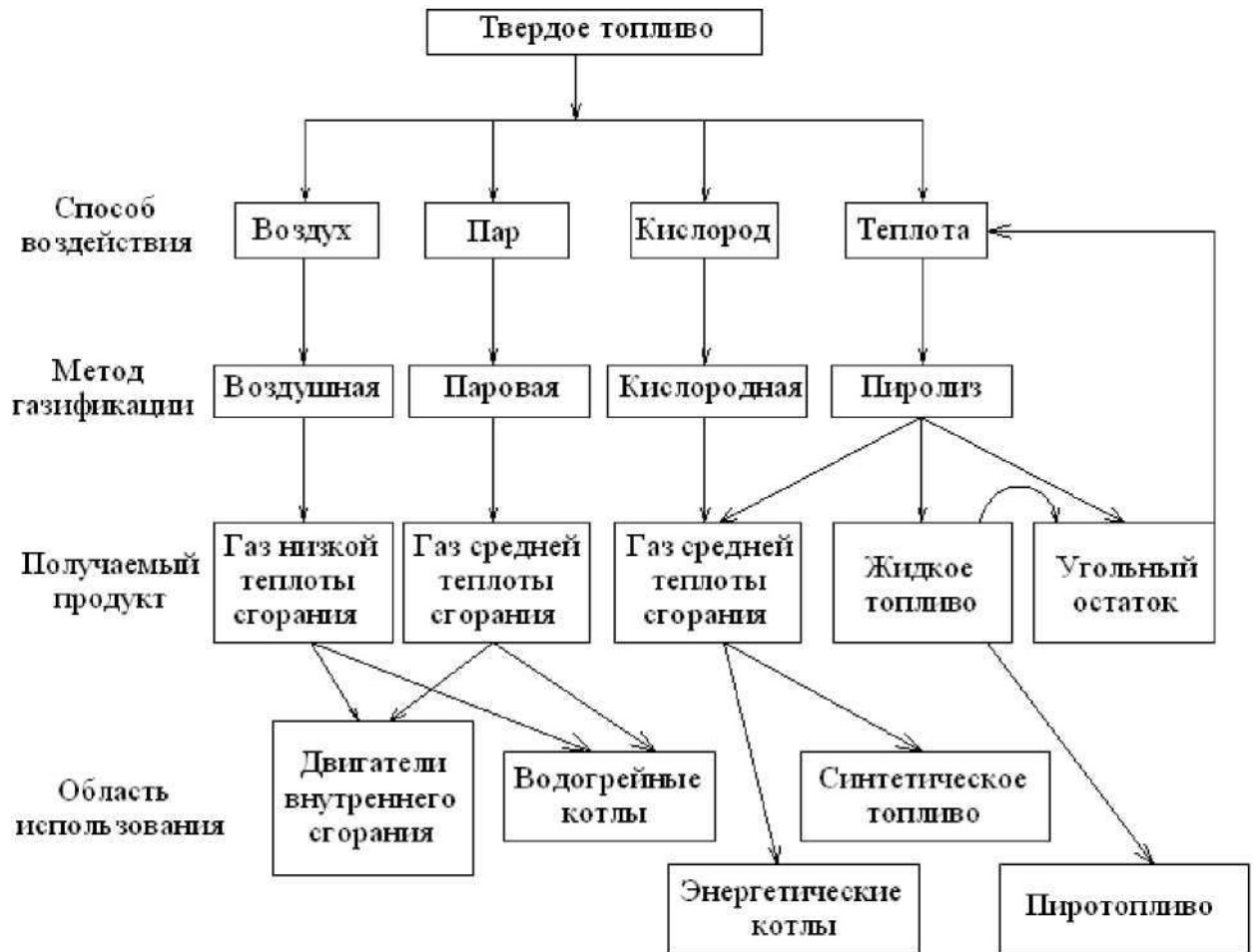


Рисунок 1.2 – Классификация методов газификации

При паровой газификации требуется подвод внешнего источника теплоты, если пар используется в качестве единственного газифицирующего агента. В состав получаемого водяного газа входит преимущественно водород, оксид и диоксид углерода, к которым примешивается водяной пар. Калорийность такого газа выше, чем воздушного за счет образования дополнительного количества водорода при взаимодействии компонентов топлива с паром.

Одновременное использование пара и воздуха в качестве газифицирующего агента позволяет получить смесь воздушного и водяного газов (окись углерода, водород, углекислота, азот и водяной пар), называемой смешанным газом. Оптимальное количество водяного пара, подаваемого в

камеру сгорания газогенератора, зависит от количества теплоты, оставшейся после восстановительных реакций воздушного газа. Избыток водяного пара отрицательно сказывается на процессе газификации за счет снижения температуры в зоне восстановления.

При кислородной газификации генераторный газ не содержит балласта в виде азота, поэтому его можно транспортировать по трубопроводам, использовать для технологических процессов или в качестве исходного сырья для производства химических продуктов и синтетических топлив. Данный процесс требует наличия воздухоразделительной установки для производства чистого кислорода. С экономической точки зрения это повышает капитальные затраты. Однако при этом увеличивается теплота сгорания получаемого генераторного газа до уровня 10–15 МДж/м³.

В таблице 1.3 приведены наиболее распространенные методы газификации твердого топлива и соответствующие им продукты.

Таблица 1.3 - Методы газификации твердого топлива

Метод	Получаемые продукты
Воздушная газификация	CO, CO ₂ , H ₂ , CH ₄ , N ₂ , смолы. Теплотворная способность 3,5-4,8 МДж/м ³
Кислородная газификация	CO, CO ₂ , H ₂ , CH ₄ , смолы. Теплотворная способность 10-15 МДж/м ³
Паровая газификация	CO, CO ₂ , H ₂ , CH ₄ , смолы. Теплотворная способность 12-20 МДж/м ³

Уголь в газогенератор можно подавать в сухом виде или в виде водоугольной суспензии. Очень короткое время пребывания угольной пыли в газогенераторе требует, чтобы размеры частиц угля были менее 1 мм. Поточные газогенераторы работают в диапазоне температур 1000–2000°С и давлении 2–8 МПа. Соответствующие режимные параметры обеспечивают максимальную эффективность процесса по сравнению с другими способами газификации. Высокая температура, выше температуры плавления золы, обеспечивает наиболее полную конверсию углерода, а получаемый газ не

содержит фенолов и смол; при этом невозможность связывания серы из-за высоких температур компенсируется глубокой сероочисткой газа, который не содержит балласта в виде азота [49]. Однако, высокая температура негативно сказывается на горелках и материалах газогенератора, уменьшая срок их службы, тем самым, увеличивая эксплуатационные расходы. Также требуются теплообменные аппараты, рассчитанные на высокую температуру эксплуатации. В поточных газогенераторах не рекомендуется использовать угли с высокой зольностью и температурой плавления.

Использование газогенераторов, где в качестве окислителя используется чистый кислород, затруднительно с экономической точки зрения в малых масштабах в связи с высокими капитальными затратами, связанными, в первую очередь, с необходимостью строительства станции получения чистого кислорода и использованием дорогих теплообменников.

На интенсивность газовыделения, а также на состав и количество образующихся газов существенное влияние оказывают размер и скорость нагрева частиц: чем меньше размер частиц топлива и чем быстрее они нагреваются, тем интенсивнее образуются продукты термического преобразования. Для реализации процесса разработаны несколько способов газификации, наиболее известными из которых являются «Koppers-Totzek» и «Техасо». По методу «Koppers-Totzek» пылевидное топливо подается встречными потоками вместе с кислородным дутьем, а метод «Техасо» заключается в подаче пылевидного топлива в виде водной суспензии в струю окислителя, обогащенного кислородом [138].

Следует отметить, что существует огромное количество различных технологий и способов газификации сухих и влажных угольных топлив, в связи с чем, целесообразным является использование ТВУС в качестве сырья для получения синтез-газа.

Для подачи топливной водоугольной суспензии в зону реакции (горения, газификации) используются распыливающие устройства – форсунки (горелки). В них реализуются различные способы распыления: механический,

пневматический, паровой, воздушно-механический и т.д. Перспективными для подачи ТВУС являются форсунки производящие дробление потока за счет соударения струй [173-175], что позволяет повысить ее долговечность и обеспечить качество распыления в течение длительного времени.

1.4 Технологические схемы приготовления ТВУС

В разработке научных основ и технических решений технологии приготовления ТВУС лидерами являются ведущие фирмы США (Пенсильванский университет, The Energy and Environmental Research Center — EERC — университета Северная Дакота), Канады (Cape Breton Development Corporation), Италии (Snamprogetti), Германии (Salzgitter), Швеции (AB Carbogel), Франции (Исследовательский центр Elfsolaize) [304, 316, 320, 328].

В последние годы интерес к технологии ТВУС усиливается стремлением ряда стран выйти из зависимости от поставщиков нефти, которая занимает ключевую позицию в их энергобалансе. Это положение иллюстрируется тем фактом, что в 1990 году потребление нефти в таких странах, как Япония, Корея и Тайвань достигало 31,8 млн м³, что могло быть эквивалентным 80 млн т ТВУС. Угольным институтом в Пекине и Исследовательским центром в Танг Шане выполняются работы по совершенствованию и промышленному внедрению технологии ТВУС, ежегодное производство которой в Китае достигает 12 млн т. [306, 309].

Японскими компаниями JGC и Nissho Iwai Coal Corp. совместно с Объединением угольных шахт Янчжоу (Китай) было основано предприятие Janri CWM Corp., которое принято в эксплуатацию в марте 1992 года и является примером первого промышленного использования технологии ТВУС [300]. Еще одним японским лидером в промышленном внедрении водоугольной суспензии является компания Japan COM в содружестве с энергетическими компаниями Tokyo Electric Power Co., Tohoku Electric Power Co. и Joban Joint Power Co. В июле 1993 года этими компаниями был пущен в

эксплуатацию полномасштабный промышленный комплекс в Онахаме производительностью 500000 т/год [4, 155, 162, 319, 338].

В СССР центром исследований технологии ТВУС являлось научно-производственное объединение «Гидротрубопровод» (Россия, Москва) и его Донецкое (сейчас АОЗТ НПО «Хаймек») и Новокузнецкое отделения. Свой вклад в разработку и совершенствование технологии внесли институты Национальной академии наук Украины ИНФОУ (Донецк) и ИКХиХВ (Киев) [115, 125].

В результате теоретических и экспериментальных работ, выполненных отечественными и зарубежными исследователями [4, 123, 154, 206, 235], был изучен механизм взаимодействия угольного вещества с водой в присутствии химических добавок различного типа и предложен ряд гранулометрических составов измельченного исходного продукта, в той или иной мере приближающихся к грансоставу максимальной упаковки, обладающих одним общим свойством – бимодальностью. При этом гранулометрическое распределение угля в суспензионной среде при двухстадийном помолу приближается к бимодальному. Зольность используемого угля должна находиться в пределах 10–20%. ТВУС, полученная таким образом, обладает хорошими потребительскими свойствами и может транспортироваться по трубам на большие расстояния и храниться в течение продолжительного времени без изменения ее характеристик.

Среди наиболее известных зарубежных технологий приготовления ТВУС целесообразно отметить следующие:

– «Carbogel» (Швеция, Канада). Технология включает двухстадийный сверхтонкий помол угля в шаровых мельницах с последующим обогащением угля методом флотации. Смешивание обогащенного и частично обезвоженного угля с водорастворимой химической добавкой производится в гомогенизаторе до получения стабильной ТВУС. При исходной зольности используемого для приготовления угля, равной 15%, зольность конечного продукта составляет 2,8–4,0%. Достижимая массовая концентрация – 75%.

– «Co-Al» (Великобритания). Основным требованием технологии является точное соответствие гранулометрического состава угля в ТВУС формуле расчета. Максимальное содержание коллоидных частиц размером менее 0,003 мм в суспензии является обязательным условием. Технологическая схема предусматривает двухстадийное измельчение смеси угля и обогащенного флотоконцентрата в присутствии водорастворимой химической добавки. Контроль крупности осуществляется на грохоте. При необходимости верхний продукт грохочения возвращается на повторное измельчение. Конечным продуктом является ТВУС зольностью 6,5% при максимальном содержании в ней угля до 72%.

– Шведская фирма «Флюидкарбон интернациональ» («Fluidcarbon») для перевода котельной с нефти на каменный уголь разработала метод получения котельного топлива в виде ТВУС. В состав топлива под названием «флюидкарбон» кроме тонкоизмельченного низкозольного угля из Польши и воды, входит специальная химическая добавка (около 1%). Приготовление топлива осуществляется в четыре стадии, которые включают мокрое измельчение угля в шаровых мельницах, обогащение измельченного продукта во флотационных камерах, обезвоживание флотоконцентрата на барабанных вакуум-фильтрах, смешивание и усреднение топлива по качеству. В результате таких технологических операций конечный продукт имеет зольность не выше 2,8% при содержании твердого компонента 68%.

– «Densecoal» (Германия). Технология разработана фирмами «BASF AG» и «Salzgitter AG» и предусматривает как мокрое, так и сухое измельчение угля. При приготовлении ТВУС исследовалась не только технология смешивания уже измельченной угольной пыли с диспергирующей средой, но и сам процесс измельчения в шаровой мельнице, в которую загружается уголь с диаметром частиц от 5 мм до 10 мм с добавлением воды и химических реагентов. В процессе такого измельчения получают продукт со среднезвешенной крупностью 0,04 мм, хотя в принципе технология позволяет получение различных гранулометрических составов угля и различной вязкости суспензии.

В зависимости от качества исходного угля и дальнейшего использования топливной композиции на его основе можно в процессе измельчения изменить время нахождения компонентов в мельнице, скорость вращения ее барабана, а также исходную крупность, количество и состав химических добавок.

Фирма Снампроджетти (Италия) предложила способ получения высококонцентрированных водоугольных суспензий по методу REOCARB, который был принят для приготовления ВУТ на комплексах Белово-Новосибирск (Россия) и Порто Торрес (Италия), где также была включена операция обогащения [17, 111, 199].

На рисунке 1.3 приведена принципиальная технологическая схема приготовления ВУТ по методу REOCARB. Рядовой уголь из штабеля на промплощадке поступает в молотковую дробилку, где дробится до крупности 3 мм. Дробленый продукт вместе с водой и химическими добавками измельчается в шаровой мельнице тонкого помола и затем в количестве до 40% от общего объема направляется в стержневую мельницу, куда одновременно подается оставшийся объем дробленого угля. В зависимости от рода угля на этой конечной стадии достигается необходимая текучесть и седиментационная стабильность суспензии [19, 110, 128].

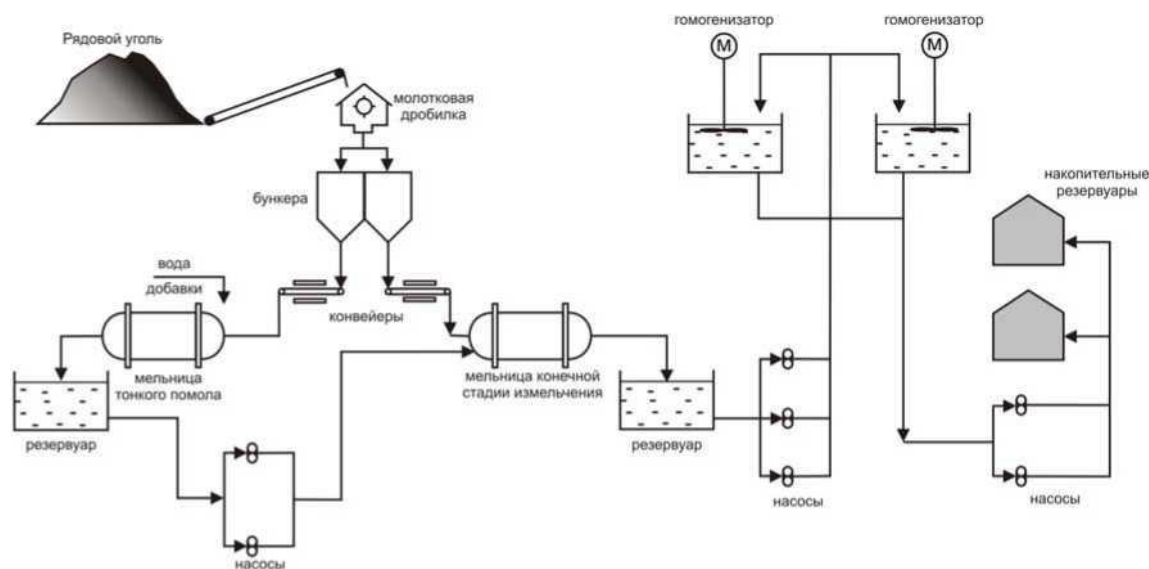


Рисунок 1.3 – Технологическая схема приготовления водоугольного топлива по методу REOCARB

При реализации вышеописанного способа получают суспензию, в которой средний размер измельченного твердого вещества, выходящего из первой стадии измельчения, практически не изменяется независимо от последующей второй стадии измельчения.

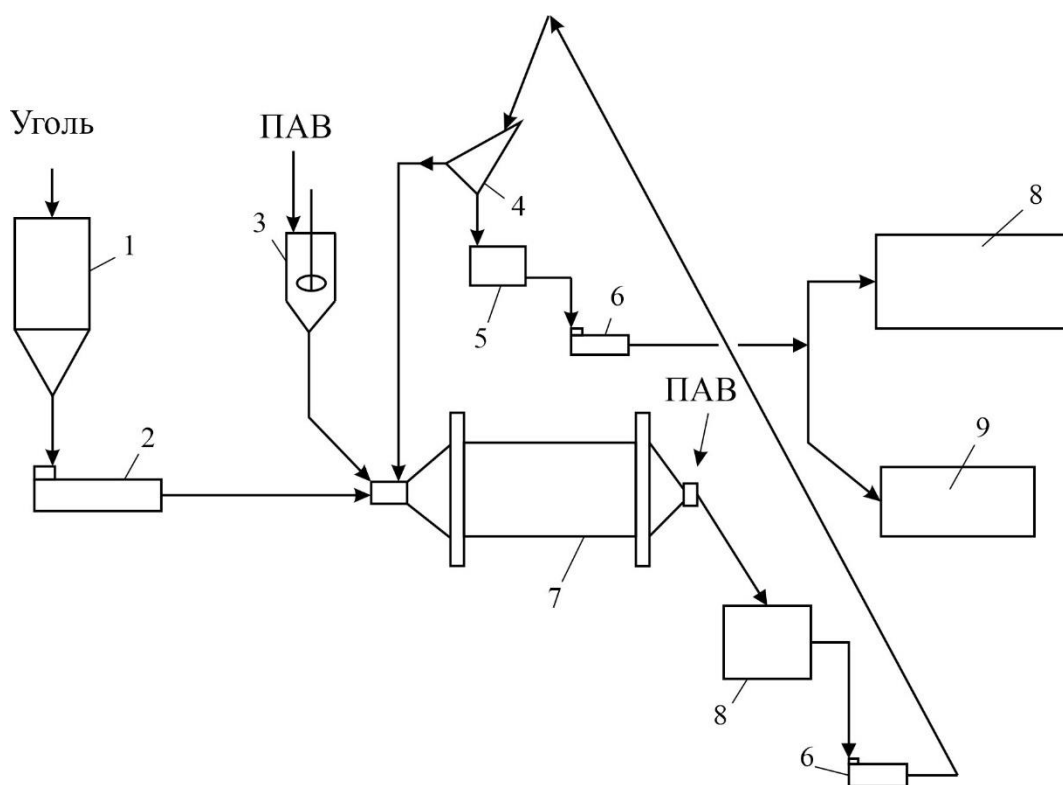
Разработанная в Японии технология приготовления ТВУС заключается в следующем. Методом мокрого измельчения угля приготавливается низкоконцентрированная водоугольная суспензия, которая классифицируется по крупной и мелкой фракциям. Мелкую фракцию обезвоживают механическим способом, а крупную подвергают ультратонкому измельчению. Обезвоженный кек и продукт ультратонкого измельчения смешиваются в гомогенизаторе, в результате чего получается высококонцентрированная ТВУС.

Наибольшее распространение, как у нас в стране, так и за рубежом получили технологические процессы приготовления ТВУС с использованием мокрого диспергирования угля.

Применение мокрого диспергирования угля обеспечивает эффективное совмещение нескольких технологических операций (измельчение, смешивание и гомогенизацию) в одном или двух аппаратах, полную взрыво- и пожаробезопасность, технологичность погрузочно-разгрузочных операций и т.д. Несмотря на то, что разработанные технологические схемы отличаются многообразием, можно выделить два основных направления: применение одностадийного и двухстадийных методов мокрого измельчения.

Применение той или другой технологической схемы обусловлено свойствами используемого угля, требованиями к качеству готовой ТВУС (массовая доля твердой фазы, гранулометрический состав, реологические характеристики и стабильность), эффективностью применяемых реагентов-пластификаторов, наличием технологического оборудования и др.

На рисунке 1.4 представлена наиболее распространенная технологическая схема с одностадийным мокрым измельчением угля, разработанная фирмой «Бэбкок Хитачи» (Япония).



1-бункер; 2-питатель; 3-емкость для ПАВ; 4-виброгрохот; 5-зумпф;
6-насос; 7-шаровая двухкамерная мельница; 8-контур для исследования гидравлических
характеристик ТВУС; 9 – опытное сжигание ТВУС

Рисунок 1.4 – Принципиальная технологическая схема установки
приготовления ТВУС производительностью 0,1-0,2 т/ч
(«БэбкокХитачи», Япония)

Аналогичные технологические схемы реализованы другими японскими фирмами: «Кавасаки Хеви индастрис», «Кубота», «Джепен компани», «Мицубиси Хеви инастрис», «Хитачи», а также компаниями ФРГ и др.

Широкое распространение получила технологическая схема фирмы JGC Corp. (Япония) [123, 287]. Особенностью технологической схемы является измельчение угля в двух шаровых мельницах с низкой и высокой концентрацией угля. Суспензия с низкой концентрацией и крупностью до 500 мкм из шаровой поступает в вакуум-фильтр, на котором обезвоживается до влажности 20–40%. Затем обезвоженный продукт поступает в смеситель, куда подается также суспензия с массовой долей твердой фазы 60–80% и крупностью частиц до 100 мкм содержание кл. <10 мкм более, чем 40%, полученная в другой шаровой мельнице с применением реагента-

пластификатора. После смешивания получается готовая суспензия с массовой долей твердой фазы 60–70% и вязкостью 1,0 Па·с.

Во всех рассмотренных случаях общей технологической операцией является измельчение исходного продукта до крупности 0,35 мм и ниже в шаровой и стержневой мельницах или в любом другом измельчающем устройстве.

Исходной крупностью при этом является крупность 0–3 мм, что, как правило, требует предварительного дробления угля в дробилке. Процесс дробления твердых материалов к настоящему времени, в том числе и в угольной промышленности, в достаточной мере, отработан и изучен. Поэтому проведение дополнительных исследований по данному вопросу не требуется. При этом, следует отдавать предпочтение тем механизмам, которые на выходе обеспечивают получение материала с максимальной крупностью не более 3 мм и наибольшим содержанием класса крупности менее 1 мм. Наиболее приемлемыми для этих целей являются молотковые дробилки со специально подобранными колосниковыми разгрузочными решетками. Отмеченное не исключает применения других дробильных механизмов, если они будут обеспечивать получение дробленого продукта приемлемого гранулометрического состава.

Известно, что реология дисперсных систем определяется такими основными контролируемыми технологическими факторами, как содержание твердого в суспензии, крупность и гранулометрический состав твердой фазы, качество диспергирующей среды (воды и пластификатора) и некоторыми другими технологическими параметрами (например, температурой).

Оценка влияния каждого из перечисленных факторов требует проведения комплекса исследований и испытаний водоугольной суспензии в лабораторных и промышленных условиях. При этом, первостепенное значение приобретает изучение роли гранулометрического состава твердой фазы суспензии и разработка методов его регулирования, обеспечивающих получение высококонцентрированной дисперсной топливной системы. Эта система

должна обладать приемлемыми реологическими характеристиками, необходимой статической и динамической стабильностью, а, следовательно, хорошими потребительскими свойствами. Разработка технологии получения измельченного исходного продукта такого гранулометрического состава с использованием одной шаровой мельницы и явилась задачей исследований, предпринятых в данной работе [264].

Исследования показали, что для приготовления ТВУС максимальной возможной концентрации следует измельчать уголь до гранулометрического состава максимальной упаковки, который в первом приближении описывается формулой Альфреда [82, 128, 134]

$$CRFT = \frac{D_{\mu}^n - D_s^n}{D_l^n - D_s^n} \cdot 100, \quad (1.12)$$

где $CRFT$ – суммарный массовый выход частиц угля, крупность которых меньше оговоренной крупности частицы, %; D_{μ}^n – диаметр, размер частицы, мкм; D_l^n – диаметр самой крупной частицы, мкм; D_s^n – диаметр наименьшей частицы, мкм; n – показатель степени, характеризующий распределение частиц внутри совокупности.

Наилучшие результаты по плотности упаковки для угля получены при $n=0,3...0,5$ и верхнем пределе крупности 0,25–0,35 мм. Гранулометрическое распределение по формуле Альфреда предполагает наличие в угле от 5 до 20% коллоидных частиц, крупность которых не превышает 0,003 мм, находящихся в дефлокулированном состоянии и препятствующих оседанию более крупных частиц при движении потока в ламинарном режиме. В то же время, способствуя повышению текучести суспензий, коллоидные частицы требуют увеличения энергозатрат на их получение и увеличивают стоимость приготовления ТВУС. Совершенно очевидно, что на практике измельчить исходный уголь до такого гранулометрического распределения весьма затруднительно.

Исходя из этого обстоятельства, отечественными и зарубежными исследователями применительно к конкретным условиям приготовления и использования ТВУС были предложены различные модели гранулометрического состава измельчённого угля, обеспечивающие максимальную упаковку и уплотнение [110]. Все эти модели являются «know-how» исследователей и обладают одним общим свойством – бимодальностью, которая достигается путём двухстадийного измельчения в шаровых, стержневых и вибромельницах; смешиванием в различных соотношениях крупных и мелких продуктов двух или нескольких помолов с одновременным удалением из общей совокупности одного или нескольких средних классов.

В мировой практике для мокрого измельчения угля наибольшее распространение получили шаровые и стержневые барабанные мельницы различных типоразмеров, конструктивного исполнения и производительности [64, 162]. В то же время, различными исследователями, как в нашей стране, так и за рубежом, в лабораторных условиях и на пилотных установках испытывались измельчительные устройства других типов (дезинтеграторы, винтовые пружинные мельницы и т.д.). Положительные результаты, обосновывающие перспективу, получены при использовании в технологии приготовления ТВУС различного типа кавитаторов. Барабанные мельницы мокрого измельчения изначально предназначались и используются в настоящее время в горнорудной, строительной и цементной промышленности. В угольной промышленности использование таких мельниц до недавнего времени необходимым не было.

Опыт использования шаровых барабанных мельниц в технологических схемах приготовления ТВУС определяет основной задачей ее совершенствования снижение энергоёмкости измельчения и обеспечение возможности регулирования гранулометрического состава измельчённого продукта из условий заданных реологических, седиментационных и топочных характеристик.

Максимально возможная концентрация водоугольной суспензии с удовлетворительными реологическими и седиментационными характеристиками определяется гранулометрическим составом измельченного исходного продукта, а также применением диспергирующих и стабилизирующих химических добавок. При бимодальном гранулометрическом составе, приближающемся к составу максимальной упаковки, полученном в результате двухстадийного помола угля в шаровой и стержневой мельницах или одностадийного помола в одной шаровой мельнице, без применения химических добавок можно достичь массовой концентрации 56–58% при весьма неудовлетворительных реологических (высокий уровень эффективной вязкости) характеристиках, агрегативной устойчивости и седиментационной стабильности. Снижение концентрации, тем более при повышенной зольности, снижает энергетический потенциал водоугольного топлива, что ставит под сомнение экономическую целесообразность его использования как котельного и печного топлива.

Функции химических добавок в основном сводятся к следующему:

- повышению гидрофильности сильно развитой поверхности угольных частиц путем обволакивания их тончайшей (до 15–20 ангстрем) гидратной оболочкой, исключающей непосредственный контакт между частицами;
- диспергированию угольных частиц в дисперсной среде, препятствующему их агломерации с образованием флокул;
- регулированию водородного показателя дисперсных систем.

Действие химических добавок (как правило, поверхностно-активных веществ) сводится к снижению предельной деформации сдвига или напряжения сдвига вследствие морфологических изменений, происходящих в структурированных системах за счет образования в них ослабленных мест с пониженной плотностью. С этой же точки зрения может рассматриваться и утверждение о том, что в коагуляционной структуре частицы связаны между собой вандерваальсовыми силами через тонкие остаточные прослойки жидкой

среды, а постепенное удаление ее с достаточно больших площадок контакта обуславливает сближение их и вызывает значительное упрочение структуры.

Отсюда следует, что использование поверхностно-активных веществ, а также введение в систему дополнительного количества дисперсионной среды (уменьшение концентрации), позволяет снизить потенциальную энергию взаимодействия между мельчайшими частицами дисперсной фазы, т.е. частично разрушить структуру и реализовать наибольшую текучесть при наименьшей эффективной вязкости.

Таким образом, приготовление ТВУС, исходя из условий обеспечения ее текучести при сохранении агрегативной и седиментационной устойчивости, а также высокого энергетического потенциала при прочих оптимальных параметрах, может быть реализовано только за счет рационального выбора химической добавки.

Следует учесть, что теория пластифицирующего и диспергирующего эффекта различных химических добавок в плане регулирования реологических характеристик высококонцентрированных дисперсных (особенно угольных) систем к настоящему времени разработана недостаточно, поэтому выбор их в каждом конкретном случае целесообразно осуществлять опытным путем.

Одной из основных операций в технологии приготовления водоугольного топлива является гомогенизация. Назначение аппаратов-гомогенизаторов сводится к созданию квазигомогенной суспензии (дисперсии) тонко измельченного угля в воде с небольшим количеством химических добавок. При этом упорядоченное распределение (взаиморасположение) различных по крупности частиц (дискретной фазы) и сплошной жидкой диспергирующей среды должно обеспечить меньшую вязкость и гидравлические сопротивления в трубах по сравнению с суспензией, не прошедшей стадию гомогенизации.

Под гомогенной дисперсией следует понимать такую дисперсию, которая в гидродинамическом, седиментационном и агрегативном отношении ведет себя как однородная чистая жидкость (в том числе, и неньютоновская, бингамовская пластичная или псевдопластичная).

Строго однородных систем в природе не существует, поскольку сама материя дискретна. Распространенный термин «гомогенность» следует рассматривать только как антипод понятия «гетерогенность» [128], основным признаком которой является наличие в системе границы раздела между однородными по химическим и физическим свойствам областями системы – фазами, отделяющими гомогенные фазы друг от друга.

Микрогетерогенные системы обладают огромной поверхностью раздела фаз, большой свободной поверхностной энергией и поэтому принципиально термодинамически неустойчивы. С принципиальной термодинамической неустойчивостью дисперсных систем связана относительность агрегативной устойчивости, которая определяется как способность системы сохранять первоначальную степень дисперсности. Устойчивость дисперсных систем можно характеризовать также их способностью сохранять равномерное распределение частичек по всему объему системы.

По определению, приведенному в источнике [20, 272], седиментационной (кинематической) называется устойчивость дисперсной фазы по отношению к силе тяжести. Нарушение ее ведет к разрушению дисперсной системы и может быть вызвано:

- седиментацией частиц в грубодисперсных системах, приводящей к оседанию дисперсной фазы. Высокодисперсные системы кинематически устойчивы, т.к. для них характерно установление диффузионно-седиментационного равновесия;

- изотермической перегонкой мелких частиц вещества дисперсной фазы в более крупные с последующей седиментацией;

- потерей агрегативной устойчивости в результате объединения частиц, приводящего к коагуляции дисперсной фазы.

Агрегативная устойчивость может быть определена как способность системы к сохранению дисперсности и индивидуальности частиц дисперсной фазы.

С изложенной точки зрения процесс гомогенизации следует рассматривать как способ или метод поддержания водоугольной дисперсной системы в условно гомогенном состоянии.

Для гомогенизации дисперсий в гомогенизируемую среду вводится дополнительная энергия. Тип и методы ввода энергии в обрабатываемую среду могут быть различны: механический, циркуляционный, струйный, пульсационно-струйный, барботажный, электромагнитный, магнитно-вихревой и т.п. На практике, для осуществления перемешивания в системах твердое тело – жидкость (суспендирования) наибольшее распространение получили механические методы перемешивания и аппараты, базирующиеся на этих методах.

Выбор типа гомогенизирующего устройства определяется исходной вязкостью среды, свойствами композиционных составляющих, задачей процесса перемешивания, объемом перемешиваемой среды. Универсальный критерий, позволяющий выбрать аппарат для решения конкретных задач при конкретных условиях, отсутствует. В большинстве случаев, например, турбинные перемешивающие устройства используются при концентрации частиц до 80%, пропеллерные – до 50% и лопастные – больше 60%. Для условий гомогенизации ТВУС в диапазоне изменения вязкости от 0,5 Па·с до 2,5 Па·с могут быть применены турбинные и лопастные перемешивающие аппараты.

1.5 Способы и режимы транспортирования ТВУС

Исследованиями отечественных и зарубежных специалистов доказана техническая возможность и экономическая целесообразность транспортировки водоугольных суспензий по трубопроводам в различных технологических процессах. Углепровод, по сравнению с железнодорожным (автомобильным) транспортом, имеет ряд преимуществ: непрерывность и равномерность потока, постоянное (с усреднением) качество транспортируемого продукта,

независимость работы от погодных условий, отсутствие негативного воздействия на окружающую среду и потерь при транспортировке. Кроме того, ГТС имеют значительную пропускную способность при небольшом количестве обслуживающего персонала, и значительную степень и высокий потенциал автоматизации.

В мире накоплен значительный практический опыт эксплуатации трубопроводного транспорта ТВУС. Среди многих стран выделяются США, которые имеют в своем распоряжении практический опыт сооружения и эксплуатации углепроводов. В разных штатах США спроектированы и действуют ГТС общей протяженностью около 20 тыс. км суммарной пропускной способностью 250 млн т в год [36, 53, 238, 316, 330].

Во Франции фирма «Nevtec» проводит проектирование углепровода пропускной способностью 0,33 млн т угля в год и протяженностью в 7,2 км от завода по подготовке угля в г. La Yauve к ТЭЦ в г. Emile. Немецкой фирмой Зальгиттер проектируется углепровод для сталелитейных заводов (пропускная способность – 3-4 млн т в год).

Итальянская фирма «Tesle Montalcone» участвовала в сооружении ГТС из Польши в Австрию. Его пропускная способность – 5 млн т в год.

Таким образом, зарубежный опыт проектирования, строительства и эксплуатации действующих ГТС показывают, что в настоящее время возникла тенденция ускоренного развития промышленного гидротранспорта угля как в еще не развитых районах, так и в районах с развитой инфраструктурой транспортных средств.

За рубежом эксплуатируются или находятся в стадии проектирования промышленные трубопроводы для транспортировки, как угля, так и других насыпных материалов, в основном продуктов переработки минерального сырья (концентратов руд цветных и черных металлов). [93, 288, 319]. Например, гидротранспортная установка «Углепром» (РФ) имеет следующие параметры: диаметр пульпопроводов – 244,5 мм; длина – 5,3 км; часовая производительность – 280 м³/ч; по твердому – 119 т/ч; 3 центробежных рабочих

насоса и 1 резервный; давление – 13 бар; общая мощность – 160 кВт; высота подъема – 12 м. Главные эксплуатационные расходы связаны с расходами энергии (удельные потери давления при транспортировке), с износом труб и насосов.

Гидротранспорт угля с учетом условий фабрики «Нону» (Франция) характеризуется следующими технико-экономическими показателями: годовой объезд транспортировки 460 тыс. т, капиталовложения 33,5 млн франков, в том числе стоимость труб 3,5 млн франков, насосов – 2,2 млн франков. Стоимость транспортировки 1 тонны составляет 12,4 фр./т, в том числе расходы на электроэнергию и текущее содержание 0,85 фр./т, зарплата персонала (4 чел.) 1,5 фр./т (для сравнения показатели стоимости транспортировки 1 т угля по железной дороге – 13,1 фр./т, автомобильным транспортом – 16,3 фр./т). То есть, применение гидротранспорта является экономически выгодным по сравнению с традиционными универсальными видами транспорта.

Водоугольная суспензия наряду с энергетическими характеристиками, определяющими ее как ценное энергетическое топливо, по сути, является гидросмесью, свойства которой влияют на параметры гидравлической транспортировки и определяют эффективность транспортировки ТВУС. Высокие концентрации мелкодисперстных угольных долей как минеральной, так и органической («летучие») природы придают этой гидросмеси особые свойства, отличающие ТВУС от классических двухфазных гидросмесей. Исследование этих свойств и установление закономерности проявления тех или иных особенностей является важной научно-технической задачей.

Гидравлический расчет трубопроводов для стабильных гидросмесей (суспензий) из тончайших фракций ($d_{m.ф.} < 50$) заключается в определении гидравлических потерь при заданной производительности и должен производиться с учетом реологических характеристик ТВУС, которые при высоком содержании в них угля почти всегда являются неньютоновскими жидкостями и, как правило, тиксотропны.

Для энергетических углей наиболее перспективными считаются следующие технологические схемы гидротранспорта угля от карьеров, шахт и гидрошахт [66, 182, 203, 220, 272]:

- транспортирование мелкого угля (крупностью менее 3–6 мм). В этом случае предусматривается дробление исходного угля до этой крупности. После гидротранспорта уголь поступает или на обезвоживающую станцию, а затем уже в цех пылеприготовления, или подвергается мокрому полному диспергированию (до крупности менее 0,2 мм) для получения угольной суспензии, пригодной для прямого сжигания;

- транспортирование тонкоизмельченного угля (крупностью 0,2 мм) в виде водоугольной суспензии. Так как по условию наименьших энергетических затрат на транспортирование целесообразно иметь влажность суспензии 56–60%, то для возможности ее эффективного сжигания необходимо после гидротранспорта сгустить суспензию до влажности 40–50%. Преимуществом этой технологической схемы является стабильность гидротранспортирования, что полностью устраняет опасность закупорок трубопроводов и делает возможным хранение суспензий в обычных резервуарах. Суспензии можно транспортировать в ламинарном режиме без риска закупорки трубопровода даже в случае длительной остановки системы. Особую привлекательность такая технологическая схема приобретает в связи с возможностью обойтись без дорогостоящей станции обезвоживания, т.к. такие суспензии можно сжигать без предварительного обезвоживания;

- транспортирование мелкого (крупностью 1–6 мм) и кускового (крупнее 6 мм) угля в тонкодисперсной угольной суспензии. После гидротранспорта происходит доизмельчение мелкого и кускового угля или его отделение от суспензии и использование потребителями кускового угля.

Эффективность гидротранспорта по вышеприведенным схемам в первую очередь зависит от крупности перемещаемого материала. Наиболее высокие технико-экономические показатели достигнуты на мелко и тонкоизмельченных материалах.

Необходимо отметить, что каждый конкретный случай применения гидротранспортной системы перемещения угля следует рассматривать особо, т.к. невозможно дать общего заключения об экономичности такой системы в любых условиях. Кроме того, в каждом конкретном случае техникоэкономическому анализу должна подвергаться вся система. Особое место в анализе должно быть уделено начальной и конечной станциям перекачки, т.к. на эти установки, являющиеся важнейшими в технологической схеме, приходится до 40% стоимости всей системы и около 30% эксплуатационных расходов. Эти станции можно упростить, если увеличить верхнюю границу крупности транспортируемых частиц, однако при этом следует учитывать и то, что увеличение крупности частиц повлечет за собой и повышение расхода энергии из-за необходимости увеличения скорости транспортирования с тем, чтобы предотвратить возможные отложения материала в трубопроводе и его закупорку.

Для правильного проектирования систем гидротранспорта необходимы данные о целом ряде параметров будущей системы. Некоторые из них, например, производительность и длина известны заранее. Другие, например, диаметр трубопровода, толщина его стенки, мощность и число насосных станций и т.д. должны определяться расчетным путем таким образом, чтобы приведенные затраты по доставке угля были минимальными. Необходимым составным звеном этих расчетов является гидравлический расчет трубопроводов. В работе представлены модели для гидравлического расчета трубопроводов. Эти модели представляют собой либо систему из двух уравнений для осаждающихся гидросмесей (законы изменения гидравлических потерь и критических скоростей в зависимости от параметров гидросмеси и диаметра трубопровода), либо два уравнения для гидравлических потерь при ламинарном и турбулентном режимах для неосаждающихся суспензий. Представленные далее модели являются эмпирическими зависимостями, полученными на экспериментальных трубопроводах различных диаметров при транспортировании водоугольных суспензий и гидросмесей самых различных

концентраций и грансоставов. Для неосаждающихся суспензий наряду с широко применяемыми моделями псевдопластичных жидкостей предложена модель обобщенной неньютоновской жидкости, учитывающей особенности реологического поведения водоугольных суспензий.

Основная задача инженерных методов расчета гидротранспортных систем – определение их гидравлических и технологических параметров. Для оптимизации системы должны проводиться также и технико-экономические расчеты, основным содержанием которых является анализ показателей по вариантам. Оптимальным является вариант с минимальными приведенными затратами. В каждом конкретном случае такой расчет ведется с учетом специфики производства.

Для выполнения расчетов трубопровода и правильного выбора для каждого случая типа оборудования необходима подробная характеристика перемещаемого материала: плотность, влажность, абразивность, гранулометрический состав, гидравлическая крупность (скорость свободного падения частиц в воде).

Необходимой составной частью расчета трубопровода является гидравлический расчет, который заключается в определении критической скорости транспортирования, минимальной скорости, обеспечивающей взвешенность и перемещение по трубе твердого материала (в случае нестабильных гидросмесей) и гидравлического уклона, перепада давлений, необходимого для перемещения пульпы на единицу длины трубопровода.

При дроблении и последующем измельчении угля, в зависимости от применяемого оборудования, образуются частицы угля различной формы и гранулометрического состава. Поскольку частицы разной гидравлической крупности в смеси с водой обладают различными гидромеханическими свойствами, то, естественно, что при движении гидросмеси происходит частичная классификация частиц в трубе: более мелкие классы располагаются в толще потока, крупные куски и частицы - ближе к его нижней границе. При выполнении гидравлических расчетов важно иметь данные о содержании в

транспортируемом материале фракций менее 0,075 мм; 0,075–0,2 мм; 0,2–3 мм; более 3 мм, а также кусков с максимальными размерами. В большинстве инженерных методов гидравлического расчета используются средневзвешенный размер фракции 0,2–3 мм, для определения которого целесообразно иметь данные о пяти-шести фракциях внутри этого класса [192, 204, 221].

Практически полное отсутствие фундаментальных работ по гидромеханике многофазных систем и, соответственно, надежных методов инженерных расчетов обуславливает наличие у каждого крупного объекта опытной «петли» и проведение большого количества дорогостоящих экспериментов на стендах. К сожалению, даже эти меры не гарантируют безопасной работы трубопровода в случае очень высоких концентраций, когда суспензия начинает проявлять неньютоновские свойства и обладает тиксотропией. В случае длительной аварийной остановки трубопровода суспензия может потерять текучесть, и повторный запуск может оказаться невозможным [37, 111, 192, 246].

Расчет для материалов тонких классов. При гидротранспортировании угля тонких классов следует различать:

- гидросмеси, содержащие в основном классе 0,05–0,15 мм при наличии менее 30% частиц размером 0,15–0,25 мм;
- суспензии, содержащие в основном классе менее 0,07 мм (основная фракция менее 0,04 мм).

В первом случае суспензии могут быть стабильными или нестабильными в зависимости от содержания класса менее 0,04 мм, а их движение осуществляется обычными турбулентными потоками с объемными концентрациями (S) до 0,5. Для второго случая обычно характерны стабильные суспензии, которые при содержании твердой фазы $S > S_{кр}$ могут перемешиваться в режиме вязкопластического течения [11, 246, 341]. Угли тонких классов, образующие метастабильные гидросмеси, обычно транспортируются в двух режимах:

- при скоростях, незначительно превышающих $u_{кр}$;
- при скоростях, значительно превышающих $u_{кр}$.

В обоих режимах частицы перемещаются во взвешенном состоянии. Более экономичным является первый режим. Второй режим рекомендуется применять в случаях, когда на какое-то время нужно увеличить производительность трубопровода. Рассчитываются, как правило, три параметра: критическая скорость $u_{кр}$, удельные потери напора (гидравлический уклон) i и диаметр трубопровода d . Критическую скорость определяли по формуле [37, 179]

$$u = n\sqrt{agd}, \text{ м/с} \quad (1.13)$$

где n – опытная константа, учитывающая влияние свойств и степени дезинтеграции смеси $n=0,7-1,5$ (при надлежащей подготовке угольной смеси $n=1,1-1,2$); $a=(p_s-p_0)/p_0$, где p_s , p_0 – соответственно плотности угля и гидросмеси с частицами менее 0,05 мм или воды (при малом количестве частиц менее 0,05 мм); g – ускорение свободного падения.

Тонко измельченный уголь транспортируют с высокими концентрациями, обычно не ниже 0,2–0,25, но не больше $S_{кр}$. При таких концентрациях $u_{кр}$ практически не зависит от S . Критические концентрации устанавливаются по вискозиметрическим испытаниям, для угля $S_{кр}$ около 0,3–0,35 в зависимости от марки и зольности.

Гидравлический уклон при движении гидросмеси вычисляют по формуле [36, 161]

$$i = i_0(1 + aS), \quad (1.14)$$

где i_0 – уклон при движении чистой воды со скоростью гидросмеси.

Гидравлический расчет трубопроводов для стабильных гидросмесей (суспензий) из тончайших фракций ($d_{cp} < 50$ мм) заключается в определении гидравлических потерь и производительности и должен проводиться с учетом их реологического поведения [36, 233].

Системы твердое-жидкое, в частности уголь-вода при высоком содержании в них угля $S > S_{кр}$ почти всегда неньютоновские. Они, как правило, тиксотропны (явление уменьшения вязкости с увеличением скорости сдвига и времени сдвига). Зависимость от времени вызывает затруднения при прогнозировании поведения суспензии в трубопроводе и при лабораторных испытаниях. Для таких суспензий данные экспериментов, полученные при циркуляции суспензии по замкнутому контуру, дают сильно искаженную картину реологического поведения суспензии [11, 116, 117, 154]. Однако, чаще всего суспензии имеют либо стабильные во времени реологические характеристики [14, 17, 33, 118, 119, 154], либо зависимостью от времени их реологических параметров при течении в длинных трубопроводах можно пренебречь [17]. Такие суспензии обычно описываются наиболее часто применяемыми в реологии неньютоновских жидкостей моделями псевдопластичной жидкости (степенная модель Оствальда) и вязкопластичной жидкости (модель Бингама-Шведова).

Константы этих моделей определяются из вискозиметрических измерений на трубчатых или ротационных вискозиметрах. Они должны быть инвариантны относительно типоразмеров измерительных приборов. Однако, как показывают исследования [152], при определении реологических характеристик угольных, глинистых и цементных суспензий наблюдается их зависимость от типа прибора и размера области течения, причем различие может достигать 200%. Этот же эффект наблюдается и при определении реологических характеристик из измерений на трубах больших диаметров [192]. Попытки объяснить это явление гипотезой пристенного проскальзывания [123], приводят к значительным усложнениям и не могут считаться удовлетворительным решением проблемы, т.к. дают большие (до 30%) расхождения значений реологических параметров, определяемых из измерений на трубчатых и ротационных вискозиметрах [17, 123, 203]. Тем не менее, в настоящее время общепринято рассматривать водоугольные суспензии как

псевдопластичные либо вязкопластичные неньютоновские жидкости, хорошо описываемые моделями Оствальда и Бингама.

При ламинарном режиме течения производительность трубопровода (расход суспензии) Q вычисляется по формуле (для суспензий, описываемых степенным законом) [57, 154, 203]

$$Q = \frac{\pi n}{3n+1} R^3 \left(\frac{\Delta p R}{2Lk} \right)^{1/n}, \quad (1.15)$$

где R – радиус трубопровода, м; L – длина трубопровода, м; Δp – перепад давления, Па; n – степень неньютоновского поведения; k – мера консистенции.

Для турбулентного режима перепад давления определяют по формуле Дарси:

$$\Delta p = \lambda \frac{L}{d} \frac{\rho u_{cp}^2}{2}, \quad (1.16)$$

где λ – коэффициент потерь на трение; ρ – плотность суспензии, кг/м³; d – диаметр трубопровода; u_{cp} – средняя скорость течения суспензии, м/с.

Переход от ламинарного к турбулентному режиму определяется [36] при $Re_{кр}$, зависящем от n . Грубо $Re_{кр}=2100, 3100$ и 5000 при $n=1; 0,38; 0,2$ соответственно.

Для вязкопластичных суспензий при определении перехода хорошее приближение [53] дает зависимость

$$Re_{кр} = \rho \frac{u_{cp} d}{\mu_s} = 2100, \quad (1.17)$$

где $\mu_s = \frac{\tau_0 d}{8u_{cp}} + \mu_{ст}$ – эффективная вязкость, Па·с; τ_0 – начальное напряжение сдвига, Па; $\mu_{ст}$ – структурная вязкость, Па·с.

Расход и перепад давления для ламинарного режима связаны уравнением Букингема:

$$Q = \frac{\pi R^4 \Delta p}{8L\mu_{cm}} \left(1 + \frac{4}{3} \left(\frac{2\tau_0 L}{R\Delta p} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{2\tau_0 L}{R\Delta p} \right)^4 \right). \quad (1.18)$$

Точное решение этого уравнения в радикалах [11] очень громоздко и не используется. Лучшие из приближенных решений этого уравнения относительно Δp [18] также довольно сложны и имеют точность 6%, при чем, только в [17, 19] решение справедливо во всей области изменения параметров. Приведем это решение:

$$\Delta p = \frac{32L\mu_{cm}u_{cp}}{d^2} F(N), \quad (1.19)$$

где $F(N) = \frac{1}{8} \left(N + 2 \left(1 + \sqrt{9 + N} \right) \right)$, $N = \frac{\tau_0 d}{\mu_{cm} u_{cp}}$.

При малом диаметре, большой скорости и вязкости суспензии это решение переходит в наиболее часто применяемое на практике решение так называемого укороченного уравнения Букингема [19]:

$$\Delta p = \frac{32L\mu_{cm}u_{cp}}{d^2} \left(1 + \frac{1}{6} N \right). \quad (1.20)$$

При турбулентном режиме перепад давления определяется по приведенной выше для степенных жидкостей формуле. Только в этом случае коэффициент n' и k' определяют по степенной зависимости между напряжением и сдвигом на стенке при ламинарном режиме течения [20]

$$\tau_{cm} = \frac{d\Delta p}{4L} = k' \left(\frac{8u_p}{d} \right)^{n'}, \quad (1.21)$$

где $n' = \left(\sqrt{9 + N} - 2 \right)^{-1}$, $k' = \frac{3n' + 1}{4n'}$ - близки по смыслу n и k для степенных жидкостей.

Учитывая вышеизложенное, исследователи [37, 123, 204] рекомендуют выбор скорости транспортирования ТВУС и соответствующие ей

гидравлические уклоны для технологических, промышленных и магистральных гидротранспортных систем в интервалах, приведенных в табл. 1.4 и 1.5.

Таблица 1.4 – Рекомендуемые интервалы изменения параметров потока ТВУС в гидротранспортных системах различного назначения [123]

Назначение ГТС	Диаметр труб, D , м	Интервал скорости, u , м/с	Интервал производительности, Q , м ³ /ч
Технологическая	0,050	0,050 – 0,126	0,35 – 0,86
	0,065	0,065 – 0,163	0,78 – 1,95
	0,080	0,080 – 0,200	1,45 – 3,62
	0,100	0,100 – 0,250	2,83 – 7,07
	0,125	0,125 – 0,312	5,32 – 13,80
Промышленная	0,150	0,150 – 0,375	9,54 – 23,80
	0,200	0,200 – 0,500	22,60 – 56,60
	0,250	0,250 – 0,620	44,20 – 109,60
Магистральная	0,300	0,300 – 0,750	121,00 – 305,00
	0,400	0,400 – 1,000	181,00 – 452,00
	0,500	0,500 – 1,250	354,00 – 884,00
	0,600	0,600 – 1,600	611,00 – 1527,00

Также рекомендуется проверка надежности запуска гидротранспортного комплекса после длительной остановки без опорожнения магистрали, которая выполняется следующим образом.

Таблица 1.5 – Расчётные величины удельных потерь напора при гидротранспортировании ТВУС [203]

Диаметр трубопровода, D_n , м	Градиент скорости сдвига $\dot{\epsilon}$, с ⁻¹			
	5	10	15	20
	Удельные потери напора $100i$, м вод. ст./м			
0,050	2,56	3,68	4,80	5,92
0,065	1,97	2,83	3,69	4,55
0,080	2,60	2,80	3,00	3,70
0,100	2,28	1,84	2,40	2,96
0,125	1,02	1,47	1,92	2,37
0,150	0,85	1,23	1,60	1,97
0,200	0,64	0,92	1,20	1,48

0,250	0,51	0,74	0,96	1,18
0,300	0,43	0,61	0,80	0,99
0,350	0,37	0,53	0,68	0,84
0,400	0,32	0,46	0,60	0,74
0,500	0,26	0,37	0,48	0,59
0,600	0,21	0,31	0,40	0,49

После остановки гидротранспортного комплекса и простоя в течение времени T ВУТ изменит свою температуру, что отразится как на касательном напряжении сдвига, так и на вязкости суспензии.

С учетом этого при запуске после хранения внутри трубопровода ТВУС будет характеризоваться следующим значением гидравлического уклона [123]:

$$i_z = \frac{8,02\tau_0^*}{\rho_0 g R} K_T + \frac{2,48\eta_0 Q}{\rho_0 g \pi R^4} \left(\frac{t_0}{t} \right)^{0,74}, \quad (1.22)$$

где i_z – гидравлический уклон ТВУС при запуске после хранения в трубопроводе; τ_0^* – значение начального напряжения сдвига ТВУС на момент остановки; K_T – коэффициент, учитывающий изменение начального напряжения сдвига ТВУС в процессе хранения; η_0 – значение эффективной вязкости ТВУС на момент остановки; t_0 – температура ТВУС на момент остановки; t – температура ТВУС на момент пуска.

Гидравлический уклон, определяемый по формуле (1.22), будет превышать гидравлический уклон, которым характеризовалась ТВУС на момент остановки, на величину

$$\Delta i = i_z - i_0 = \frac{8,02\tau_0^*}{\rho_0 g R} (K_T - 1) + \frac{2,48\eta_0 Q}{\rho_0 g \pi R^4} \left[\left(\frac{t_0}{t} \right)^{0,74} - 1 \right], \quad (1.23)$$

где i_0 – гидравлический уклон ТВУС при остановке гидротранспортного комплекса.

Следует отметить, что подавляющее большинство исследователей рекомендуют обеспечивать ламинарный режим течения водоугольной суспензии, а расчеты турбулентности осуществляются для отдельных зон.

1.6 Схемы хранения ТВУС

Для хранения водоугольных суспензий зачастую используют различные емкости. Они подразделяются на два типа: оперативные и аккумулирующие.

Оперативная емкость предназначена для дозированного приема подготовленного ВУТ из аккумулирующих емкостей, смешения объемов ВУТ, приготовленных в различные периоды времени, и коррекции характеристик (регенераций) суспензии [123, 152, 192].

Оперативная емкость представляет собой вертикальный цилиндроконический полый сосуд. Коническое днище позволяет производить полное опорожнение емкости в конце цикла экспериментальных работ. Конический верх снижает воздействие атмосферного воздуха на характеристики ВУТ, благодаря уменьшенной площади поверхности контакта, Емкость имеет предохранительный «карман», предупреждающий от перелива.

Оперативная емкость имеет два радиальных патрубка в нижней и верхней частях, для подсоединения через задвижки к всасывающим патрубкам насосов, а также три коротких тангенциальных патрубка диаметром 50 мм, расположенных на разных высотах в одной вертикальной плоскости. К этим патрубкам присоединяются вставки со сменными (в случае надобности) соплами [186].

Через эти сопла происходит возврат части подачи ВУТ насосом, превышающей потребление горелок в данный момент времени. Сопла позволяют поддерживать номинальное давление перед горелками и использовать часть кинетической энергии количества движения возвращаемого ВУТ для перемешивания суспензии, приготовленной в различные периоды времени. Забор ТВУС из емкости может осуществляться с любого из двух

уровней (или обоих одновременно) с помощью блока двух параллельно установленных насосов с задвижками. Такое решение в сочетании с установкой сопел на различном уровне позволяет при определенном порядке запуска гидротранспортной системы частично преодолеть возможные негативные последствия длительного хранения ВУТ без движения в емкости, а также корректировать характеристики суспензии с помощью введения в оперативную емкость дополнительных ее объемов.

Оперативная емкость снабжается уровнемером поплавкового типа с рисками на внешней поверхности (напротив контргруза) и направителем поплавка, предотвращающим его смещение под действием струи ВУТ из тангенциальных сопел.

В таблице 1.6 приведены величины подачи ВУТ в сопла емкости (в м³/ч) в зависимости от подачи в топку. Следует учесть, что различные подачи в сопла соответствуют и разным величинам давления.

Таблица 1.6 - Подача ВУТ в сопла оперативной емкости в зависимости от подачи в топку

Подача в топке	0	0,86	1,73	2,10	4,20
Подача в сопле					
верхнее	2,40	2,10	2,47	2,10	-
среднее	1,80	1,52	-	-	-
нижнее	1,80	1,52	1,80	1,80	1,80

Анализ материалов представленных выше показывает, что сопла емкости долины быть рассчитаны на соответствующие номинальные подачи. Среднее и нижнее сопла функционально взаимозаменяемые. Работа топок котла или сушильного агрегата с двумя горелками в номинальном режиме, а также работа насоса на байпасную линию не требует дросселирования сопел. Уменьшение производительности потока в два раза, например, при эксплуатации одной горелки вызывает необходимость снижения подачи в сопла (путем дросселирования) до 85% номинальной.

Площадь сопел оперативной емкости:

$$f = \frac{Q}{3600\mu\sqrt{\frac{2 \cdot 10^3 p_i}{\rho} - gH_3}},$$

где $\mu=0,33$ - коэффициент расхода сопел; H_3 - глубина затопления, м; p_i - давление перед соплом, кПа.

В таблице 1.7 сведены основные параметры расчета сопел.

Таблица 1.7 - Основные параметры сопел

Основные параметры сопел	Верхнее	Среднее и нижнее
Подача, Q м ³ /ч	2,47/2,40	1,80
Давление перед соплом, p_i кПа	601,2/550	566
Глубина затопления, H_3 м	0,9	2,25
Площадь сопел, f м ²	$68,8 \cdot 10^{-6}$	$51,6 \cdot 10^{-6}$
Диаметр сопла, мм	9,3	8,1

Проведенные расчеты показали, что верхнее сопло диаметром 9,3 мм обеспечивает номинальную подачу 2,47 м³/ч при давлении 601 кПа (1,73 м³/ч в горелки котла, 1,8 м³/ч в нижнее сопло) и 2,40 м³/ч при давлении 550 кПа (насос работает на байпасную линию с отключенными горелками; 3,6 м³/ч в нижние сопла) без дросселирования [17, 154, 192].

Размеры аккумулирующих и оперативных емкостей варьируются в широком пределе, в зависимости от режима работы технологического комплекса и производительности используемого оборудования.

На ряду, со струйным перемешиванием используются механические и иные типы гомогенизирующих устройств.

1.7 Оценка объема отходов обогащения угля, требующих утилизации

В условиях развивающейся экономики ЛНР и интенсификации в предыдущие годы добычи угля как основного энергоносителя при одновременном ухудшении его качества и повышений требований к экологической чистоте сжигания твёрдого топлива вызывали необходимость повышения объёма переработки его обогатительными фабриками с

соответствующим увеличением глубины обогащения [72, 105, 119]. Этот процесс сопровождался повышенным выходом высокозольной обводнённой угольной мелочи (шламов), что в технологическом, экологическом.

В настоящее время, реорганизация угольной отрасли и сокращение затрат на содержание отвалов, выводит проблему утилизации отходов обогащения угля на новый уровень.

Обогатительные мощности угольной промышленности до недавнего были представлены 64 обогатительными фабриками (ОФ) общей производительностью по переработке рядового угля 145,7 млн т в год, из которых 20 обслуживают коксохимию и 44 – энергетику (23 – антрацитовые). В отстойники и шламонакопители сбрасываются высокозольные забалансовые илы и отходы флотации. Остальные фабрики обогащают уголь и антрацит до глубины 6–13 мм и складируют в шламонакопителях балансовые шламы средней зольностью не выше 45–50%.

Занимающие общую площадь 1975 га отстойники и действующие ило-шламонакопители, а также десятки отработанных шламонакопителей общей площадью 295 га не только выводят из сферы полезного использования занимаемые ими земельные угодья, но и представляют собой объекты повышенной экологической угрозы, требуют постоянного наблюдения и контроля, а, следовательно, соответствующих расходов [118, 170].

Ежегодно обогатительные фабрики производят и складируют в шламонакопителях около 3,3 млн т отходов обогащения. Ориентировочные эксплуатационные затраты на транспортирование и содержание шламонакопителей составляют 18 руб./т. Вместе с отходами обогатительных фабрик теряется от 10 до 20% углерода от всей поступившей на обогащение горной массы.

Угольная мелочь с высоким содержанием влаги является технологически весьма неудобным продуктом, поскольку транспортирование её сопровождается налипанием на ленты конвейеров, залипанием течек, загрязнением производственных площадей.

Сушка углей и шламов является достаточно дорогостоящей операцией и к тому же сопровождается повышенным выбросом в атмосферу оксидов азота и твёрдых частиц. В зимнее время, при влажности шламов более 5–6% вследствие их замерзания, которое происходит уже при температуре $-2-3^{\circ}\text{C}$, возникают значительные затруднения с перевозкой. При влажности шламов выше 8–10% интенсивность замерзания резко повышается, а при влажности более 15–20% уголь смерзается в монолит.

Обычно угольные шламы выводятся из технологической линии обогатительной фабрики и по трубопроводам гидротранспортных систем удаляются в отвалы, расположенные иногда на значительном расстоянии от обогатительной фабрики, что влечёт за собой расходы на транспортирование, обустройство и эксплуатацию шламонакопителей, не говоря уже об экологическом ущербе. В практике углеобогащения шламом называют обводненную угольную мелочь, образующуюся в процессе дробления, измельчения и истирания угля, а также размокания глинистых включений [73, 206].

Основными факторами, определяющими интенсивность шламообразования, являются крепость угля, размокаемость породы, применяемые схемы обогащения и обработки горной массы.

По крупности частиц шламы принято разделять на зернистые (более 0,35 мкм–0,45 мкм) и тонкие (менее 0,35 мкм–0,45 мкм). Обводнённый тонкозернистый высокозольный шламовый продукт принято называть илами.

Шламовые отстойники всех типов и илонакопители в данной работе объединяются в общую категорию — шламонакопители.

В практике использования угольных шламов принято подразделять их на балансовые (зольностью до 45%) и забалансовые, которые в свою очередь подразделяют на две группы: зольностью от 45 до 60% и зольностью свыше 60%.

Анализ статистических данных показывает, что из балансовых антрацитовых шламов (см. Табл. 1.8) не используются только около 4,4%

(277850 Гкал). Энергетического потенциала этих шламов достаточно, чтобы обеспечить в течение 4-х отопительных сезонов работу котельной, укомплектованной тремя котлами типа ДКВР 10-13 с паропроизводительностью 10 т/час.

Из забалансовых антрацитовых шламов с зольностью до 60% не используются около 47% с энергетическим потенциалом 6,86 млн Гкал, что достаточно для обеспечения в течение года работы двух энергоблоков мощностью по 200 МВт [123].

Забалансовые антрацитовые шламы с зольностью более 60% в теплоэнергетике не используются. Их энергетический потенциал составляет более 6,1 млн Гкал. Общее количество балансовых шламов энергетических и коксующихся углей составляет 680,4 тыс. т с энергетическим потенциалом 2,27 млн Гкал. Все они в той или иной мере используются в теплоэнергетике. Из общего количества забалансовых шламов этой группы с зольностью до 60%, которое составляет 30,86 млн т с энергетическим потенциалом 78,67 млн Гкал. используется в теплоэнергетике около 53% и не используется вообще немногим более 10%.

Наибольший резерв дополнительных энергоносителей составляют забалансовые шламы энергетических и коксующихся углей с зольностью более 60%. При общем количестве более 63,3 млн т их энергетический потенциал составляет почти 120 млн Гкал. Только 30% из них используются в теплоэнергетике и других отраслях промышленности (табл. 1.8).

Анализ состояния и характеристик шламонакопителей обогатительных фабрик угольной промышленности, общего объёма и энергетический потенциал угольных и антрацитовых шламов позволяет отметить, что имеются основания для рассмотрения их в качестве дополнительного источника дешевых энергоносителей либо сырья для получения синтез-газа.

Таблица 1.8 – Характеристика шламонакопителей обогатительных фабрик [123]

Наименование ОФ	Марка угля	Количество шламов, тыс. т					Использование
		Зольность, А, %	Готовых к выемке	В стадии отстоя	В стадии заполнения		
1	2	3	4	5	6	7	
Балансовые шламы							
	Г	38–40	80	202	61	Энергетика	
Черкасская	ДГ, Г	46	168	130	–	– // –	
Маяк	Т	38–40	7	8	9	– // –	
Хрустальская	А	40–45	5	290	70	– // –	
Горская	А	38–40	22	25	38	– // –	
Краснолучская	А	40–45	42	108	122	– // –	
Миусинская	А	39–45	45	50	110	Энергетика, товарный отсев	
Новопавловская	А	40	13,5	26,4	73	Энергетика	
Вахрушевская	А	40–42	32	68	104	– // –	
Центросоюз	А	40–45	26	35	23	– // –	
Ровеньковская	А	38–41	20	42	107	– // –	
Краснопартизанская	А	35–38	15	35	25	– // –	
Забалансовые шламы							
ЛНР							
Славяносербская	ДГ, Г	50–55	395	355	–	Энергетика	
Черкасская	ДГ, Г	52	–	–	3340	Не использ.	
Комендантская	А	55–58	150	200	500	Строит. пр-во	
Яновская	А	55–57	250	–	270	– // –	
Краснопартизанская	А	51–55	102	–	45	Энергетика	
Свердловская	А	55–58	–	150	200	–	
Нагольчанская	А	53–56	70	100	330	Не использ.	
Луганская	ДГ	60–62	–	3500	3100	Не использ.	
Михайловская	ДГ	70	–	–	2400	– // –	
Белореченская	Г, ДГ	70	30	–	5500	– // –	
Стахановская	Г	70	–	1300	1200	– // –	
Брянковская	К	65–75	–	–	958	– // –	
Самсоновская	Ж	70–73	1700	–	–	Не использ.	
Суходольская	Ж	70–75	880	–	–	–	
Дуванская	Ж	70–75	900	–	–	–	
Самсоновская	Ж	60–70	–	–	12480	Не использ.	
Комендантская	А	61,5	150	250	900	Строит. пр-во	
Свердловская	А	61,5	–	550	1150	–	

При этом следует отметить, что наиболее подходящими способами утилизации обводненных отходов являются их сжигание и газификация в виде водоугольной суспензии высокой концентрации.

1.8 Постановка цели и задач исследования

В ходе анализа предметной области установлено, что ни одна технологическая система, связанная с приготовлением, перемещением или использованием водоугольной суспензии (водоугольного топлива), не обходится без трубопроводной системы. При этом к работе подобных комплексов возникает значительное число вопросов, связанных в первую очередь с течением дисперсной среды по каналу круглого сечения, работы насосного, эксплуатации запорной арматуры, характера течения в фасонных элементах и т.д. В связи с чем, целью диссертационной работы является развитие теории подготовки и транспортирования топливных водоугольных суспензий по трубопроводу.

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

- провести анализ объемов отходов обогащения угля и технологий их утилизации;
- провести анализ технологий и способов приготовления ТВУС, в том числе из отходов обогащения угля, определить их преимущества и недостатки;
- изучить математические модели, описывающие свойства и поведение ТВУС при течении по трубопроводу;
- исследовать влияние типа пластификатора, температуры, водородного показателя и времени транспортирования на свойства топливных водоугольных суспензий;
- сформулировать и обосновать новые зависимости расчета основных параметров течения ТВУС;

- провести экспериментальные исследования перемещения водоугольной суспензии по трубопроводу для проверки предложенных расчетно-теоретических зависимостей;
- разработать технологическую схему обогащения обводненных угольных шламов для подготовки ТВУС;
- разработать усовершенствованную общую методику определения параметров движения концентрированных водоугольных суспензий при течении по трубопроводу;
- разработать рекомендации для проектирования и эксплуатации трубопроводных систем для топливных водоугольных суспензий.
- рассчитать экономическую и экологическую эффективность утилизации шламовых отходов путем приготовления и использования ТВУС.

Выводы к разделу 1

В первом разделе представлена история развития технологий водоугольного топлива, а также выполнена классификация водоугольных смесей и суспензий по содержанию твердой фазы, подразделяются на низкоконцентрированную, концентрированную, высококонцентрированную среды, которые соответствуют содержанию частиц угля до 45%, от 45 до 55% и более 55% соответственно, кроме того, приведены классификации дисперсных систем по зольности исходного угля и крупности частиц.

Исследованы способы и технологии утилизации ТВУС. Установлено, что они подразделяются на две большие группы: первая – способы утилизации в обезвоженном состоянии, вторая – технологии с применением водоугольной суспензии высокой концентрации. Использование обводненных отходов имеет ряд неоспоримых преимуществ: позволяет отказаться от дорогостоящей и экологически небезопасной сушки, устраняет технологические проблемы с мокрой угольной мелочью у потребителя, снижает или даже полностью

исключает расходы на поддержание и эксплуатацию действующих шламонакопителей и капитальные затраты на сооружение новых.

Основными технологиями утилизации ТВУС являются сжигание (факельное, в кипящем слое) в топках котлов энергетических установок и газификация для получения синтез-газа. В случае газификации, предпочтительными выступают следующие ее типы паровая или кислородная, которые позволяют получить синтез-газ с теплотворной способностью до 20 МДж/м³.

Рассмотрены технологические схемы приготовления концентрированных водоугольных суспензий (водоугольного топлива) из различного сырья (рядовой уголь, отходы флотации, илы и т.д.). Среди них выделяют технологии «Бэбкок Хитачи», «Кавасаки Хеви индастрис», «Кубота», «Джепен компани», «Мицубиси Хеви инастрис», «Хитачи», JGC Corp. (Япония), «Реокарб» (Италия), немецких компаний, а также различных научно-исследовательских институтов стран СНГ. Установлено, что наиболее распространенной схемой является технология «Реокарб», которая представляется собой двухстадийное измельчение исходного угля в шаровых мельницах с дальнейшей гомогенизацией и фильтрацией, для получения итогового продукта с заданными характеристиками. При этом для приготовления водоугольной суспензии из тонкодисперсных шламов наиболее подходящими являются технологии с использованием мокрого доизмельчения дисперсной среды кавитационными или иными методами.

Также приведены способы и режимы транспортирования концентрированных водоугольных суспензий (топлива). Для их перемещения в рамках технологических процессов приготовления, транспортирования и сжигания (газификации) используются трубопроводные системы различных конфигураций, при этом для доставки потребителям возможно также использования закрытых емкостей (цистерн).

Основным рекомендованным режимом течения выступает ламинарный со скоростями транспортирования от 0,05 м/с в зависимости от диаметра трубопровода.

Приведены схемы хранения концентрированных водоугольных суспензий при их использовании в бытовых и промышленных условиях в малопроизводительных котлах, когда котельная и комплекс приготовления находится на одной промлощадке и связаны только внутризаводским трубопроводом, то срок хранения может быть ограничен 3–5 сутками.

Для промышленных систем средней производительности, когда комплекс приготовления ВУТ находится на определенном расстоянии от потребителя, а топливо доставляется трубопроводным, автомобильным или железнодорожным транспортом, то срок хранения ВУТ увеличивается до 10–15 суток.

Для крупных топливно-энергетических комплексов, которые включают тепловые электростанции и магистральную гидротранспортную систему, то транспортабельные качества и сроки хранения в резервуарах должны обеспечиваться, по крайней мере, в течение 30–35 суток.

Произведена оценка объема отходов углеобогащения, требующих переработки, их общее количество более 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 водоугольной суспензии (топлива), не обходится без трубопроводной системы. При этом к работе подобных комплексов возникает значительное число проблем, связанных в первую очередь с течением дисперсной среды по каналу круглого сечения, работы насосного, эксплуатации запорной арматуры, характера течения в фасонных элементах и т.д.

РАЗДЕЛ 2. ИССЛЕДОВАНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТВУС

2.1 Реологические модели топливных водоугольных суспензий

2.1.1 Основные свойства транспортируемой среды.

Одним из главных направлений использования угля является приготовление водоугольной суспензии как из каменных углей Донбасского региона (ДР), так и из отходов их обогащения.

Следует отметить, что основными характеристиками высококонцентрированных водоугольных сред являются вязкость и напряжение сдвига. Исследователи различают несколько типов напряжения сдвига, в зависимости от его природы: начальное, предельное напряжение сдвига и т.д.

Вязкость ТВУС – сопротивление при течении водоугольной среды, для дисперсных сред выделяют различные типы вязкости (динамическая, структурная, эффективная и т.д.)

Напряжение сдвига – величина касательного напряжения, возникающая при деформации жидкой среды.

Среди спектра параметров влияющих на реологические показатели ВУТ стоит выделить концентрацию твердого компонента C , скорость сдвига $\dot{\gamma}$, зольность исходного материала A^d , фракционный состав (критерий бимодальности Γ), а также выход летучих веществ V^f [84, 156, 204, 205, 242].

Концентрация твердой фазы – массовое (объемное) содержание твердых частиц в единице массы (объема) суспензии.

Скорость сдвига (градиент скорости) – это интенсивность изменения скорости одного слоя потока относительно второго.

Зольность исходного угля – отношение негорючих веществ к общей массе угольной среды, выражается в процентах.

Фракционный состав – характеристика угля, отражающая массовую долю фракций различной величины.

Критерий бимодальности – величина, отражающая отношение мелкодисперсной и крупнодисперсной фракций в водоугольных средах.

Выход летучих веществ – это потеря массы навески твердого топлива за вычетом влаги при его нагревании.

Кроме того, при движении ТВУС по трубам определяют потери напора и рекомендуемую скорость течения для их минимизации, а также сохранения работоспособности системы в целом. Установлено, что величина необходимой скорости течения различна и тесно связана с диаметром трубопровода, при этом значение средней скорости сдвига находится около 20 с^{-1} [203, 298].

Еще одной важной характеристикой ВУТ является седиментационная стабильность [203, 221, 243, 271, 305]. Этот показатель позволяет оценить период сохранения водоугольным топливом реологических свойств в состоянии покоя. Установлено, что изготовление стабильного ВУТ крайне затруднительно и требует совершенства технологии его изготовления, а также неизменности качества исходного сырья. В остальных случаях необходима периодическая гомогенизация водоугольной среды. В случае, если не планируется длительное хранение ТВУС и при условии ее перемешивания в емкостях для хранения, отпадает необходимость в проведении седиментационных исследований.

2.1.2 Реологические модели неньютоновских сред.

Водоугольные суспензии относятся к аномальным по отношению к модели Ньютона жидкостям, характеризующимися своими реологическими свойствами, зависящими от свойств угольных частиц, их крупности и концентрации. Определяется это, прежде всего взаимосвязью напряжения и скорости деформации. При малых концентрациях, не превышающих граничного значения, гидросмеси проявляют свойства ньютоновских

жидкостей; с увеличением концентрации ньютоновские свойства переходят в неньютоновские.

Для правильного определения реологических свойств смесей используют различного вида модели, описывающие движение вязкопластичных жидкостей, реологические параметры которых не зависят от времени.

Для ньютоновских жидкостей с постоянной вязкостью μ напряжение сдвига τ определяется по формуле

$$\tau = \mu \dot{\gamma}, \quad (2.1)$$

где $\dot{\gamma}$ – градиент скорости движения (скорость сдвига), с^{-1} .

Поскольку для внутритрубного течения концентрированных водоугольных суспензий характерным является наличие центрального ядра, в поперечном сечении которого напряжение сдвига распределено от 0 до значения начального τ_0 , физике процесса соответствует практически наряду с законом Ньютона реологическая модель Шведова-Бингама. В ней напряжение сдвига, так же, как и для ньютоновских жидкостей, является функцией градиента скорости движения $\dot{\gamma}(\dot{u})$ и зависят от двух реологических параметров – пластической вязкости η и начального напряжения сдвига τ_0

$$\begin{aligned} \tau &= \eta(\dot{\gamma}) + \tau_0; \\ \dot{\gamma} &= 0 \text{ при } \tau \leq \tau_0. \end{aligned} \quad (2.2)$$

Например, для жидкостей псевдопластичных и дилатантных – модель Оствальда-де-Валлея, наиболее простом с точки зрения структуры, [142] с двумя постоянными параметрами: коэффициентом подвижности k и структурным числом n

$$\tau = k(\dot{\gamma})^n. \quad (2.3)$$

Приведенные виды реологических моделей описывают деформационное состояние жидкостей первого и второго рода [142, 225, 337]. Для жидкостей высшего порядка используются модели с большим числом параметров.

Известны, и в той или иной степени применимы для расчета течения твердожидкостных суспензий следующие реологические модели [14, 20, 123, 142, 264] (кроме приведенных выше по тексту):

модель Прандтля

$$\tau = A \sin^{-1} \left(\frac{\dot{\gamma}}{C} \right); \quad (2.4)$$

модель Эйринга

$$\tau = \frac{\dot{\gamma}}{B} + C \sin \left(\frac{\tau}{A} \right); \quad (2.5)$$

модель Поуэла-Эйринга

$$\tau = \frac{A}{\dot{\gamma}} + B \sin^{-1} \left(\frac{\dot{\gamma}}{C} \right); \quad (2.6)$$

модель Вильямсона

$$\tau = \frac{A}{\dot{\gamma}} (B + \dot{\gamma}) + \eta_{\infty} \dot{\gamma}; \quad (2.7)$$

модель Стейгера-Орьега

$$\dot{\gamma} = A\tau^3 + C\tau; \quad (2.8)$$

модель Брайнта

$$\tau = \eta_{\infty} \dot{\gamma} \left(1 + \frac{\tau_{\infty}}{A\eta_{\infty} \dot{\gamma}} \right)^A; \quad (2.9)$$

модель Ван-Вазера (Гершеля-Баклея)

$$\tau = k (\dot{\gamma})^{n-1} \dot{\gamma} + \tau_0; \quad (2.10)$$

модель Еллиса

$$\dot{\gamma} = \tau \left[\Phi_0 + \Phi_1 \tau^{\frac{1}{n}-1} \right]; \quad (2.11)$$

модель Вокадло

$$\tau = (\tau_0^{1/n} + k\dot{\gamma})^n. \quad (2.12)$$

В приведенных моделях параметры A , B , C , а также τ_0 , η_∞ , τ_∞ действительны только для смесей, для которых получены сами модели, Φ_0 и Φ_1 – функции.

Для анализа реологических моделей и практического использования их необходимо отметить следующее:

- реологические коэффициенты постоянны и не зависят от времени;
- многопараметрические модели могут быть записаны в обобщенном виде при равенстве нулю одной или нескольких реологических характеристик.

Модели Прандтля (2.4) и Стейгера-Орьега (2.8) не приводятся к обобщенному виду, подобному моделям Ньютона, Бингама или Оствальда-де-Валлея и использование этих моделей для описания простого сдвига достаточно сложно.

Модель Поуэлла-Эйринга (2.6), а также Брайнта (2.9) приводятся к обобщенному виду. Модель Брайнта описывает течение буровых жидкостей, которые при высоких скоростях деформации по своим характеристикам приближаются к жидкостям, описываемых моделью Бингама, а при низких скоростях деформации – моделью Оствальда-де-Валлея.

Модель Ван-Вазера (2.10) применяется для описания гидравлического транспортирования по трубопроводам однородных смесей, подобных бетонным смесям или цементным растворам и в случае простого сдвига приводятся к виду, аналогичному модели Оствальда-де-Валлея. В таком виде впервые использовали эту модель Гершель и Баклей (Балкли). Непосредственное использование модели Ван-Вазера при вискозиметрических исследованиях и аппроксимации кривых течения представляет значительные трудности, с точки зрения идентификации значений структурного числа n и коэффициента k – псевдовязкость. Начальное напряжение сдвига τ_0 может быть

измерено непосредственно при помощи вискозиметра, но его нельзя определить из анализа кривых течения. Это вытекает из того, что значение структурного числа n определяется углом наклона кривой течения и не может быть установлено аналитически, так же, как и значение коэффициента k , для определения которого возможен лишь численный метод при дифференцировании функции скорости деформации $\dot{\gamma}$.

Модель Еллиса (2.11) включает в себя модели Ньютона (2.1) и Оствальда-де-Валлея (2.3). Для жидкостей, характеризующихся начальным напряжением сдвига, измеренного на ротационном вискозиметре, Ван-Вазер дал решение уравнения модели Еллиса численным дифференцированием функции угловой скорости деформации.

Из всех приведенных многопараметрических реологических моделей наиболее приемлемой для описания сложных кривых течения вязкопластичных жидкостей является модель Вокадло (2.12), полученная для смеси твердых частиц и воды. Это одна из моделей, для которой известна запись в тензорном виде и, кроме того, она является обобщенной по отношению к моделям Бингама, Оствальда-де-Валлея и Ньютона. Если в формуле для модели Вокадло принять $k=\eta$, а $n=1$, то получаем формулу для модели Бингама; если принять $\tau_0=0$, а $k^n=k$, то получаем формулу для модели Оствальда-де-Валлея, справедливую для, так называемых, «тяжелых жидкостей»; при $\tau_0=0$, $k=\eta$ и $n=1$, получаем формулу для модели Ньютона.

На графиках течения модель Вокадло имеет вид кривой, как в декартовых, так и в логарифмических координатах, в отличие от модели Бингама, для которой кривая течения является прямой в декартовых координатах и кривой – в логарифмических, а также модели Оствальда-де-Валлея (кривая в декартовых и прямая в логарифмических координатах).

Для реологических жидкостей, характеризующихся начальным напряжением сдвига, в зависимости от значений структурного числа n и коэффициента вязкости k кроме модели Шведова-Бингама (2.2) может

использоваться модель Ван-Вазера (2.10), которая приводится к виду, предложенного впервые Гершелем-Баклеем:

$$\tau = \tau_0 + \eta(\dot{\gamma})^n. \quad (2.13)$$

Эта модель при $\tau_0=0$ – переходит в модель Оствальда-де-Валлея, при $n=1$ переходит в модель Шведова-Бингама, и при $\tau_0=0, n=1$ – переходит в модель вязкой жидкости (модель Ньютона).

Таким образом, модель Гершеля-Баклея является обобщенной для многих видов реологических жидкостей, свойства которых не изменяются во времени.

Для описания течения жидкостей, имеющих начальное напряжение сдвига, обычно используется наиболее простая двухпараметрическая модель Шведова-Бингама, устанавливающая взаимосвязь напряжения сдвига и градиента скорости деформации в ламинарной области течения смеси. В применении к концентрированным угольным суспензиям величина начального напряжения сдвига будет зависеть от значения концентрации смеси и при определенных ее значениях может стать равным нулю. В этом случае модель Шведова-Бингама будет переходить в модель Ньютона, то есть суспензия по своим свойствам, в зависимости от значения объемной концентрации твердой фазы, может проявлять свойства ньютоновской или неньютоновской жидкости. Значение концентрации, соответствующее эволюции реологических свойств при переходе из ньютоновского состояния в неньютоновское, является граничной концентрацией.

В настоящее время, кроме рассмотренных выше моделей, для описания механического поведения неньютоновских жидкостей предложены десятки других эмпирических и полуэмпирических моделей. В таблице 2.1. приведены наиболее часто используемые реологические модели псевдопластичных жидкостей, а в таблице 2.2. – наиболее часто применяемые на практике реологические модели для вязкопластичных жидкостей.

Таблица 2.1. – Основные реологические модели псевдопластичных сред для одноосного сдвигового течения [264]

№ п/п	Название модели (закона)	Формула (уравнение)
1	Модель Эллиса	$\tau = \left(A + B \tau ^{\alpha-1} \right)^{-1} \dot{\gamma} (\alpha \geq 1)$
2	Модель Сиско	$\tau = \left(A + B \dot{\gamma} ^{n-1} \right) \dot{\gamma} (n \geq 1)$
3	Модель де Хавена	$\tau = \frac{\mu_s}{1 + C \tau ^n} \dot{\gamma} (n > 0)$
4	Модель Уильямса	$\tau = \left[\frac{A}{B + \dot{\gamma}} + \mu_\infty \right] \dot{\gamma}$
5	Модель Прандтля-Эйринга	$\tau = A \operatorname{arsh} \left(\frac{B}{\dot{\gamma}} \right)$
6	Модель Рейнера-Филиппова	$\tau = \left[\mu_\infty + \frac{\mu_0 - \mu_\infty}{1 + (\tau/A)^2} \right] \dot{\gamma}$
7	Модель Рабиновича	$\tau = \frac{\mu_0}{1 + C\tau^2} \dot{\gamma}$
<p>Обозначения: τ, $\dot{\gamma}$ – напряжение сдвига и скорость сдвига; k, n, α – реологические постоянные; A, B, C – коэффициенты; μ_0, μ_∞ – динамическая вязкость при $\dot{\gamma} \rightarrow 0$ и $\dot{\gamma} \rightarrow \infty$ соответственно</p>		

Таблица 2.2. – Основные реологические модели вязкопластичных сред [264]

№ п/п	Название модели (закона)	Формула (уравнение)
1	Модель Бриана	$\tau = \mu_\infty \dot{\gamma} \left(1 + \frac{\tau_\infty}{\mu_\infty m \dot{\gamma}} \right)$
2	Модель де Кроули-Китца	$\tau = \mu_0 \left(\frac{1,2 + V(\theta_0 \tau^{-1/5} + 1)^3}{1,2 - 2V(\theta_0 \tau^{-1/5} + 1)^3} \right) \dot{\gamma}$
3	Модель Кэссона	$\tau = \left(k_0 + k_1 (\dot{\gamma})^{1/2} \right)^2$
4	Модель Шульмана	$\tau = \left(\tau_0^{1/n} + (\mu_p \dot{\gamma})^{1/m} \right)^{1/n}$
<p>Обозначения: τ_0 – предел текучести; μ_p – коэффициент пластической вязкости; k_0, k_1, n, m, A, θ_0 – реологические постоянные параметры; μ_0, μ_∞ – динамическая вязкость при $\dot{\gamma} \rightarrow 0$ и $\dot{\gamma} \rightarrow \infty$ соответственно; τ_∞ – напряжение сдвига при $\dot{\gamma} \rightarrow \infty$</p>		

Нетрудно видеть, в насколько значительной степени приведенные «модели» не являются физическими законами и к такому подходу с точки зрения физики процесса приходится прибегать авторам данных соотношений. По сути, перечисленные модели являются не более чем параметрическими зависимостями, не обладающими четко выраженным физическим смыслом. Ввиду их многообразия и разнообразности они неизбежно носят недостатки индивидуального подхода; а оригинальность формулировок ставит вопрос о достаточной обоснованности и возможности оценки погрешности результатов реализации указанных моделей.

Для моделирования реологических свойств ТВУС наиболее целесообразным представляется применение наряду с реологическим законом Шведова-Бингама модели Ван-Вазера (Гершеля-Баклея) при достаточной близости n к 1 (или их равенстве).

2.1.3 Причины возникновения и проявления вязкопластических свойств водоугольного топлива.

В идеальных вязкопластичных жидкостях (бингамовских пластиках) наличие вязкопластических свойств обусловлено физико-химическим строением жидкости, когда при наличии градиента концентрации, температуры или количества движения происходит деформация объема, и возникают силы сопротивления сдвигу слоев жидкости. При этом отдельные молекулярные цепи изменяют свою длину и форму. Изменение формы и длины молекулярных цепей не вызывает в начальный момент времени сдвига слоев пластика, что и обуславливает возникновение начального напряжения сдвига τ_0 . В дальнейшем, когда возможности изменения длины и формы отдельных молекулярных цепей будут исчерпаны, наблюдается сдвиг отдельных слоев пластика и начинает действовать закон пластического трения в соответствии с моделью Бингама (2.2). Примером жидкостей, подобных бингамовскому пластику, являются полимеры или их растворы, а также при определенных условиях водоугольные суспензии,

характеризующиеся наличием углеводородной основы и другие жидкости с молекулами с большой массой, как правило, органического происхождения [15].

Различные гидросмеси и водоугольные суспензии состоят из двух отдельных фаз, воды – непрерывной среды (континуум) и твердых частиц (дискретной среды). Каждая из этих фаз, в отдельности взятая, характеризуется своими особыми свойствами. Дискретная твердая фаза характеризуется своими механическими параметрами, гранулометрическим составом, углами естественного откоса и внутреннего трения и другими.

При смешивании жидкой непрерывной и твердой дискретной сред образуется новая непрерывная среда – суспензия, свойства которой будут отличаться от ее составляющих, взятых в отдельности. Каждая частица мелкофракционной твердой фазы в водной среде получает на своей поверхности жидкую оболочку, в результате чего образуется диполь, несущий положительный и отрицательный заряды. Ориентация диполей в объеме смеси определяется взаимодействием их между собой. В результате этого взаимодействия образуется структура, и суспензию можно рассматривать как непрерывную среду [16, 24, 65, 74]. При воздействии на объем такой смеси силы F в начальный момент происходит деформация сольватных оболочек диполей и проявляется начальное напряжение сдвига m , которое в данном случае является следствием упругой деформации. В дальнейшем происходит сдвиг отдельных слоев гидросмеси с проявлением пластической вязкости. Такой механизм проявления вязкопластических свойств характерен для смесей, включающих мелкие и практически однородные частицы.

ТВУС включает частицы мелких классов, но разнородных по размеру и форме. Вследствие этого некоторая часть твердых частиц не будет полностью покрыта сольватной оболочкой или утратит ее. При деформации объема такой суспензии к вязкопластическому трению добавляется чисто механическое трение частиц, утративших или не получивших сольватные оболочки на своей поверхности. Вязкость в таких смесях проявляется в виде суммарного эффекта от пластической вязкости, обусловленной сопротивлением сдвигу отдельных слоев

суспензии и от сопротивления трению твердых частиц, не имеющих сольватных оболочек. Таким образом, возникновение вязкопластических свойств в объеме суспензий обусловлено как физической природой (образование диполей), так и механической (трение). В соответствии с такой моделью проявления вязкопластического трения, возникающие сопротивления можно ассоциировать с некоторой эффективной (кажущейся) вязкостью в соответствии с формулой [108, 145, 184, 193]

$$\mu_{\varepsilon} = \mu_p + k_{cm}, \quad (2.14)$$

где μ_{ε} – эффективная вязкость (вязкость от суммарного эффекта), k_{cm} – коэффициент структуры.

Следовательно, значение коэффициента вязкости зависит от величины структурной вязкости, которая будет связана с эффективной вязкостью соотношением

$$k_p = \frac{\mu_{\varepsilon}}{\mu_{cm}}, \quad (2.15)$$

где k_p – коэффициент пластической вязкости.

Каждая из составляющих эффективной вязкости определяется собственным углом сдвига (рис. 2.1).

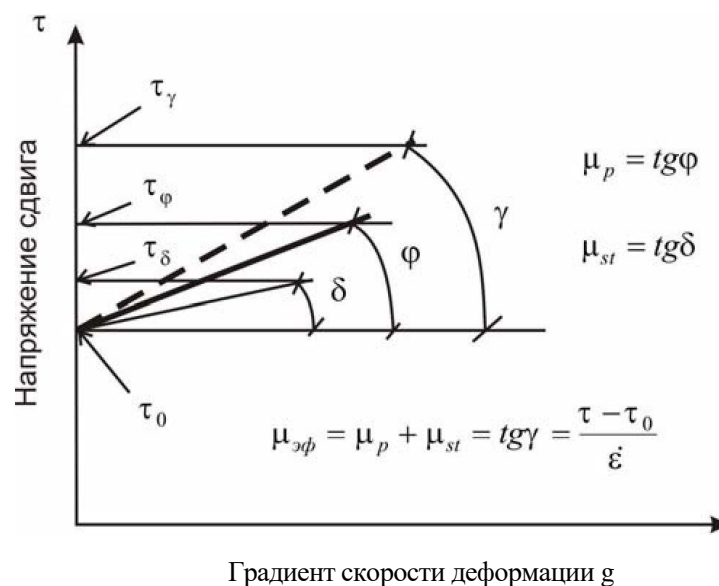


Рисунок 2.1 – Зависимость напряжения сдвига и вязкости от градиента скорости деформации для бимодальных суспензий

В связи с аномальным, по отношению к модели Бингама, проявлением пластических свойств такие смеси можно отнести к классу бингамовских псевдопластиков.

Следует заметить, что значение эффективной вязкости зависит от концентрации твердых частиц [43]. При незначительных концентрациях, когда начальное напряжение сдвига пренебрежимо мало, структурная вязкость будет равна эффективной, которая в этом случае является ньютоновской вязкостью несущей жидкости. С ростом концентрации твердых частиц возрастает значение ньютоновской вязкости, и при некотором предельном значении концентрации в объеме гидросмеси начинают проявляться структурные свойства, возникает структурная вязкость и начальное напряжение сдвига. Примерный вид графика изменения вязкости смесей от концентрации приведен на рисунке 2.2.

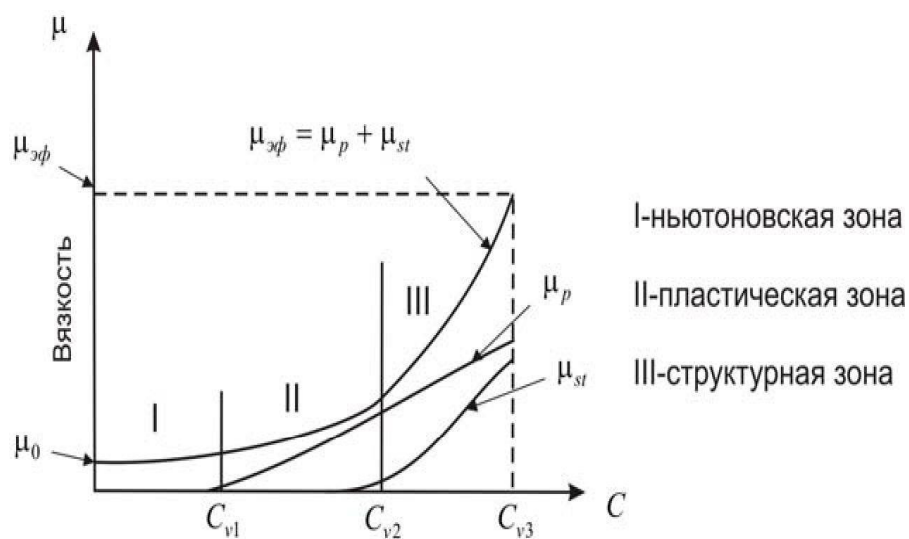


Рисунок 2.2 – Зависимость составляющей эффективной вязкости от концентрации угольных частиц

Соотношение пластической и структурной вязкости определяется из формул (2.14) и (2.15), откуда получим [249]

$$\mu_p = \mu_{cm} \frac{k_p}{k_{cm}}. \quad (2.16)$$

Эффективная вязкость выражает собой среднее значение вязкости и является функцией средней концентрации твердых частиц по сечению потока суспензии. Структурная вязкость проявляется при пластической деформации объема суспензии на границе ядра течения, постоянна по своей величине и имеет наибольшее значение. Эффект пластической вязкости возникает при деформации слоев суспензии и по своей величине зависит от структурной вязкости. Из формул

(2.14) – (2.16) следует, что $k_{cm} > 1$, а $k_p < 1$. Если $\frac{k_p}{k_{cm}} = 1$, то $\mu_p = \mu_{st}$ и, следовательно,

$\mu_s = \mu_p$, то есть в этом случае суспензия представляет собой чистую жидкость [194, 243, 274]. Значение коэффициента структуры, так же, как и значения, составляющих эффективной вязкости, определяется концентрацией угольных или других органических частиц, то есть $k_{cm} = f(C)$.

С учетом особенностей проявления вязкопластичных свойств высококонцентрированными мелкофракционными суспензиями, рассмотренными выше, модель Бингама для них может быть записана как:

$$\tau = \tau_0 + \mu_p k_{cm} \frac{du}{dy} \quad (2.17)$$

или через структурную вязкость

$$\tau = \tau_0 + \mu_{cm} \frac{k_p}{k_{cm}} \frac{du}{dy}. \quad (2.18)$$

Модель (2.17) и (2.18) отличается от модели Бингама-Шведова тем, что эффективная вязкость учитывает как структурные, так и пластические свойства деформируемого объема текучей среды (суспензии).

2.2. Современные способы моделирования реологических свойств дисперсных сред

Одним из недостатков при создании математических моделей является наличие массы громоздких формул, что значительно затрудняет процессы интегрирования, преобразования и, в последствии, расчетов.

В работе [264] сделана попытка уточнения реологической модели состояния неньютоновских жидкостей, в которых вязкость рассматривается как функция напряжения сдвига. Именно к такому классу жидкостей относится водоугольное топливо, которое в зависимости от свойств, концентрации и размера фракций твердого компонента может проявлять свойства бингамовского пластика, псевдопластика и даже тиксотропной жидкости.

Указанные ранее реологические модели часто не отвечают свойствам, которые наблюдаются в практике приготовления, транспортирования и хранения водоугольного топлива. Например, в динамике с большими скоростями деформации наблюдается отклонение измеряемых величин от расчетных параметров.

Свойства упругих тел и вязких жидкостей значительно отличаются друг от друга при деформировании. Упругие тела после снятия приложенных нагрузок возвращаются к своему первоначальному состоянию. В отличие от них вязкие несжимаемые жидкости не имеют тенденции возвращать свое исходное состояние после снятия нагрузки. Кроме того, напряжения в упругом теле связаны непосредственно с деформациями, а напряжения в жидкости зависят от скорости деформации.

По аналогии с линейной вязкоупругостью, рассмотрим угловую сдвиговую вязкоупругость. Для одномерной задачи используются основные механические модели, демонстрирующие поведение различных вязкоупругих материалов. Эти модели состоят из следующих элементов: упругий деформируемый элемент с нулевой массой и модулем упругости G , упругий деформируемый слой, вязкий элемент – сдвиг двух слоев друг относительно друга с вязкостью μ .

Из практики известно, что в упругих телах при длительном времени нахождения под нагрузкой начинаются процессы релаксации напряжения.

Используем для моделирования свойств ТВУС модели Максвелла и Кельвина, которые сочетают в себе упругие и вязкие сдвиговые элементы [144, 190, 264].

В модели Максвелла суммарный сдвиг складывается из сдвига упругого верхнего слоя и вязкого нижнего слоя, аналогичная ситуация и со скоростями сдвига. Модель Максвелла принимает вид

$$\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_1 + \dot{\gamma}_2 = \frac{\dot{\tau}}{G} + \frac{\tau}{\mu}. \quad (2.19)$$

В модели Кельвина деформация одинакова для обоих элементов, а напряжение есть сумма сопротивлений каждого элемента

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 = G\gamma + \mu\dot{\gamma}. \quad (2.20)$$

Обе модели являются определяющими для вязкоупругих свойств тела, однако их поведение и математическая формулировка отличаются. Так, в модели Максвелла при приложении силы сначала деформируется упругий элемент, затем происходит его релаксация и напряжение снимается. В модели же Кельвина при деформации возникает напряжение в обоих элементах, а по завершению деформации напряжение уменьшается, но остается. При снятии напряжения модель возвращается в исходное состояние. Скорость возврата в исходное состояние определяется соотношением сил вязкости и упругости.

Запишем модели Максвелла (2.19) и Кельвина (2.20) в операторной форме, используя линейный оператор дифференцирования по времени $\partial_t = \frac{\partial}{\partial t}$ [190].

Модель Максвелла:

$$\left(\frac{\partial_t}{G} + \frac{1}{\mu} \right) = (\partial_t)\gamma. \quad (2.21)$$

Модель Кельвина:

$$\tau = (G + \partial_t \mu) \gamma. \quad (2.22)$$

Данные простые модели не дают полного описания реальных сред, усложненные модели обладают большей гибкостью при отражении происходящих процессов. Последовательное соединение элементов этих моделей состоит в том, что основной определяемый реологический параметр τ является общим, а элементы деформаций и их производные складываются, что позволяет обобщить напряжения и деформации в жидкости. Однако, модель в этом случае будет содержать только 2 параметра.

Запишем уравнение для трехпараметрической модели вязкой жидкости используя модели Максвеллы (2.21) и Кельвина (2.22). В данном случае элементы 2 и 3 соединены параллельно

$$\tau_{23} = (G + \partial_t \mu) \gamma_{23} = (A_{23}^0 D^0 + A_{23}^1 D^1) \gamma_{23}, \quad (2.23)$$

где $D^0=1$ и D^1 – операторы дифференцирования по времени соответственно 0-й и 1-й степени; A_{23}^0 и A_{23}^1 – действительные коэффициенты.

Из последней формулы следует, что для определения величины сдвиговой деформации γ_{23} формула примет вид [190]

$$\gamma_{23} = \frac{\tau_{23}}{(A_{23}^0 D^0 + A_{23}^1 D^1)}. \quad (2.24)$$

Согласно трехпараметрической модели вязкой жидкости элемент 1 и соединенные модели 2 и 3 находятся в последовательном соединении, соответственно общим является напряжение τ_{123} , а деформации и их производные складываются. С учетом закона Гука и выражения для определения величины сдвиговой деформации можно записать

$$\gamma_{123} = \gamma_1 + \gamma_{23} = \frac{\tau_{123}}{(A_1^0 D^0)} + \frac{\tau_{123}}{(A_{23}^0 D^0 + A_{23}^1 D^1)}$$

откуда получим

$$(A_1^0 D^0 + A_{23}^0 D^0 + A_{23}^1 D^1) \tau_{123} = (A_1^0 A_{23}^0 D^0 + A_1^0 A_{23}^1 D^1) \gamma_{123} \quad (2.25)$$

или, упрощая запись

$$(p_0 D^0 + p_1 D^1) \tau_{123} = (q_0 D^0 + q_1 D^1) \gamma_{123}. \quad (2.26)$$

Данная формула отражает характер изменения напряжения твердого тела при динамической деформации. Наличие нулевых производных напряжения сдвига и величины сдвиговой деформации соответствует статическому напряженному состоянию твердого тела.

Для многопараметрических моделей, к которым относится модель реологически сложной среды (водоугольное топливо), можно принять предложенную реологическую модель, выполнив замену линейного вязкоупругого элемента на сдвиговой элемент.

Запишем линейное дифференциальное уравнение

$$p_0 \tau + p_1 \dot{\tau} + p_2 \ddot{\tau} + \dots = q_0 \gamma + q_1 \dot{\gamma} + q_2 \ddot{\gamma} + \dots, \quad (2.27)$$

или в более компактной форме

$$\sum_{i=0}^m p_i \frac{\partial^i \tau}{\partial t^i} = \sum_{i=0}^n q_i \frac{\partial^i \gamma}{\partial t^i}. \quad (2.28)$$

Рассмотрим вариант, когда скорость течения постоянна во времени (стационарный режим движения). Тогда уравнение для многопараметрической модели запишется в виде

$$p_0 \tau + p_1 \dot{\tau} = q_0 \gamma + q_1 \dot{\gamma} + q_2 \ddot{\gamma}. \quad (2.29)$$

Ограничимся тремя параметрами и запишем полученное уравнение в комплексной форме с использованием модели Рейнера-Филиппова (см. табл. 2.1). Спроектируем вектора напряжений и деформаций на оси координат, при этом необходимо учесть, что окружности Мора одинаково применимы для твердых тел и вязкоупругих жидкостей [70, 264]. Из вышесказанного следует, что реологическая модель может быть записана в виде

$$W = \frac{(az + b)}{(z + c)}, \quad (2.30)$$

где $z=s+it$, $W=e+ig$ – комплексные числа; s , t и e , g – нормальные и сдвиговые компоненты напряжений и деформаций соответственно.

Упругие свойства ТВУС могут быть представлены выражением [209]

$$s = \frac{ce - b}{e_m + e}, \quad (2.31)$$

где e_m – сдвиговый компонент на границе области упругости.

Выполним аппроксимацию выражения (2.31)

$$s = s_m + E(e - e^*), \quad (2.32)$$

где e^* – значение параметра, соответствующего границе между областями упругости и пластичности.

Введем параметр e_0 , границу области пластичности. Тогда, используя зависимости (2.31) и (2.32), находим параметры реологической модели, определив интервалы значений пластической, упругой и граничной деформаций

$$\begin{aligned} X e_1 &= e^* - e_0, \\ X e_2 &= e_m - e^*, \\ X e &= e_m - e_0, \end{aligned}$$

Тогда в области (e_0, e^*) запишем выражение для компонента нормальных деформаций

$$s = c \cdot \frac{e - e_0}{e_m - e}. \quad (2.33)$$

Используя выражение (2.33) и подставляя в формулу (2.30) соответствующие комплексные числа $W=e+ig$ и $z=s+it$, получим окончательное и наиболее общее выражение реологической модели [209, 264]

$$e + ig = \frac{\left[(e_m s + c e_0)(s + c) + e_m t^2 + ict(e_m - e_0) \right]}{(s + c)^2 + t^2}. \quad (2.34)$$

Таким образом, из полученных соотношений можно определить напряжение сдвига, скорость сдвига и вязкость водоугольного топлива независимо от того, к какому типу жидкостей относится исследуемая система.

Иной подход к составлению реологических моделей дисперсных сред заключается в регуляризации классических выражений (например, вязкопластической среды) [262].

Основная сложность при использовании модели с эффективной вязкостью для расчета течений вязкопластической среды, связана с бесконечно большим значением вязкости в областях, где скорость деформации равна нулю. Для вязкопластических жидкостей с предельным напряжением τ_0 в области течения $\tau < \tau_0$ (область твердого тела) скорость сдвига стремится к нулю, из-за этого эффективная вязкость жидкости неограниченно возрастает. Для того чтобы преодолеть данную трудность, используют различные схемы регуляризации исходных реологических моделей. Простейшая из них состоит в искусственном ограничении эффективной вязкости жидкости в области «твердотельного» течения $\tau < \tau_0$ некоторой максимально возможной величиной μ_{\max} . Однако, точность получающегося алгоритма в общем случае существенно зависит от выбора μ_{\max} . Заниженное значение μ_{\max} приводит к искусственному уменьшению области канала, занятой твердым телом. С другой стороны, выбор заведомо завышенного значения μ_{\max} существенно снижает скорость сходимости задачи.

Подобрать универсальное значение и для всех рассматриваемых задач не удастся. По этой причине данный метод при создании универсального алгоритма неприемлем.

Второй подход заключается в аппроксимации выражения для эффективной вязкости некоторым сглаженным выражением с некоторым малым параметром регуляризации ε . Наиболее простая алгебраическая модель для жидкости Бингама может быть построена следующим образом [131, 209]:

$$\mu_s = k_v + \tau_0 \frac{1}{\dot{\gamma} + \varepsilon}, \quad (2.35)$$

где k_v – молекулярная вязкость среды.

Две наиболее популярные и используемые на практике модели регуляризации формулируются следующим образом (для жидкости Гершеля-Баклея (Балкли) $\mu_s = (\tau_0 + k_v \dot{\gamma}^n) \dot{\gamma}^{-1}$):

модель Берковьера-Энгельмана [209, 324]

$$\mu_s = \frac{1}{\dot{\gamma}} \left[\tau_0 \frac{\dot{\gamma}}{(\dot{\gamma}^2 + \varepsilon^2)^{1/2}} + k_v \dot{\gamma}^n \right]. \quad (2.36)$$

и модель, предложенная Папанастасио [209, 324]

$$\mu_s = \frac{1}{\dot{\gamma}} \left[\tau_0 \left(1 - \exp\left(-\frac{\dot{\gamma}}{\varepsilon}\right) \right) + k_v \dot{\gamma}^n \right]. \quad (2.37)$$

При стремлении параметра регуляризации ε к нулю формулы регуляризации дают исходную модель.

Конечно, подход с введением гладких регуляризованных моделей также имеет свои проблемы. Среди главных можно отметить трудность определения границ жестких зон в потоке и плохую обусловленность матриц дискретизированных систем. Последнее при больших параметрах регуляризации удается преодолеть путем построения подходящих предобуславливателей [70]. Вместе с тем, метод регуляризации отличается простотой в реализации и его достаточно успешно можно применять при решении практических задач.

В работе [131] исследовались представленные выше способы регуляризации для жидкости Бингама. Для различных типов способа регуляризации на ряде тестовых задач теоретически и численно оценивались ошибки регуляризации. Количественно и качественно сравнивались точные решения с регуляризованными. Установлено, что методы регуляризации дают большую ошибку в задачах анализа гидродинамической устойчивости. Также показано, что наилучший результат и лучшее приближение к точному решению для всех рассмотренных в работе течений показывает модель Папанастасио.

Аппроксимирующее гладкое выражение для эффективной вязкости на случай течения жидкости Гершеля-Балкли вводится как:

$$\mu_s = \frac{\left[k_v \dot{\gamma}^n + \tau_0 \left(1 - \exp(-m\dot{\gamma}/\dot{\Gamma}) \right) \right]}{\dot{\gamma}}, \quad (2.38)$$

где $\dot{\Gamma}$ – характерная скорость сдвига.

При стремлении скорости деформации к нулю выражение (2.38) позволяет ограничить эффективную вязкость. Экспоненциальный множитель m должен быть достаточно большим (в большинстве работ его значение колеблется от 100 до 3000).

Альтернативой методу регуляризации эффективного коэффициента вязкости могут служить вариационные методы. Численные методы на основе вариационных неравенств требуют, однако, введения дополнительных итерационных шагов (для реализации неявной связи полей вязких напряжений и скоростей деформации) и особой аккуратности при дискретизации дифференциальных уравнений [144]. Реализация использованного нами метода регуляризации на практике значительно проще и пригодна для выполнения массовых расчетов [145].

2.3 Исследование реологических свойств ТВУС

Исходя из вязкостных характеристик, ТВУС обычно относят к неньютоновским средам, в которых вязкость уже не является величиной, зависящей только от температуры и других классических фактором влияния, но становится также и функцией градиента скорости.

Экспериментальные исследования показали, что даже незначительное изменение свойств композиционных составляющих ТВУС и их соотношений может полностью изменить реологическую картину, вплоть до изменения режима течения. В этой связи, практически единственным в настоящее время путём исследования реологических свойств ТВУС является сочетание экспериментальных и теоретических методов, что даёт возможность определить потери напора в натуральных условиях.

2.3.1 Анализ факторов влияющих на реологию ТВУС.

Значительное влияние на характер и свойства течения ТВУС оказывают его реологические характеристики [8, 25, 58, 232, 255, 264, 275]. Этими показателями являются напряжение сдвига и эффективная вязкость, которые определяются экспериментальным путем на вискозиметрах. Кроме того, в зависимости от реологической модели в качестве параметров неньютоновского поведения могут быть использованы начальное напряжение сдвига и структурная вязкость (реологическая модель Шведова-Бингама), которые являются производными от первых двух показателей и определяются аппроксимацией экспериментальных точек (Таблица 2.3) [139, 203].

Таблица 2.3 – значения начального напряжения сдвига и структурной вязкости для различных типов углей

Примечание	C, %	τ_0 , Па	η , Па·с
Антрацитовые шламы	62,0	10,91	0,195
	64,0	20,37	0,431
	66,0	25,33	0,710
Обогащенный антрацит	65,7	1,04	0,618
	68,7	2,36	0,929
	70,0	19,40	0,890
Угли марки Д	–	21,93	0,646
Угли марки Г	–	16,49	0,578
Угли марки Ж	–	9,71	0,441
Угли марки К	–	6,28	0,386
Угли марки ОС	–	1,10	0,356
Угли марки Т	–	0,75	0,308
Угли марки ПА	–	0,10	0,285
Угли марки А	–	0,57	0,250
Угли марки Ж	63,7	6,61	0,458
Угли марки Д	62,0	4,46	0,398
Угли марки Г	62,0	1,91	0,329

Установлено, что рекомендуемые значения напряжения сдвига и эффективной вязкости не должны превышать значений 10,8 Па и 1,2-1,4 Па·с при скорости сдвига транспортируемой среды 9 с^{-1} .

Следует отметить, что для полноценного моделирования поведения концентрированной водоугольной суспензии необходимо расширить интервал варьирования реологических параметров до значений 20 Па и 2,1-2,3 Па·с, с соответствующим расширением диапазонов начального напряжения сдвига и структурной вязкости с 1 до 20 Па и с 0,2 до 1 Па·с соответственно.

Под бимодальностью измельченного твердого компонента ТВУС (и в целом – суспензии) понимают зависимость параметров нормального распределения его фракционного состава от величин соответствующей совокупности частиц каждой отдельной фракции, поэтому, при нанесении на вероятностную шкалу (квантиль) отдельные фракции изображаются отдельными отрезками прямых, характеризованных средневесовым диаметром x_0 и углом наклона β , что является аналогами классических параметров, математического ожидания и, соответственно, среднеквадратического отклонения. Между тем, другие вещества, например, меленая кварцевая пыль являются мономодальными и не проявляют даже тенденции к бимодальности [196, 214, 231, 256].

Анализ проведенных исследований позволяет утверждать, что выполнение гранулометрического состава бимодальным, способствует снижению вязкости суспензии.

В работах [8, 211, 291, 342] предложено задать критерий, характеризующий бимодальность гранулометрического состава ТВУС. При этом установлено, что наиболее важными факторами, влияющими на эффективность гидротранспортирования водоугольного топлива, являются концентрация твердой компоненты (С) и параметры, характеризующие бимодальность гранулометрического состава твердой фазы ТВУС, в качестве которых предложено Γ_1 и Γ_2 . Параметры Γ_1 и Γ_2 полностью определяют бимодальность произвольного гранулометрического состава, учитывая удельное количество как крупной и мелкой, так и промежуточной фракции X_{II} .

$$\Gamma_1 = \frac{P_1}{P_2}, \quad \Gamma_2 = \frac{P_3}{P_2}, \quad (2.39)$$

где P_1 – массовая доля частиц мелкой фракции, %; P_2 – массовая доля частиц промежуточной фракции, %; P_3 – массовая доля частиц большой фракции, %.

Это позволяет в полной мере определить бимодальность гранулометрического состава. Параметр Γ_1 выражает отношение мелкой фракции угля к его промежуточной фракции по массе и по диаметру частиц, и параметр Γ_2 , который выражает отношение крупной фракции к промежуточной соответственно. Использование данных параметров позволяет наиболее точно оценить влияние гранулометрического состава твердого компонента ТВУС на его реологические и гидродинамические характеристики.

Следует отметить, что параметры Γ_1 и Γ_2 полностью определяют как бимодальность, так и фракционное соотношение мелких, крупных и промежуточных частиц произвольного гранулометрического состава. Учитывая соотношение параметров критерия бимодальности относительного количества как крупной и мелкой, так и промежуточной фракции (1), вычисляя далее, получаем:

$$P_2 = 1 - P_1 - P_3; P_2 = 1 - P_2(\Gamma_1 + \Gamma_2)$$

и, наконец,

$$P_2 = \frac{1}{1 + \Gamma_1 + \Gamma_2}. \quad (2.40)$$

Такой подход позволяет получать строго сопоставимые результаты по сопротивлению для различных вариантов бимодального состава ТВУС. Это дает возможность отследить влияние Γ_1 , Γ_2 при различных C на реологические и гидравлические параметры ТВУС, то есть в результате анализа определить оптимальные по сопротивлению значения параметров бимодальности.

Установлено, что минимальное значение величины гидравлического сопротивления наблюдается при величине критерия бимодальности Γ_2 / Γ_1

1,8–2,0. При этом следует производить численное моделирование при его значениях от 1,0 до 3,0.

Концентрация твердого материала значительно влияет на поведение ТВУС как при движении по трубопроводу, так и при нахождении в состоянии покоя [8, 212]. Следует отметить, что реальная концентрация твердой фазы в значительной степени зависит от удельной плотности угля и его фактической плотности.

Для уточнения значения ρ_0 предложена зависимость, позволяющая определить плотность увлажненного твердого компонента в составе водоугольного топлива с учетом удельной плотности угля, его пористости и плотности воды [8, 42]:

$$\rho_{\text{уг}} = \rho_{\text{уг сух}} + m\rho_{\text{вод}}, \quad (2.41)$$

где $\rho_{\text{вод}}$ – плотность воды, $\rho_{\text{уг сух}}$ – удельная плотность исходного угля по паспортным данным, кг/м³; m – пористость угля или доля его объема, которую занимают поры.

Величина m в данном случае – отношение объема полостей к объему угля $V_{\text{уг}}$. При этом общепринятая массовая концентрация угля в ТВУС (например, $C=65\%$) – это формальная концентрация, которая является отношением массы исходного угля к массе смеси, при которой по формальному расчету должна происходить упаковка частиц в смеси. Между тем, объем полостей в угле в процессе приготовления ТВУС заполняется водой.

Реальную массовую концентрацию угля в ТВУС в случае его увлажнения целесообразно обсчитывать соответственно выражению (2.41):

$$C_{\text{уг}} = C_{\text{уг}} \frac{\rho_{\text{уг сух}} (\rho_{\text{уг сух}} + m\rho_{\text{вод}})}{\rho \cdot \rho_{\text{уг сух}}},$$

где $C_{\text{уг}}$ – концентрация исходного угля по паспортным данным; ρ – плотность суспензии, кг/м³.

Для технических расчетов

$$C_{\text{уг}} = C_{\text{уг}} \frac{\rho_{\text{угсух}} + m\rho_{\text{вод}}}{\rho_{\text{угсух}}}.$$

Зависимость для определения плотности ТВУС имеет вид:

$$\rho_{\text{ВУС}} = \frac{M_{\text{ВУС}}}{V_{\text{ВУС}}} = \frac{M_{\text{вод}} + M_{\text{уг}}}{V_{\text{ВУС}}},$$

где $M_{\text{ВУС}}$ – масса ТВУС, кг; $V_{\text{ВУС}}$ – объем ТВУС, м³; $M_{\text{вод}}$ – масса воды, кг; $M_{\text{уг}}$ – масса угля, кг.

Поэтому для объема ТВУС 1м³ его массу, а также и плотность найдем со следующего выражения

$$M_1 = \rho_{\text{уг}} V_{\text{уг1}} + \rho_{\text{вод}} (1 - V_{\text{уг1}}) = \rho_{\text{ВУС}}, \quad (2.42)$$

где $V_{\text{уг1}}$ – объем угля, который он занимает в 1м³ ТВУС.

Продолжая вычисление, имеем выражение для концентрации угля в ТВУС

$$C_{\text{уг}} = \frac{\rho_{\text{уг}} V_{\text{уг1}}}{\rho_{\text{уг}} V_{\text{уг1}} + \rho_{\text{вод}} (1 - V_{\text{уг1}})}.$$

Решая далее полученное уравнение относительно $V_{\text{уг1}}$, в итоге получим:

$$V_{\text{уг1}} = \frac{C_{\text{уг}} \rho_{\text{вод}}}{\rho_{\text{уг}} + C_{\text{уг}} \rho_{\text{вод}} - C_{\text{уг}} \rho_{\text{ВУС}}}.$$

Подставляя это выражение в формулу (2.42), получим окончательно зависимость для определения массовой плотности ТВУС, которая выглядит как [8, 83]:

$$\rho_{\text{ВУС}} = \frac{\rho_{\text{уг}} \rho_{\text{вод}}}{\rho_{\text{уг}} + C_{\text{уг}} \rho_{\text{вод}} - C_{\text{уг}} \rho_{\text{уг}}}, \quad (2.43)$$

где $\rho_{\text{уг}}$ – плотность угля согласно выражению (2.41).

Для известной или заданной плотности ТВУС из полученной формулы для ρ получаем расчетную концентрацию угля

$$C_{\text{уг}} = \frac{\rho_{\text{уг}}\rho - \rho_{\text{уг}}\rho_{\text{вод}}}{\rho_{\text{уг}} - \rho_{\text{вод}}}.$$

Для определения действительной (фактической) объемной концентрации воды $C_{V\text{вод}}$ найдем ее фактический объем в 1 м^3 смеси

$$V_{\text{г вод}} = C_{\text{г вод}} - mC_{\text{уг}},$$

где $C_{\text{г вод}}$ – действительная (фактическая) массовая концентрация воды, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Действительный объем смеси при этом составит $1 - mC_{\text{уг}}$, отсюда

$$C_{V\text{вод}} = \frac{C_{\text{г вод}} - mC_{\text{уг}}}{1 - mC_{\text{уг}}}.$$

Таким образом, действительная объёмная концентрация угля в ТВУС составляет

$$C_{V\text{уг}} = 1 - C_{V\text{вод}} = 1 - \frac{C_{\text{г вод}} - mC_{\text{уг}}}{1 - mC_{\text{уг}}} = \frac{1 - C_{\text{г вод}}}{1 - mC_{\text{уг}}}.$$

На основании представленных зависимостей в качестве диапазона концентраций твердого компонента следует принимать значения 62-67%.

Зольность угля является одним из основных показателей качества твердого топлива. Она выражается в процентном содержании золы от общей массы угля, образующейся после его полного сгорания. Этот показатель зависит от концентрации минеральных примесей угля и фактически демонстрирует степень его минерализации. Величина зольности зависит от многих факторов, в том числе от марки угля и степени его обогащения, при этом максимальная ее величина ограничивается способностью топлива поддерживать горение. В работах [23, 42, 58, 202] в качестве верхней границы содержания золы в исходном угле указывается значение 35%, в связи с чем, в

качестве диапазона варьирования это параметра следует принимать значения от 15 до 35%.

Выход летучих веществ является еще одной характеристикой ископаемых углей и показывает, сколько летучих веществ выделится из угля при его сгорании. Значение этого параметра зависит от степени метаморфизма угля, и составляет порядка 5% для антрацитов и 45% для углей марок Г и Д [29, 55, 92]. Эти значения и являются границами диапазона изменения выхода летучих веществ при численном моделировании течения ТВУС.

В ходе проведения исследований установлено, что средние скорости транспортирования ТВУС нормированы. При этом немаловажным показателем для течения неньютоновских жидкостей является скорость сдвига [130, 151, 165].

Скорость деформации окружения характеризуется скоростью относительного движения слоев, которые взаимно перемещаются. На практике чаще пользуются средней скоростью сдвига, рассчитанной по формуле [92, 204]

$$\dot{\gamma} = \frac{32Q}{\pi D^3} = \frac{8u_{cp}}{D}, \quad (2.44)$$

где u_{cp} – средняя скорость течения жидкости, м/с; D – диаметр трубопровода, м; Q – расход гидросмеси, м³/с.

Установлено, что реальные средние скорости сдвига находятся в диапазоне от 8 с^{-1} до 20 с^{-1} , а для математического моделирования следует принимать диапазон значений от $1,8 \text{ с}^{-1}$ до 27 с^{-1} .

В ходе исследования установлено, что в качестве основных параметров ТВУС выступают: реологические характеристики (напряжение сдвига, начальное напряжение сдвига, структурная и эффективная вязкость), концентрация твердой фазы, зольность исходного угля, выход летучих веществ, критерий бимодальности и скорость сдвига.

Установлено, что в качестве базовых реологических величин выступают напряжение сдвига и эффективная вязкость (определяются экспериментально на вискозиметре) их значение при скорости сдвига 9 с^{-1} не должно превышать величин 10,8 Па и 1,2-1,4 Па·с соответственно. Начальное напряжение сдвига и структурную вязкость следует принимать в диапазоне от 1 до 20 Па и от 0,2 до 1 Па·с соответственно.

Концентрация твердой фазы должна обеспечивать максимальную упаковку частиц угля и при этом позволять суспензии перемещаться по трубопроводу с минимальным сопротивлением. Этим критериям, с учетом влияния пористости угля, соответствует диапазон массовых концентраций от 62 до 67%.

Рациональная величина зольности исходного топлива не должна превышать 35%, что связано с обеспечением горючести ТВУС.

Выход летучих веществ в значительной степени влияет на основные свойства водоугольной суспензии, диапазон варьирования для этого параметра составляет от 5 до 45%, в зависимости от типа угля.

Критерий бимодальности определяет соответствие гранулометрического состава твердой фазы суспензии отношению объемов содержания мелкой и крупной фракции, диапазон его изменения следует принимать от 1 до 3.

Реализуемая в технологических трубопроводных системах скорость сдвига тесно связаны с используемыми диаметрами трубопроводов и рекомендованными скоростями транспортирования ТВУС по ним. Для исследований поведения концентрированных водоугольных суспензий с учетом сложного характера их поведения при значениях скорости сдвига менее 9 с^{-1} , диапазон изменения этого параметра следует принимать от $1,8 \text{ с}^{-1}$ до 27 с^{-1} .

2.3.2 Исследование влияния пластифицирующих добавок.

Наличие шламонакопителей, внешних отстойников и гидроотвалов приводят к загрязнению земли, воды и атмосферы. Тысячи тонн угольных шламов, хранящиеся в этих сооружениях, исключены их производственного цикла, хотя могли бы быть использованы для вторичной переработки с получением продуктовых угольных продуктов – брикетов, пеллетов и водоугольного топлива.

Таким образом, решение этой задачи позволяет с одной стороны, выполнить экологические мероприятия (ликвидировав шламонакопители и гидрооткачивающие станции), а с другой – значительно увеличить выход товарного угля и получить чистую оборотную воду [7, 9, 346, 347].

При этом полученное топливо должно соответствовать всем требованиям современного рынка: стабильность основных технологических свойств, задаваемых потребителем, рентабельная производственная деятельность и минимально возможное негативное экологическое влияние на окружающую среду при его получении и применении. В связи с этим, становится актуальным использование шламов в виде водоугольных суспензий (ТВУС), разработка эффективных процессов получения и применения которых должна базироваться на научно-обоснованных процессах физического и физико-химического воздействия на исходный уголь с учетом свойств его органической и минеральной составляющих.

Для улучшения свойств ТВУС (стабильность, текучесть), наряду с оптимизацией гранулометрического состава, концентрации и т.д., зачастую используют различные пластифицирующие вещества, которые оказывают влияние на коэффициент поверхностного натяжения. В связи с чем, исследование их влияния на реологические свойства ВУТ является актуальным.

Технологические свойства ТВУС в основном обусловлены явлениями, протекающими на поверхности раздела фаз – «уголь – вода (водные растворы пластификаторов)». Межфазная поверхность является источником силового

взаимодействия вследствие отсутствия равновесия сил молекулярного взаимодействия в поверхностном слое. Величина поверхностного натяжения (σ , Н/м²) определяет степень напряженности силового поля и выступает избытком удельной поверхностной энергии [78, 87, 122].

Следует отметить, что усложнение решения задачи обеспечения высокой устойчивости и текучести ТВУС в широком диапазоне напряжений сдвига, давлений, температур (0–50°C), заключается в необходимости обеспечения длительного времени хранения (не менее месяца). Кроме того, усиление определенных реологических свойств дисперсной среды приводит к снижению других. Для нахождения оптимального решения, необходимо учитывать тонкий механизм воздействия на свойства межфазных взаимодействий. Одним из способов изменения их свойств является использование веществ, влияющих на величину поверхностного натяжения (поверхностно-активных веществ (ПАВ)).

Одним из этапов процесса приготовления ТВУС, являются помол угля и перемешивание его с водой и диспергирующими добавками. Весь комплекс мер и их взаимосвязь оказывают воздействие на итоговый результат. Однако и количество, и тип диспергирующей добавки, и способ ее введения оказывает влияние на итоговые свойства ТВУС [149]. Более эффективным является добавление пластификатора в процессе мокрого помола. Благодаря этому уже на стадии измельчения происходит равномерное распределение реагента между частицами и обеспечивается наиболее полное обволакивание поверхности угольных частиц. В некоторых случаях осуществляется введение поверхностно-активного вещества и после помола угольной массы. В [241] ввод пластификаторов рекомендуется производить в несколько этапов на различных стадиях дробления, за счет чего достигается снижение расхода пластификатора при обеспечении оптимальных характеристик ТВУС.

Анализ исследований [9, 78, 122, 201, 204] позволил установить, что стабилизация суспензий обуславливается силами поверхностного натяжения, которые возникают в тонких оболочках, окружающих угольные частицы. Роль

диспергирующих веществ, которые придают стабильность суспензии, заключается в том, что они образуют пленки на поверхности частиц, которые уменьшают силы молекулярного взаимодействия и препятствуют их непосредственному сближению и коагуляции. До недавнего времени в качестве стабилизаторов использовались различные смолы и мыльные растворы; в настоящее время широко применяются сложные химические реагенты, которые представляют собой ПАВ [20, 65, 123, 156].

Значительный объем исследований осуществлен над диспергирующими агентами, представляющими собой формальдегидный конденсат сульфонатнафтоновых соединений. В совокупности с солями щелочно-земельных и щелочных металлов они добавляются в ТВУС в количестве от 0,01 до 5,0% [37, 149]. К недостаткам такого подхода следует отнести то, что использование подобных химических соединений при последующем сжигании ТВУС может привести к коррозии и выходу из строя котельного оборудования. Кроме вышеуказанных исследованы так же пластификаторы на основе сульфополициклических ароматических алкилсодержащих соединений или их солей при их содержании в растворе 0,01–5,0% и 0,001–1,0%.

Для повышения качества ТВУС применение передовых синтетических ПАВ на сегодняшний день нерентабельно – эти вещества дороги и дефицитны. Запасы твердых парафинов (мыла) более широки, однако они находятся в ограниченном количестве. Дешевы и доступны гуматы (соли гуминовых кислот) из каменных и бурых углей. Кроме того, для снижения напряжения сдвига, эффективной вязкости целесообразно использовать углещелочной реагент (УЩР), с добавлением алкильных радикалов, или оксиэтилированный, что позволяет получить высокоэффективные и сравнительно доступные стабилизирующие добавки для ТВУС. В литературе [137, 200] исследуется применение недорогих и высокоэффективных диспергирующих веществ на основе ЛСТ (лигносульфонатов) и УЩР. Использование этих реагентов позволяет получить водоугольные суспензии, которые не уступают по своим реологическим свойствам топливу, которое приготовлено с применением

пластификаторов НФУ на основе нафталинсульфоната и аналогичного ему суперпластификатора С-3 (Дофен).

Рекомендованным общепринятым значением содержания пластификатора считается 1% [17, 156].

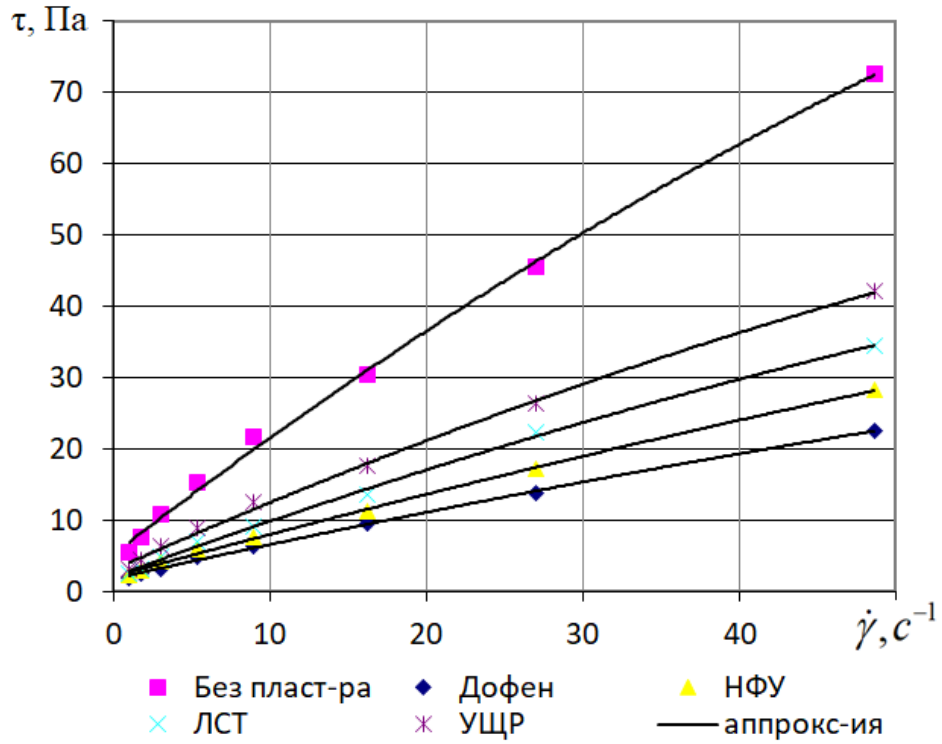
При всей масштабности и разнонаправленности исследований пластифицирующих добавок отсутствуют четкие представления о степени влияния того или иного пластификатора на свойства ТВУС при различной концентрации твердого компонента и изменении гранулометрического состава угля.

В рамках выполнения научных исследований проведены реологические испытания водоугольных суспензий на основе угля марки Г с массовой концентрацией твердой фазы 62, 64,5 и 67%, различной степени помола, для пластификаторов «Дофен», НФУ, ЛСТ и УЩР, а также без них, содержание диспергирующих добавок составляло 1% [87]. Исходные данные представлены в таблице 2.4.

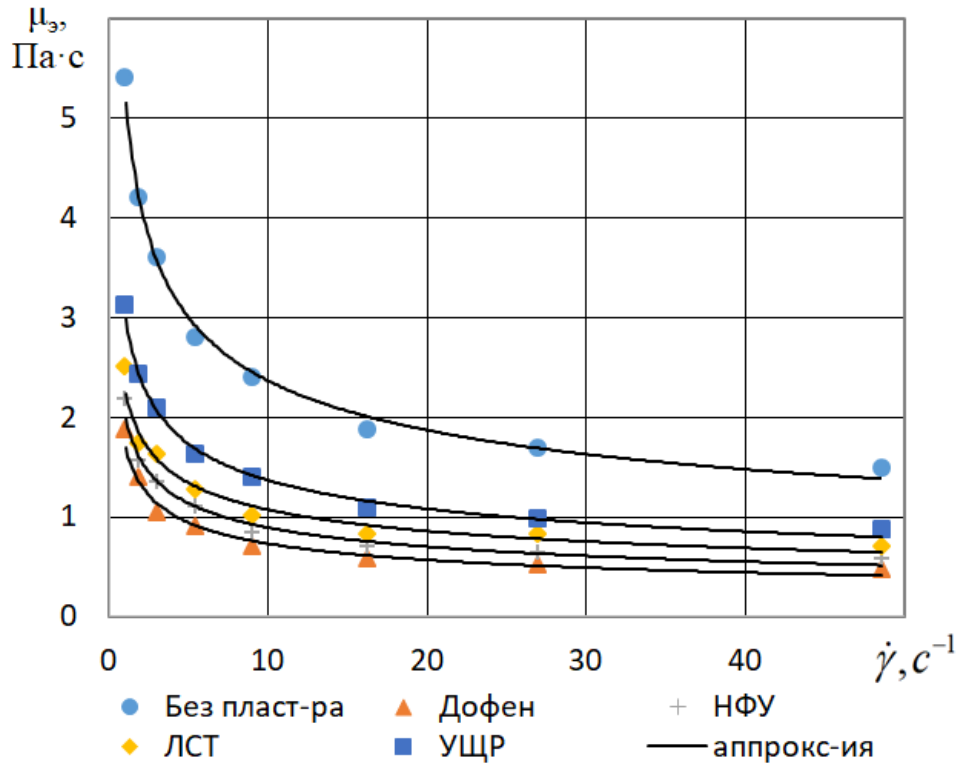
Таблица 2.4 – Значения исходных параметров для проведения исследований

Марка угля	Концентрация твердой фазы С, %	Диспергирующая добавка	Степень помола угля (критерий бимодальности Г)	Скорость сдвига $\dot{\gamma}$, с^{-1}
Г	62; 64,5; 67	Без добавки, «Дофен», НФУ, ЛСТ, УЩР	1,4; 2,0; 3,7	1-48,6

Результаты исследований представлены в виде графических зависимостей касательного напряжения и эффективной вязкости от скорости сдвига. Анализ приведенных на рисунке данных свидетельствует о существенном влиянии химических добавок на реологические характеристики ТВУС (см. рис. 2.3).



а)



б)

а) – зависимость напряжения от скорости сдвига при $C=62\%$ и $\Gamma=2,0$
 б) – зависимость эффективной вязкости от скорости сдвига при $C=62\%$ и $\Gamma=2,0$

Рисунок 2.3 – Зависимость реологических параметров от скорости сдвига для угля марки Г

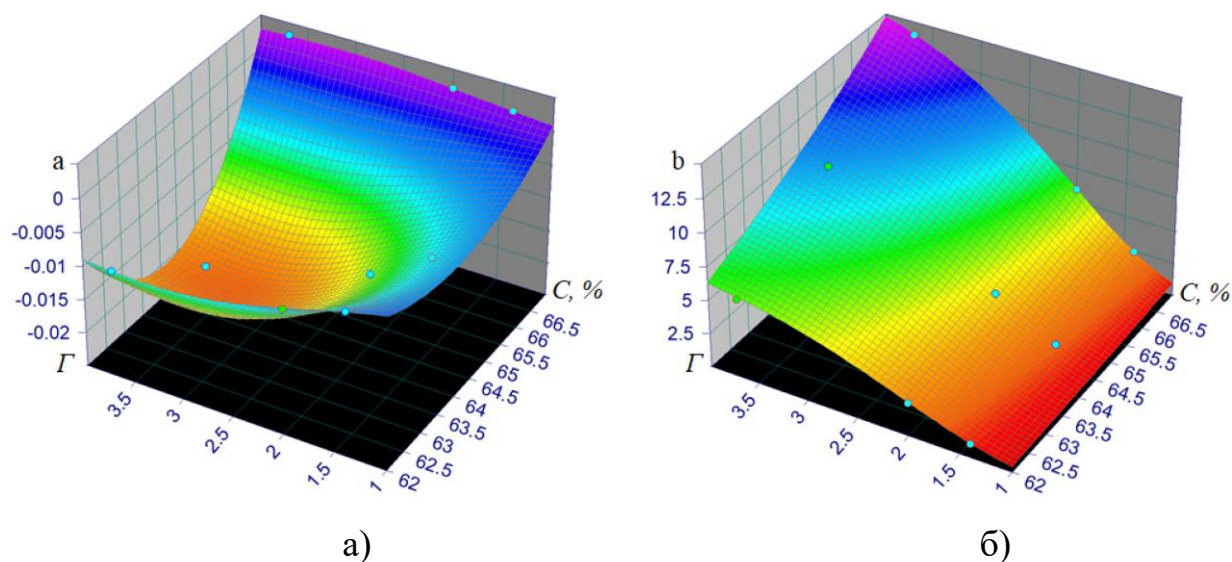
Следует отметить, что значения вязкостных показателей резко снижаются при использовании любого из пластификаторов, что обуславливает целесообразность применения диспергирующих добавок. При этом, минимальные величины реологических показателей достигаются при использовании Дофена. Одновременно наблюдается монотонное (без ярко выраженных локальных экстремумов) изменение касательного напряжения и эффективной вязкости с ростом скорости сдвига.

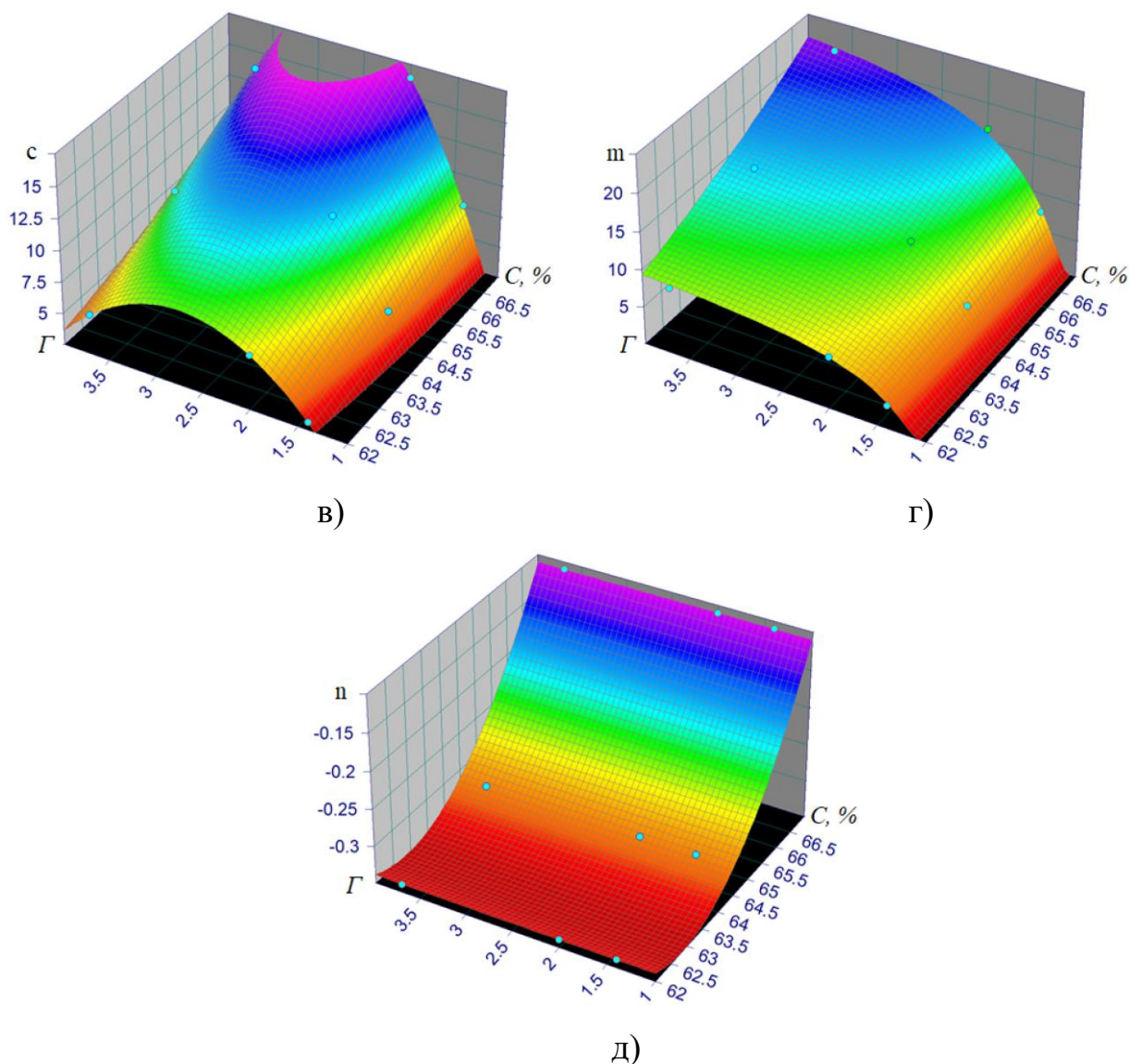
Приведенные зависимости (рис. 2.3 а и б) аппроксимируются уравнениями вида:

$$\tau = a\dot{\gamma}^2 + b\dot{\gamma} + c, \quad \mu_s = m\dot{\gamma}^n, \quad (2.45)$$

где a, b, c, m, n – коэффициенты аппроксимации.

Для визуализации характера изменения значений коэффициентов аппроксимации при различных величинах массовой концентрации твердого компонента и гранулометрического состава твердого материала (критерия бимодальности) построены соответствующие поверхности (рис.2.4 а-д).





а, б, в, г, д – для коэффициентов a , b , c , m , n соответственно

Рисунок 2.4 – Зависимость коэффициентов аппроксимации от концентрации твердой фазы и критерия бимодальности

В ходе анализа приведенных зависимостей установлено, что для коэффициентов b и m характерно монотонное возрастание при увеличении значений факторов влияния, при этом параметр n не зависит от критерия бимодальности, о чем свидетельствует постоянство его значений при изменении фактора Γ . Для коэффициента a наблюдается локальный минимум в диапазоне концентраций твердого компонента C от 63 до 65%. Значения c принимают максимальную величину в диапазоне значений критерия бимодальности Γ от 2,5 до 3,5.

Представленные поверхности аппроксимируются следующими выражениями:

$$a = \frac{1,92 - 0,06C + 0,00047C^2 - 4,46 \ln \Gamma}{1 - 0,0057C - 0,777 \ln \Gamma + 0,322(\ln \Gamma)^2};$$

$$b = e^{7,92 - \frac{22823,1}{C^2} - 7,82e^{-\Gamma}};$$

$$c = \frac{-0,017 + 0,0013 \ln C + 0,014\Gamma - 0,0025\Gamma^2}{1 - 0,473 \ln C + 0,056(\ln C)^2 - 5,02\Gamma + 8,96\Gamma^2};$$

$$m = e^{8,5 - \frac{22821,97}{C^2} - \frac{0,45}{\ln \Gamma}};$$

$$n = 389,88 + \frac{12,01C}{\ln C} - 138,26 \ln \Gamma.$$

Зависимости реологических параметров от скорости сдвига (рис. 2.4) для различных пластификаторов носят сходный характер, что позволяет осуществить пересчет их значений с помощью соответствующего коэффициента:

$$k_{\tau} = \frac{\tau_{\delta/\delta}}{\tau_i}, \quad k_{\mu} = \frac{\mu_{\delta/\delta}}{\mu_i}, \quad (2.46)$$

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

Установлено, что величина соответствующего коэффициента не зависит от скорости сдвига и остается постоянной на всем диапазоне ее изменения (табл. 2.4).

Значения k_{τ} и k_{μ} представлены в таблице 2.5.

В ходе анализа значений k_{τ} и k_{μ} установлено, что они совпадают

$$k_{\tau} = k_{\mu} = \frac{\tau_{\delta/\delta}}{\tau_i} = \frac{\mu_{\delta/\delta}}{\mu_i}.$$

Оценивая зависимости касательного напряжения и эффективной вязкости от скорости сдвига (значения коэффициентов k_{τ} , k_{μ}) с точки зрения реологического состояния, отметим, что для данных условий и композиций худшие показатели имеют ТВУС с химическими добавками УЦР (обладают наиболее высокими значениями τ и μ_{δ}).

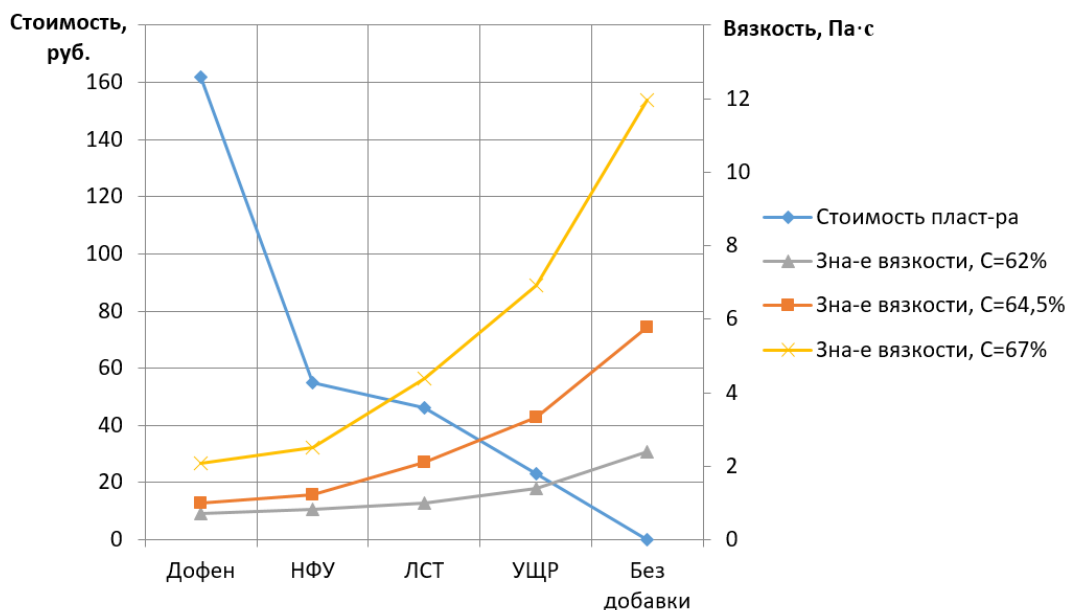
Таблица 2.5 – Значения коэффициентов k_{τ} и k_{μ} для различных концентраций и степени измельчения твердого материала

№ п/п	Пластификатор	Концентрация, %					
		62		64,5		67	
		k_{τ}	k_{μ}	k_{τ}	k_{μ}	k_{τ}	k_{μ}
$\Gamma = 1,4$							
1	Без пласт-ра	1	1	1	1	1	1
2	Дофен	3,1	3,1	5,75	5,75	5,75	5,75
3	НФУ	2,58	2,58	5,23	5,23	5,23	5,23
4	ЛСТ	2,11	2,11	2,3	2,3	2,28	2,28
5	УЦР	1,73	1,73	1,73	1,73	1,71	1,71
$\Gamma = 2,0$							
6	Без пласт-ра	1	1	1	1	1	1
7	Дофен	3,3	3,3	5,75	5,75	5,76	5,75
8	НФУ	2,58	2,58	5,23	5,23	5,23	5,23
9	ЛСТ	2,11	2,11	2,3	2,3	2,3	2,3
10	УЦР	1,74	1,74	1,73	1,73	1,73	1,73
$\Gamma = 3,7$							
11	Без пласт-ра	1	1	1	1	1	1
12	Дофен	3,4	3,4	5,75	5,75	5,76	5,76
13	НФУ	2,6	2,6	5,25	5,25	5,25	5,25
14	ЛСТ	2,12	2,12	2,29	2,29	2,29	2,29
15	УЦР	1,74	1,74	1,73	1,73	1,73	1,73

Для определения наиболее предпочтительного типа пластификатора для применения в водоугольных суспензиях использован графический метод – на одном поле построены кривые изменения эффективной вязкости в зависимости от типа добавки и стоимость единицы химического реагента (табл. 2.6, рис. 2.5)

Таблица 2.6 – Стоимость различных пластифицирующих добавок

№ п/п	Пластификатор	Стоимость 1 кг, руб.
1	Дофен	162
2	НФУ	55
3	ЛСТ	46
4	УЩР	23
5	Без добавки	0

Рисунок 2.5 – Зависимость стоимости и значения вязкости для различных пластификаторов ($\dot{\gamma}=9 \text{ с}^{-1}$, $\Gamma=2,0$)

Анализ данных, представленных на рисунке 2.5 позволяет установить, что невозможно однозначно рекомендовать тот или иной пластификатор, так как точка пересечения графиков стоимости и вязкости изменяется в зависимости от концентрации твердого компонента. Для содержания твердой фазы 62 и 64,5% достаточно использования рационально использовать ЛСТ и УЩР, а при ее возрастании до 67% следует применять НФУ (Дофен), для получения регламентируемых значений реологических характеристик ($\mu_{s-p} = 1,2-2,0 \text{ Па}\cdot\text{с}$)

В ходе исследования предметной области установлено, что в качестве пластификаторов дисперсных систем используется значительное количество химических реагентов, однако, основными диспергирующими добавками для

приготовления водоугольной суспензии выступают «Дофен», НФУ, ЛСТ и УЩР.

Наибольшие величины касательного напряжения и эффективной вязкости наблюдаются у дисперсных сред без применения каких-либо добавок, при этом минимальных значений реологических характеристик возможно добиться применением пластификатора «Дофен».

Кривые изменения касательного напряжения и эффективной вязкости от скорости сдвига для различных диспергирующих веществ и без них носят сходный характер, а величины напряжения сдвига и вязкости могут быть пересчитаны введением соответствующего коэффициента, зависящего от типа применяемой добавки.

Величина коэффициентов k_τ и k_μ не зависит от скорости сдвига, при этом наблюдается их равенство между собой.

Чем выше концентрация твердой фазы (возрастают напряжение сдвига и структурная вязкость), тем использование дорогих пластификаторов (Дофен, НФУ), в большей степени снижающих реологические характеристики, становится более предпочтительным.

2.3.3 Влияние температуры и водородного показателя на реологические свойства водоугольных сред.

Для успешного решения проблемы внедрения водоугольного топлива в целом необходимо решение ряда частных задач.

При этом необходимо отметить, что в области технологии приготовления ТВУС несмотря на сложность самого процесса (выбор и подготовка угля заданного гранулометрического состава, подбор и четкое дозирование компонентов ВУТ, выбор условий и режимов работы основного и вспомогательного оборудования и т.д.) имеются существенные разработки и достижения как в практике научных исследований, так и во внедрении полученных результатов. В настоящее время разработан ряд технологий и

технических решений таких как «Reocarb», «Fluidcarbom», «Co-Al» и др. [36, 86, 204].

Таким образом, технические и технологические задачи приготовления и использования ВУТ хоть и решены неокончательно, однако степень их завершенности все же позволяет осуществить практическую реализацию таких процессов, о чем свидетельствует и мировой опыт.

Однако, для комплексного решения проблемы и реализации создания топливно-энергетических комплексов различного назначения в ЛНР необходима детальная отработка процесса перемещения ВУТ (ТВУС) в рамках технологических процессов.

Одним из видов транспортировки водоугольной суспензии является гидравлический трубопроводный транспорт.

Однако, вопросам изучения процессов гидротранспортирования высококонцентрированного водоугольного, топлива, как сложной многокомпозиционной системы, в рамках технологических процессов до настоящего времени не уделялось должного внимания.

Имеющиеся данные в большинстве своем относятся к транспортированию водоугольных сред на основе углей Кузбасских месторождений, в зарубежных источниках приводятся только результаты отдельных реологических исследований [20, 25, 127, 171, 313, 350].

Между тем, качественные характеристики угля месторождений Донбасса, оказывающие существенное влияние на свойства ВУТ, значительно отличаются от углей Кузбасса и, естественно, углей зарубежных месторождений.

Возникает необходимость оценки возможных реологических параметров ТВУС в различных климатических условиях (при различной температуре) и с учетом кислотности водной составляющей.

Основным фактором внешнего воздействия на водоугольные среды является температура. Рассматривать это влияние в положительном или отрицательном аспекте необходимо с учетом технологии приготовления,

транспортирования, хранения и применения ТВУС. Терминалы приготовления находятся, как правило, в закрытых помещениях и, если они даже не отапливаются, то отрицательных температур там не бывает [123]. Тем не менее известно, что вязкость воды с изменением температуры от 0 до 20°C уменьшается в 1,8 раза.

Научными сотрудниками НПО «Хаймек» г. Донецк проведены исследования реологических характеристик ВУТ на ротационном вискозиметре при изменении температуры в интервале (3÷50,0°C). Массовая концентрация твердой фазы в суспензии, приготовленной на основе угля различных марок и характеристик, составила 65%. В качестве пластифицирующих химических добавок использовались «Дофен» и «НФУ» с расходом 1% на сухую массу угля.

Для оценки степени изменения эффективной вязкости среды в диапазоне температур, характерных для процесса перемещения по трубам такого рода континуумов, введен коэффициент [208]

$$K_{\mu} = \frac{\mu_{\varepsilon i}}{\mu_{\varepsilon 20}},$$

где $\mu_{\varepsilon i}$ – эффективная вязкость при данной температуре; $\mu_{\varepsilon 20}$ – эффективная вязкость при температуре 20°C.

Кроме того, произведена аппроксимация экспериментальных данных степенной зависимостью (рис. 2.6).

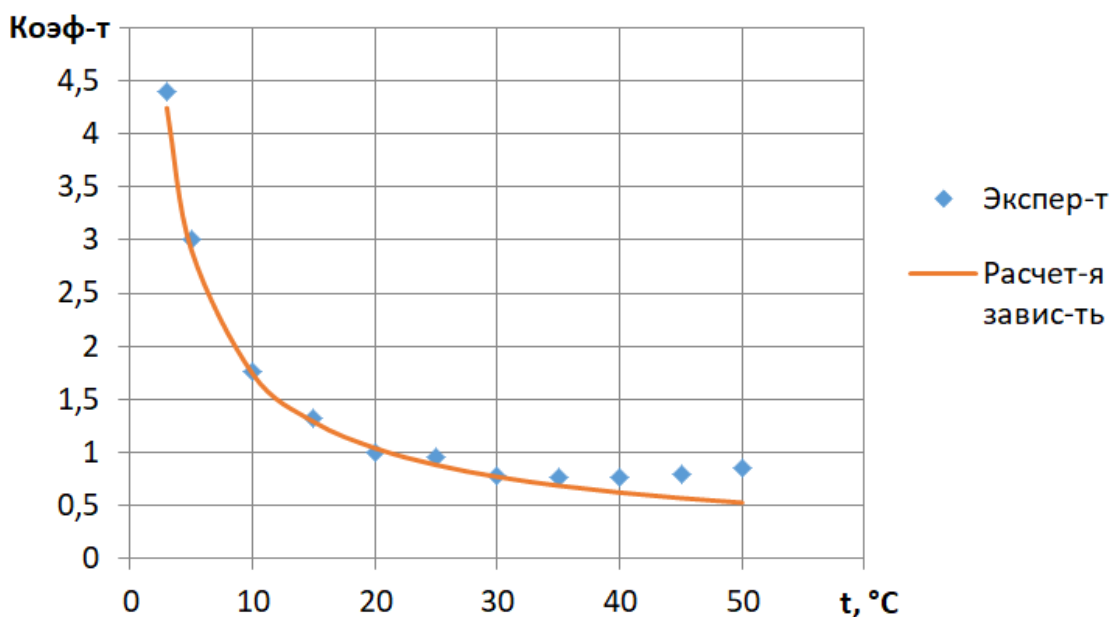


Рисунок 2.6 – Зависимость коэффициента изменения эффективной вязкости от температуры [123]

Из анализа представленных на рисунке 2.6 зависимостей следует, что значительное (в 4,5 раза) изменение реологических характеристик ТВУС наблюдается в диапазоне температур от 3 до 20°C, при этом в диапазоне от 20 до 50°C максимальное отклонение не превышает 25%. Также следует отметить, что аппроксимационная зависимость для расчета коэффициента K_{μ} , предложенная в работе [123, 208] имеет значительное отклонение при температуре более 35°C.

Установлено, что исследованиям влияния температурного режима на величину вязкости и напряжения сдвига для водоугольных суспензий уделено недостаточно внимания, а результаты носят разрозненный характер. Кроме того, отсутствуют данные о влиянии концентрации твердой фазы на изменение реологических характеристик ТВУС при изменении ее температуры.

Влиянию кислотности жидкой фазы на реологические свойства водоугольных сред посвящен большой объем исследований [20, 27, 156], при этом установлено, что с возрастанием водородного показателя наблюдается снижение величины напряжения сдвига [204]. Однако, данные о степени

снижения касательных напряжений и эффективной вязкости суспензии разнятся.

В работе [123], в ходе исследований влияния водородного показателя диспергирующей среды на структурно-реологические характеристики ВУТ, использовалась водопроводная вода г. Донецка и техническая вода Ясиновского коксохимзавода (ЯКХЗ). Исследователями установлено, что эффективная вязкость ВУТ при использовании воды различного состава меняется слабо.

В работах [23, 37, 123, 241, 243] авторы, наоборот, отмечают значительное (до 5 раз) снижение реологических показателей с ростом значения рН.

Для определения зависимости величины касательного напряжения и эффективной вязкости от температуры проведен ряд опытов с водоугольной суспензией на основе угля марки Г для концентраций твердого компонента C равной 62, 64,5 и 67% в диапазоне температур t от 3 до 50°C при значении водородного показателя рН=7. Значения реологических параметров определены при скорости сдвига $\dot{\gamma}=9 \text{ с}^{-1}$ на ротационном вискозиметре. В качестве пластификатора использовался лигносульфонат (ЛСТ). На основании экспериментальных значений напряжения сдвига и эффективной вязкости рассчитаны значения коэффициента $K_{\mu t}$ (табл. 2.7) и построены соответствующие зависимости (рис. 2.7).

Таблица 2.7 – Значения коэффициента $K_{\mu t}$ для различных температур t и концентраций C

№ п/п	Концентрация тв. комп. C , %	Температура t , °С								
		3	5	10	15	20	25	30	40	50
1	62	1,83	1,67	1,34	1,21	1,00	0,99	0,95	0,85	0,82
2	64,5	3,23	2,86	2,12	1,67	1,00	0,94	0,88	0,78	0,71
3	67	4,78	4,18	3,20	2,31	1,00	0,91	0,86	0,73	0,64

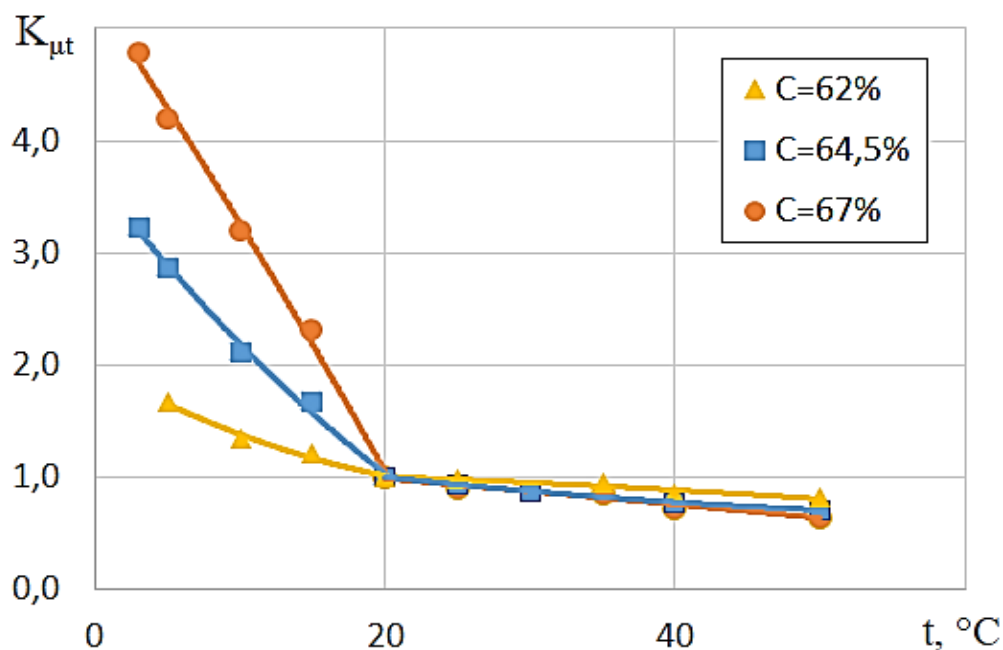


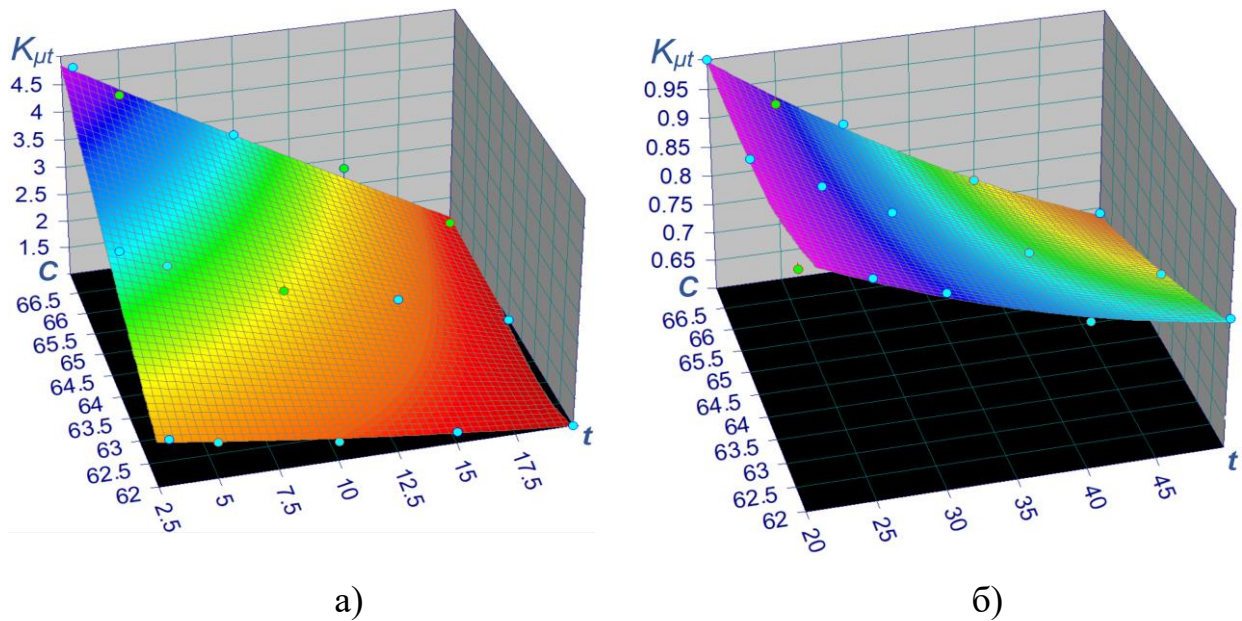
Рисунок 2.7 – Зависимость коэффициента $K_{\mu t}$ от температуры t

Анализ кривых, приведенных на рисунке 2.7 позволил установить, что характер зависимости коэффициента $K_{\mu t}$ от температуры носит сложный характер. Наблюдается его изменение при значении равным 1 для всех концентраций угля.

Следует отметить, что в диапазоне температур от 3 до 20 °C наблюдается резкое падение вязкостных характеристик ТВУС (до 5 раз в зависимости от концентрации твердой фазы). При этом, степень изменения вязкости стремится к 1,8 с увеличением доли жидкой фазы в ВУТ, что обусловлено степенью изменения вязкости воды.

В диапазоне температур от 20 до 50°C наблюдается снижение темпов изменения реологических характеристик для ТВУС всех концентраций (максимальное падение не превышает 35%).

Для получения эмпирической зависимости коэффициента $K_{\mu t}$ (вязкостных характеристик) произведена аппроксимация экспериментальных данных отдельно для участков до и более 20°C (рис. 2.8 а и б) [86].



а) – температура от 3 до 20°С; б) – температура от 20 до 50°С.

Рисунок 2.8 – Аппроксимация зависимостей коэффициента $K_{\mu t}$ от температуры t и концентрации C

Аппроксимационные выражения принимают следующий вид:

от 3 до 20°С:

$$K_{\mu t} = 8,30 + 2,00t - 0,84C + 0,0007t^2 + 0,012C^2 - 0,033tC, \quad (2.47)$$

от 20 до 50°С:

$$K_{\mu t} = 6,04 + 0,054t - 0,17C + 0,00012t^2 + 0,0014C^2 - 0,0011tC, \quad (2.48)$$

где t – температура ТВУС, °С; C – концентрация твердой фазы, %.

Для внутрицеховых и промышленных гидросистем прокладку трубопроводов в пределах промплощадок следует производить над землей: на опорах или в каналах со свободным доступом. На открытых участках необходимо обеспечить подогрев (прокладка паровых спутников) либо теплоизоляцию. За пределами промышленных площадок трубопроводы для ТВУС следует располагать под землей, при условии обеспечения температуры в верхней части трубопровода не ниже +1°С (в зимний период).

В случае длительных остановок в зимнее время рекомендуется обеспечить слив водоугольной суспензии из трубопроводной системы для предотвращения аварийных ситуаций при последующем пуске.

Экспериментальные исследования по определению зависимости реологических характеристик от значения водородного показателя рН проведены для тех же концентраций твердого материала при $\dot{\gamma}=9 \text{ с}^{-1}$ и температуре 20°C . Диапазон изменения кислотности водной фазы рН составил от 4 до 12 [86].

Для оценки степени изменения касательного напряжения и эффективной вязкости среды в диапазоне изменения рН введен коэффициент $K_{\mu\text{pH}}$, который определяется как

$$K_{\mu\text{pH}} = \frac{\tau_{\text{ipH}}}{\tau_{0\text{pH}}} = \frac{\mu_{\text{ipH}}}{\mu_{0\text{pH}}},$$

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

Следует отметить, что значения $K_{\mu\text{pH}}$ для различных концентраций твердого компонента C совпадают.

Результаты исследований приведены в таблице 2.9 и на рисунке 2.9.

Таблица 2.9 – Значения коэффициента $K_{\mu\text{pH}}$ при различных рН

№ п/п	Водородный показатель рН									
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1	1,83	1,67	1,34	1,21	1,00	0,99	0,95	0,85	0,82	

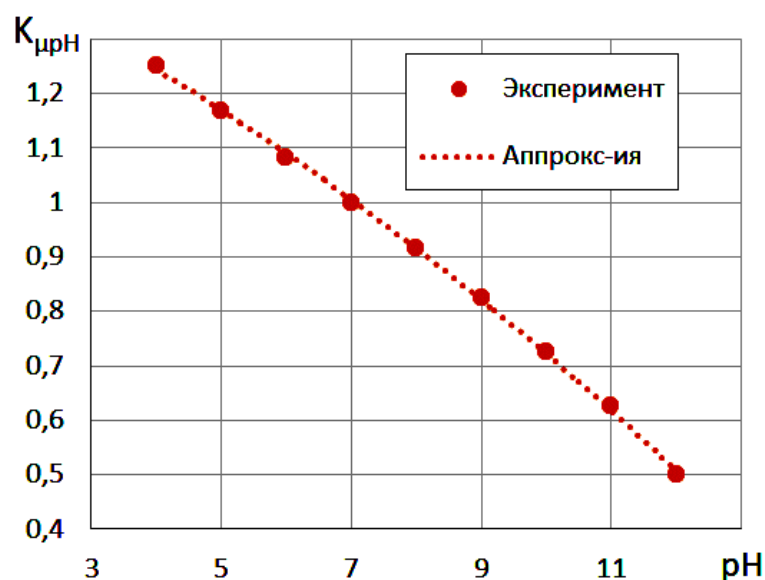


Рисунок 2.9 – Зависимость коэффициента $K_{\mu\text{pH}}$ от значения водородного показателя рН

В ходе анализа приведенной на рис. 2.9 кривой установлено, что наблюдается монотонное снижение величины $K_{\mu pH}$ с ростом кислотности среды. Зависимость носит близкий к линейному характер и незначительным искривлением при значениях рН выше 8. При этом наблюдается значительное снижение реологических характеристик с ростом водородного показателя от 1,25 при рН=4 до 0,5 при рН=12.

С целью повышения точности, аппроксимация произведена нелинейной функцией ($R^2=0,995$) и имеет вид

$$K_{\mu pH} = \left(2,17 - 0,31(\ln pH)^2\right)^{0,5}. \quad (2.49)$$

Кислотность среды является одним из значимых факторов, влияющих на значения реологических показателей ТВУС. При этом одним из путей получения ВУТ с заданными вязкостными характеристиками является изменение водородного показателя жидкой фазы.

При этом следует ограничить степень увеличения рН, так как чрезмерное увеличение щелочности среды может привести к преждевременному выходу из строя котельного оборудования.

2.3.4 Оценка степени измельчения угольных частиц ТВУС в процессе транспортирования по трубопроводу.

Несмотря на значительное количество исследований в области ТВУС процессу изменения его свойств, в частности гранулометрического состава, в рамках технологических процессов уделено недостаточное внимание. При этом, факты изменения характеристик водоугольной суспензии при ее транспортировании изучались в ряде работ [33, 123, 192, 203], в связи с чем оценка изменения свойств ВУТ в процессе перемещения по трубопроводу является актуальной.

Рядом исследователей установлено, что в процессе перемещения ТВУС наблюдается изменение ее характеристик (в том числе гранулометрического состава) со временем.

В работе [123] отмечается, что фракционный состав твердой фазы ТВУС изменялся в процессе транспортирования. При этом, после 335 часов работы в классе – 0,074 мм процентное содержание фракции крупностью до 0,043 мм составляло 77,32%, что свидетельствует об измельчении частиц.

Вследствие измельчения в системе трубопроводов и клапанном аппарате поршневого насоса гранулометрический состав угля претерпевает весьма существенные изменения. При работе гидравлической системы образовалась среда с ярко выраженными вязкопластичными свойствами, т.е. водоугольная суспензия, характеризующаяся эффективной вязкостью 1,1 Па (при температуре 25°C), что значительно выше исходной [123]. При этом, оценки степени изменения фракционного состава представлено не было.

В работах [20, 123, 171, 204] также отмечается изменение характеристик ТВУС при длительном движении по трубопроводам. При этом, влияние самого процесса перемещения на свойства транспортируемой среды также не определялось.

В ходе анализа приведенных в работе [123] данных установлено, что перемещаемая крупнофракционная гидросмесь угля становится водоугольной суспензией приемлемого фракционного состава после 135 часов транспортирования. Это время было принято за начальную точку отсчета.

Произведена оценка величин среднего диаметра твердых частиц d_{cp} в суспензии и критерия бимодальности Γ для времени перемещения 0, 115, 200 часов (с учетом новой точки отсчета) (таблица 2.10).

Таблица 2.10 – Изменение среднего диаметра твердых частиц d_{cp} и критерия бимодальности Γ от времени перемещения

№п/п	Время перемещения T , ч	Средний диаметр твердых частиц d_{cp} , мкм	Критерий бимодальности Γ
1	0	32	3,14
2	115	31	3,47
3	200	30	4,28

Построена зависимость критерия бимодальности Γ от времени транспортирования (рис. 2.10).

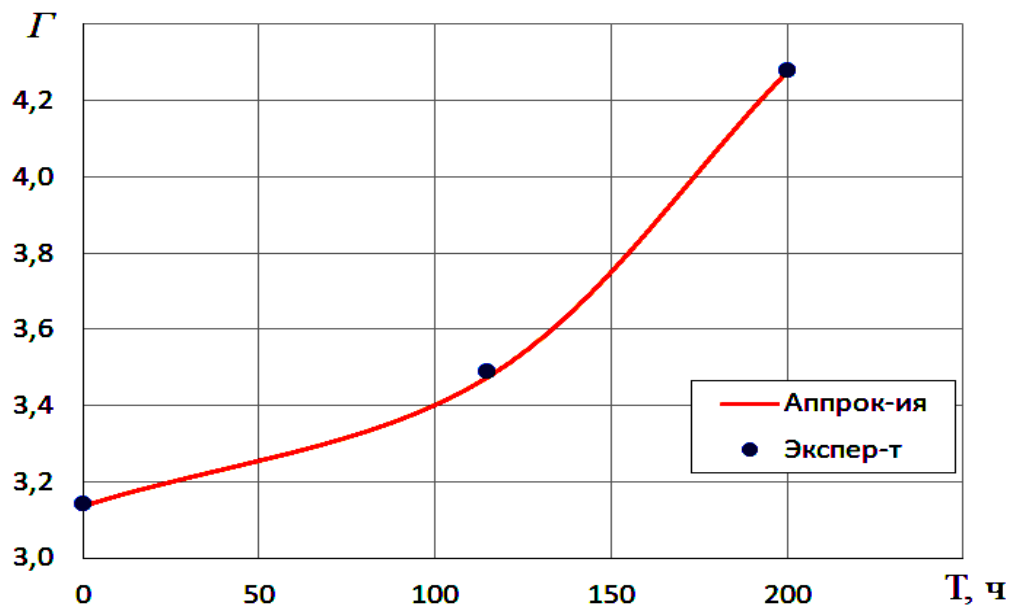


Рисунок 2.10 – зависимость критерия бимодальности Γ от времени транспортирования

Анализ приведенной на рисунке 2.10 зависимости позволил установить, что изменения критерия бимодальности с ростом времени перемещения происходит по экспоненциальному закону и может быть аппроксимировано следующей зависимостью ($R^2=0,99$)

$$\Gamma = \Gamma_0 \exp(a + bT^2), \quad (2.50)$$

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

С учетом схожести характера изменения гранулометрического состава (критерия бимодальности) дисперсии при других начальных его значениях, эмпирическое выражения для определения критерия Γ принимает вид

$$\Gamma = \Gamma_0 \exp(0,00136 + 7,66 \cdot 10^{-6} T^2). \quad (2.51)$$

Для определения необходимости учета изменения гранулометрического состава ТВУС при перемещении по трубопроводам в рамках технологических

систем необходимо оценить время осуществления данного процесса с учетом рекомендованных в [123, 204] скоростей транспортирования.

Длина технологических (промышленных) трубопроводов колеблется от нескольких сот метров до 5 км [36, 192, 204], в связи с чем, произведем расчет времени перемещения водоугольной среды по трубам различного диаметра на длину 5 км. Результаты расчета приведены в таблице 2.11 и на рисунке 2.11 [90].

Таблица 2.11 – Значения времени транспортирования по трубам различного диаметра

Назначение ГТС	Диаметр труб, D , м	Скорость, u , м/с			Время, ч		
		0,05	0,088	0,126	27,8	15,8	11,0
Технологическая	0,05	0,05	0,088	0,126	27,8	15,8	11,0
	0,065	0,065	0,114	0,163	21,4	12,2	8,5
	0,08	0,08	0,140	0,2	17,4	9,9	6,9
	0,1	0,1	0,175	0,25	13,9	7,9	5,6
	0,125	0,125	0,219	0,312	11,1	6,4	4,5
Промышленная	0,15	0,15	0,263	0,375	9,3	5,3	3,7
	0,2	0,2	0,350	0,5	6,9	4,0	2,8
	0,25	0,25	0,435	0,62	5,6	3,2	2,2

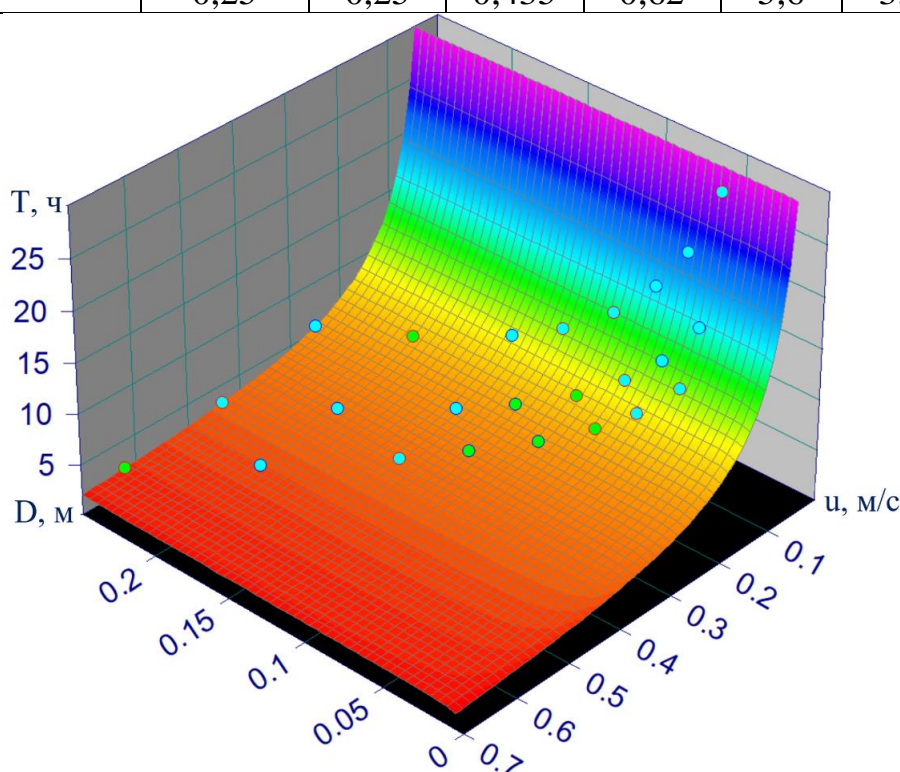


Рисунок 2.11 – Зависимость времени транспортирования T от диаметра трубопровода D и скорости течения u

Установлено, что время транспортирования обратно пропорционально величине скорости транспортирования u и диаметру трубопровода D . Игнорирование данного обстоятельства может нарушить требование обеспечения безотказной работы технологических систем. Из рисунка (2.11) следует, что функция времени монотонно убывает без выраженных локальных экстремумов.

Представленная на рисунке 2 зависимость может быть аппроксимирована следующим выражением ($R^2=0,99$) [90]

$$T = 0,0132 - \frac{0,0026}{D} + \frac{1,39}{u}, \quad (2.52)$$

где D – диаметр трубопровода, м; u – скорость течения, м/с.

Для проверки функции (2.52) на экстремум произведем ее дифференцирование отдельно по диаметру трубопровода D и скорости течения u . С учетом того, что время не может принимать отрицательных значений, полученные выражения принимают вид

$$T'(D) = \frac{0,0026}{D^2}, \quad T'(u) = \frac{1,39}{u^2}.$$

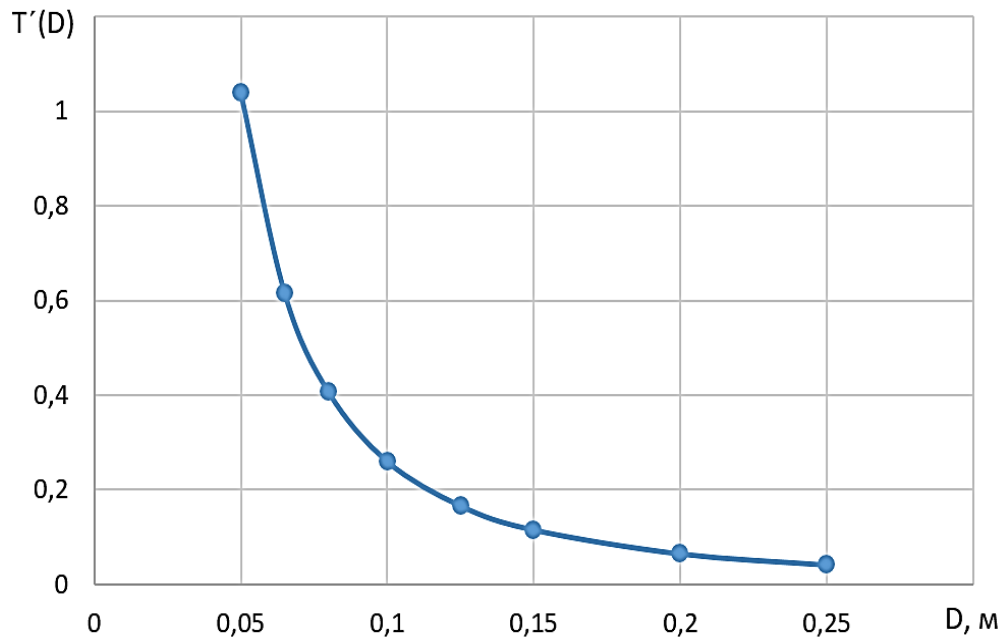
Для представленных выражений построены зависимости в диапазоне значений аргумента $D=0,05-0,25$ м и $u=0,05-0,62$ м/с (рисунок 3.11 а и б).

Монотонность представленных на рисунке 2.12 кривых свидетельствует об отсутствии экстремумов функции (2.52) на рассматриваемом диапазоне значений диаметра трубопровода D и скорости транспортирования u .

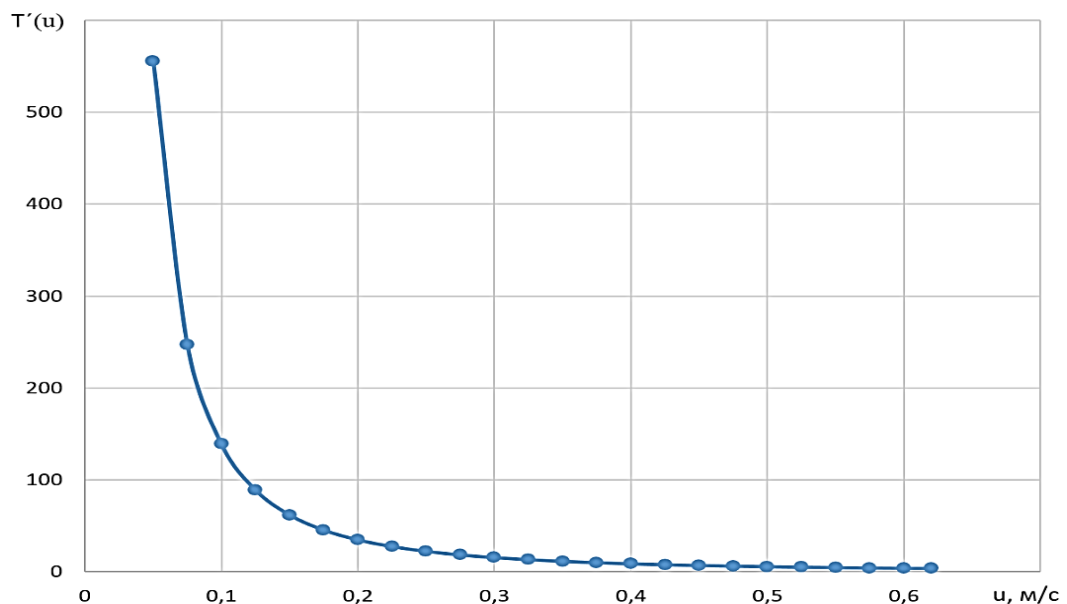
Следует отметить, что время движения водоугольной суспензии по трубопроводу T обратно пропорционально значению диаметра D и скорости u .

Оценим степень изменения гранулометрического состава ТВУС при начальном значении $\Gamma=3,14$ ($T=27,8$ ч)

$$\Gamma = 3,14 \cdot \exp(0,00136 + 7,66 \cdot 10^{-6} \cdot 27,8^2) = 3,16.$$



а)



б)

а – функция $T'(D)$; б – функция $T'(u)$

Рисунок 2.12 – Зависимость производной функции времени транспортирования T от значения аргумента

Относительное изменение T составляет порядка 0,6%, что позволяет пренебречь им.

Следует отметить, что для технологических систем целесообразно принимать максимально рекомендуемые значения скоростей течения по трубопроводу, для обеспечения надежности работы технологической системы

и в связи с их относительно малой протяженностью, что обуславливает сокращение времени транспортирования.

Анализ результатов проведенных исследований позволил установить, что для большинства технологических систем (до 5 км длиной) изменения гранулометрического состава водоугольной среды можно не учитывать.

Если трубопроводная система имеет большую протяженность или образована несколькими участками значительной длины, необходим расчет степени измельчения ТВУС и пересчет его реологических характеристик.

Выводы к разделу 2

В ходе анализа поведения дисперсных систем на основе частиц угля установлено, что они относятся к неньютоновским жидкостям. А для описания их свойств следует использовать соответствующие реологические зависимости.

Исследователями предложено значительное количество реологических законов для описания поведения неньютоновской среды и водоугольного топлива, среди них: модель Прандтля, Эйринга, Поуэла-Эйринга, модель Вильямсона, Стейгера-Орьега, Брайнта, модель Ван-Вазера (Гершеля-Баклея), Еллиса, Вокадло и т.д. Наиболее распространенными и общепризнанными выступают уравнения для вязкопластической, псевдопластической и дилатантной жидкостей. Зачастую для описания поведения водоугольных дисперсных сред применяются зависимости Шведова-Бингама и Гершеля-Баклея (Балкли), как более обобщенная форма.

Современные представления о реологии дисперсных систем заключаются в составлении многопараметрических реологических моделей, такой подход позволяет наиболее точно отразить зависимости напряжения сдвига и вязкости от тех или иных факторов, а также динамику их изменений.

Одним из распространенных методов представления реологических законов является использования механических моделей, представляющих собой совокупность элементов, описывающих упругие и пластические

деформации. Полученные выражения приводятся к безразмерному виду, и в дальнейшем используется, так называемый критериальный подход.

Не смотря на обилие реологических моделей дисперсных сред, в том числе водоугольного топлива, однозначно принятой модели ТВУС не существует, что в первую очередь связано со сложностью описания ее поведения. В связи с чем, необходимо составление многопараметрических выражений для определения вязкости и напряжения сдвига при течении водоугольной среды.

В ходе определения основных факторов влияния на реологию ТВУС установлено, что на поведение суспензии влияют следующие параметры: скорость сдвига, концентрация твердой фазы, зольность исходного угля, выход летучих веществ, гранулометрический состав (критерий бимодальности), тип пластификатора, температура окружающей среды, водородный показатель несущей среды. В качестве базовых следует принимать первые пять, так как их сочетания в значительной степени влияют на поведение водоугольной среды.

При реологических изысканиях особняком стоят исследования влияния пластифицирующих добавок на свойства ТВУС. К наиболее используемым пластификаторам относятся «Дофен», НФУ, ЛСТ, УЩР, при этом рекомендуемым значением содержания пластификатора считается 1%, так как эта доля обеспечивает максимальный эффект на единицу использованного реагента.

Кривые изменения касательного напряжения и эффективной вязкости от скорости сдвига для различных диспергирующих веществ и без них носят сходный характер, а величины напряжения сдвига и вязкости могут быть пересчитаны введением соответствующего коэффициента, зависящего от типа применяемой добавки. Рост концентрации твердой фазы в суспензии обуславливает необходимость использования более дорогих пластификаторов, таких как «Дофен» и НФУ.

В ходе анализа результатов проведенных исследований по определению зависимости реологических характеристик ТВУС от температуры установлено, что происходит резкое снижение (до 5 раз) вязкости среды при повышении

температуры от 3 до 20°C. Дальнейшее повышение температуры от 20 до 50°C также приводит к падению реологических свойств, однако оно составляет порядка 30-35%. Произведена оценка влияния содержания твердой фазы на степень изменения вязкостных характеристик для различных температур и установлено, что наблюдается значительное влияние концентрации угля в ТВУС для интервала температур от 3 до 20°C, с ее ростом от 62 до 67% коэффициент $K_{\mu t}$ возрастает с 1,83 до 4,78. При нагреве суспензии свыше 20°C влияние содержания угольных частиц нивелируется.

В процессе исследования влияния кислотности водной среды на свойства ТВУС введен соответствующий коэффициент K_{pH} . Его зависимость от величины водородного показателя носит слабовыраженный нелинейный характер, и с ростом значения pH наблюдается его значительное снижение (до 2,5 раз). Такое поведение обуславливает возможность получения заданных реологических характеристик ТВУС путем изменения кислотности жидкой составляющей.

Установлено, что в ходе перемещения водоугольных сред по трубопроводу наблюдается изменение его характеристик (в частности, гранулометрического состава) со временем. Наблюдается экспоненциальная зависимость изменения критерия бимодальности от времени течения по трубопроводам технологических систем.

Длительность транспортирования ТВУС обратно пропорциональна диаметру трубопровода и скорости течения и монотонно убывает с ростом их значений. Для технологических (промышленных) систем длина трубопроводов, которых не значительна (около 5 км) изменениями гранулометрического состава можно пренебречь.

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%.

РАЗДЕЛ 3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ТВУС

3.1 Уравнения движения водоугольной среды

На сегодняшний день широкое распространение получило числовое решение задач движения жидкости при незначительных затратах времени на расчет. Таким образом, появилась возможность уменьшить количество экспериментальных исследований за счет замены части результатов расчетными значениями. Для этого необходимо, в первую очередь, выполнить проверку математических моделей с целью получения минимального различия между результатами математического моделирования и экспериментальных результатов [1, 57, 114]. После получения минимальных отклонений расчета моделей течения необходимо указать диапазон, в котором эти модели обладают достаточной точностью, и подчеркнуть, в каком диапазоне параметров полученные результаты и выводы будут иметь силу.

Для ньютоновских жидкостей за последние годы проведено большое количество разнообразных исследований по определению лучшего математического представления для различных параметров и геометрии течения, и эти работы непрерывно проводятся в настоящее время. В отличие от ньютоновских жидкостей для неньютоновских, определение моделей значительно более сложно за счет влияния дополнительного фактора, такого как изменение вязкости по реологическому закону. Для этих сред проводится значительно меньшее количество исследований с помощью программных комплексов CFD (англ. Computational fluid dynamics), и наличие достаточно большого количества реологических моделей приводит к тому, что для конкретной математической модели и конкретных параметров исходного угля практически не проводилось исследований численного решения уравнений движения.

Расчеты на математических моделях процессов, происходящих при течении водоугольной суспензии в трубопроводе и различных элементах технологических гидросистем, позволяют сократить время на усовершенствование методик расчета параметров трубопроводной системы и получить наиболее точные ее характеристики, а также эксплуатационные показатели. Поэтому математическое моделирование является одной из важнейших и актуальных задач исследования движения высококонцентрированного водоугольного топлива [92].

Для описания поведения жидкости запишем теорему об изменении главного вектора количества движения системы. Эта теорема формулирует связь частной производной от основного вектора количества движения «жидкого» объема с главным вектором внешних объемных и поверхностных сил, приложенных к жидкости, которая расположены соответственно в объеме и ограничивающей его поверхности. [6, 106, 136, 350]

$$\frac{d\bar{V}}{dt} = \bar{F} + \frac{1}{\rho} \text{Div}T, \quad (3.1)$$

где \bar{V} – вектор скорости; \bar{F} – вектор массовых сил; ρ – плотность среды; t – время.

Тензор напряжений:

$$T \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} \end{pmatrix}.$$

В декартовых координатах система уравнений записывается в следующей форме:

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho \left(\frac{\partial V_1}{\partial t} + V_1 \frac{\partial V_1}{\partial x_1} + V_2 \frac{\partial V_1}{\partial x_2} + V_3 \frac{\partial V_1}{\partial x_3} \right) = \rho F_1 + \frac{\partial p_{11}}{\partial x_1} + \frac{\partial p_{21}}{\partial x_2} + \frac{\partial p_{31}}{\partial x_3}, \\ \rho \left(\frac{\partial V_2}{\partial t} + V_1 \frac{\partial V_2}{\partial x_1} + V_2 \frac{\partial V_2}{\partial x_2} + V_3 \frac{\partial V_2}{\partial x_3} \right) = \rho F_2 + \frac{\partial p_{12}}{\partial x_1} + \frac{\partial p_{22}}{\partial x_2} + \frac{\partial p_{32}}{\partial x_3}, \\ \rho \left(\frac{\partial V_3}{\partial t} + V_1 \frac{\partial V_3}{\partial x_1} + V_2 \frac{\partial V_3}{\partial x_2} + V_3 \frac{\partial V_3}{\partial x_3} \right) = \rho F_3 + \frac{\partial p_{13}}{\partial x_1} + \frac{\partial p_{23}}{\partial x_2} + \frac{\partial p_{33}}{\partial x_3}. \end{array} \right. \quad (3.2)$$

Система уравнений (3.2) в более компактной индексной форме по правилу Эйнштейна имеет следующий вид [140]:

$$\rho \left(\frac{\partial V_i}{\partial t} + V_k \frac{\partial V_i}{\partial x_k} \right) = \rho F_i + \frac{\partial p_{ki}}{\partial x_k} \quad (i, k = 1, 2, 3; \text{ суммирование по } k), \quad (3.3)$$

где V_i, V_k – проекции составляющей вектора скорости на оси координат; F_i – проекции вектора массовых сил на оси координат; p_{ki} – элементы тензора напряжений T .

Зависимость между компонентами тензоров напряжений и скоростей деформации характеризует реологический закон исследуемой жидкости. По результатам исследований реологического закона водоугольной суспензии [114] получено, что она, при соответствующей концентрации твердой фазы, наиболее близко к вязкопластическим (бингамовским) средам. Тогда, согласно [261], компоненты тангенциальных напряжений

$$p_{ik} = 2 \left(\eta + \frac{\tau_0}{H} \right) S_{ik}, \quad i \neq k,$$

где

$$H = \left[\left(\frac{\partial V_1}{\partial x_2} + \frac{\partial V_2}{\partial x_1} \right)^2 + \left(\frac{\partial V_1}{\partial x_3} + \frac{\partial V_3}{\partial x_1} \right)^2 + \left(\frac{\partial V_2}{\partial x_3} + \frac{\partial V_3}{\partial x_2} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial V_1}{\partial x_1} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial V_2}{\partial x_2} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial V_3}{\partial x_3} \right)^2 \right]^{0,5}.$$

Составляющие тензора скоростей деформаций записываются следующим образом

$$S_{ik} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial V_i}{\partial x_k} + \frac{\partial V_k}{\partial x_i} \right).$$

С учетом реологического закона для вязкопластических жидкостей, для трехмерного движения, зависимость между элементами тензоров в самом общем виде формулируется следующим образом:

$$p_{11} = -p + 2 \left(\eta + \frac{\tau_o}{H} \right) \frac{\partial V_1}{\partial x_1} - \frac{2}{3} \left(\eta + \frac{\tau_o}{H} \right) \operatorname{div} \bar{V};$$

$$p_{22} = -p + 2 \left(\eta + \frac{\tau_o}{H} \right) \frac{\partial V_2}{\partial x_2} - \frac{2}{3} \left(\eta + \frac{\tau_o}{H} \right) \operatorname{div} \bar{V};$$

$$p_{33} = -p + 2 \left(\eta + \frac{\tau_o}{H} \right) \frac{\partial V_3}{\partial x_3} - \frac{2}{3} \left(\eta + \frac{\tau_o}{H} \right) \operatorname{div} \bar{V};$$

$$p_{12} = p_{21} = \left(\eta + \frac{\tau_o}{H} \right) \left(\frac{\partial V_2}{\partial x_1} + \frac{\partial V_1}{\partial x_2} \right);$$

$$p_{13} = p_{31} = \left(\eta + \frac{\tau_o}{H} \right) \left(\frac{\partial V_3}{\partial x_1} + \frac{\partial V_1}{\partial x_3} \right);$$

$$p_{23} = p_{32} = \left(\eta + \frac{\tau_o}{H} \right) \left(\frac{\partial V_3}{\partial x_2} + \frac{\partial V_2}{\partial x_3} \right).$$

Для замыкания математической модели к уравнениям движения необходимо прибавить уравнение неразрывности.

Водоугольное топливо можно считать несжимаемой жидкостью [136], тогда имеем

$$\operatorname{div} \bar{V} = 0,$$

или

$$\frac{\partial V_1}{\partial x_1} + \frac{\partial V_2}{\partial x_2} + \frac{\partial V_3}{\partial x_3} = 0. \quad (3.4)$$

Уравнение (3.2) с учетом связи между компонентами тензоров напряжений и скоростей деформации и (3.4) можно записать следующим образом:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial V_1}{\partial t} + V_1 \frac{\partial V_1}{\partial x_1} + V_2 \frac{\partial V_1}{\partial x_2} + V_3 \frac{\partial V_1}{\partial x_3} = F_1 - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_1} + \frac{1}{\rho} \left(\eta + \frac{\tau_0}{H} \right) \left(\frac{\partial^2 V_1}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 V_1}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2 V_1}{\partial x_3^2} \right) \\ \quad - \frac{\tau_0}{\rho H^2} \left(2 \frac{\partial H}{\partial x_1} \frac{\partial V_1}{\partial x_1} + \frac{\partial H}{\partial x_2} \left(\frac{\partial V_2}{\partial x_1} + \frac{\partial V_1}{\partial x_2} \right) + \frac{\partial H}{\partial x_3} \left(\frac{\partial V_3}{\partial x_1} + \frac{\partial V_1}{\partial x_3} \right) \right); \\ \frac{\partial V_2}{\partial t} + V_1 \frac{\partial V_2}{\partial x_1} + V_2 \frac{\partial V_2}{\partial x_2} + V_3 \frac{\partial V_2}{\partial x_3} = F_2 - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_2} + \frac{1}{\rho} \left(\eta + \frac{\tau_0}{H} \right) \left(\frac{\partial^2 V_2}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 V_2}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2 V_2}{\partial x_3^2} \right) \\ \quad - \frac{\tau_0}{\rho H^2} \left(\frac{\partial H}{\partial x_1} \left(\frac{\partial V_1}{\partial x_2} + \frac{\partial V_2}{\partial x_1} \right) + 2 \frac{\partial H}{\partial x_2} \frac{\partial V_2}{\partial x_2} + \frac{\partial H}{\partial x_3} \left(\frac{\partial V_3}{\partial x_2} + \frac{\partial V_2}{\partial x_3} \right) \right); \\ \frac{\partial V_3}{\partial t} + V_1 \frac{\partial V_3}{\partial x_1} + V_2 \frac{\partial V_3}{\partial x_2} + V_3 \frac{\partial V_3}{\partial x_3} = F_3 - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_3} + \frac{1}{\rho} \left(\eta + \frac{\tau_0}{H} \right) \left(\frac{\partial^2 V_3}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 V_3}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2 V_3}{\partial x_3^2} \right) \\ \quad - \frac{\tau_0}{\rho H^2} \left(\frac{\partial H}{\partial x_1} \left(\frac{\partial V_1}{\partial x_3} + \frac{\partial V_3}{\partial x_1} \right) + \frac{\partial H}{\partial x_2} \left(\frac{\partial V_2}{\partial x_3} + \frac{\partial V_3}{\partial x_2} \right) + 2 \frac{\partial H}{\partial x_3} \frac{\partial V_3}{\partial x_3} \right); \\ \frac{\partial V_1}{\partial x_1} + \frac{\partial V_2}{\partial x_2} + \frac{\partial V_3}{\partial x_3} = 0. \end{array} \right.$$

Выполнив группировку составляющих, получим:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial V_1}{\partial t} + V_1 \frac{\partial V_1}{\partial x_1} + V_2 \frac{\partial V_1}{\partial x_2} + V_3 \frac{\partial V_1}{\partial x_3} = F_1 - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_1} + \frac{1}{\rho} \left(\eta + \frac{\tau_0}{H} \right) \left(\frac{\partial^2 V_1}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 V_1}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2 V_1}{\partial x_3^2} \right) \\ & \quad - \frac{\tau_0}{\rho H^2} \left(2 \frac{\partial H}{\partial x_1} \frac{\partial V_1}{\partial x_1} + \frac{\partial H}{\partial x_2} \left(\frac{\partial V_2}{\partial x_1} + \frac{\partial V_1}{\partial x_2} \right) + \frac{\partial H}{\partial x_3} \left(\frac{\partial V_3}{\partial x_1} + \frac{\partial V_1}{\partial x_3} \right) \right) = \\ & = F_1 - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_1} + \frac{1}{\rho} \left(\eta + \frac{\tau_0}{H} \right) \nabla^2 V_1 - \frac{\tau_0}{\rho H^2} \left(\frac{\partial H}{\partial x_1} \frac{\partial V_1}{\partial x_1} + \frac{\partial H}{\partial x_1} \frac{\partial V_1}{\partial x_1} + \frac{\partial H}{\partial x_2} \frac{\partial V_2}{\partial x_1} + \right. \\ & \quad \left. + \frac{\partial H}{\partial x_2} \frac{\partial V_1}{\partial x_2} + \frac{\partial H}{\partial x_3} \frac{\partial V_3}{\partial x_1} + \frac{\partial H}{\partial x_3} \frac{\partial V_1}{\partial x_3} \right) \Big\} = F_1 - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_1} + \frac{1}{\rho} \left(\eta + \frac{\tau_0}{H} \right) \nabla^2 V_1 - \\ & \quad - \frac{\tau_0}{\rho H^2} \left(\frac{\partial H}{\partial x_1} \frac{\partial V_1}{\partial x_1} + \frac{\partial H}{\partial x_2} \frac{\partial V_1}{\partial x_2} + \frac{\partial H}{\partial x_3} \frac{\partial V_1}{\partial x_3} + \frac{\partial H}{\partial x_1} \frac{\partial V_1}{\partial x_1} + \frac{\partial H}{\partial x_2} \frac{\partial V_2}{\partial x_1} + \frac{\partial H}{\partial x_3} \frac{\partial V_3}{\partial x_1} \right). \end{aligned}$$

Система уравнений может быть также записана следующим образом:

$$\begin{cases} \frac{\partial V_i}{\partial t} + V_k \frac{\partial V_i}{\partial x_k} = F_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \left(\eta + \frac{\tau_0}{H} \right) \nabla^2 V_i - \frac{\tau_0}{\rho H^2} \left(\frac{\partial H}{\partial x_k} \frac{\partial V_i}{\partial x_k} + \frac{\partial H}{\partial x_k} \frac{\partial V_k}{\partial x_i} \right); \\ \frac{\partial V_k}{\partial x_k} = 0; \quad (i, k = 1, 2, 3). \end{cases} \quad (3.5)$$

В наиболее распространенном, турбулентном движении жидкости, на сегодняшний день, по причине недостаточности компьютерных ресурсов для прямого моделирования уравнений (3.5), являющихся нелинейными дифференциальными уравнениями в частных производных второго порядка [132], используют их осреднение по Рейнольдсу [136]. Запишем теорему об изменении главного вектора количества движения системы, учитывая осреднение и опуская знаки осреднения в дальнейшем:

$$\begin{cases} \frac{\partial \bar{V}}{\partial t} + (\bar{V} \cdot \nabla) \bar{V} = \bar{F} - \frac{1}{\rho} \overline{\text{grad} p} + \frac{1}{\rho} \overline{\text{Div}(T_M + T_T)}; \\ \text{div} \bar{V} = 0. \end{cases} \quad (3.6)$$

где T_M и T_T – молекулярная и турбулентная составляющие тензора вязких напряжений.

Величины молекулярных составляющих тензора напряжений определяют согласно реологической модели вязкопластической жидкости:

$$T_M = 2 \left(\eta + \frac{\tau_0}{H} \right) S.$$

Система уравнений (3.5) незамкнута, поскольку связь между турбулентными составляющими тензора T_T напряжений с параметрами среднего течения неизвестна и должна определяться с помощью дополнительных соотношений, то есть моделью турбулентности. Если используют линейную модель турбулентности, например SST-модель Ментера, предполагают выполнение обобщенной гипотезы Бусинеска [3, 6]:

$$T_T = 2\mu_t S + \frac{2}{3} kE,$$

где μ_t – турбулентная вязкость; k – кинетическая энергия турбулентности:

$$k = \frac{1}{2}(V_1'^2 + V_2'^2 + V_3'^2), \quad (3.7)$$

$$E_{ij} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \text{ – тензорная единица.}$$

Вышеприведенные уравнения являются общими для расчета турбулентного течения. Если течение ламинарное, эти уравнения значительно упрощаются, и нет необходимости расчета пульсационных компонент или использования моделей турбулентности. Для определения режима движения вязкопластической жидкости вычисляют соответствующее число Рейнольдса по следующей формуле:

$$Re^* = \frac{\rho V d}{\eta \left(1 + \frac{\tau_0 d}{\eta V} \right)}. \quad (3.8)$$

В дальнейшем верхний индекс * записывать не будем, но речь будет идти именно о соответствующем для вязкопластической жидкости числе Рейнольдса.

В большинстве случаев геометрическая форма проточной части характеризуется большим количеством изменений площади поперечного сечения, и заранее неизвестно, какой тип течения реализуется. Особенно неопределенность проявляется при поворотах и при прохождении элементов с сужением поперечного сечения, где могут локально появляться числа Рейнольдса, соответствующие турбулентному движению жидкости. Таким образом, в дальнейшем будем записывать уравнения, соответствующие общему случаю турбулентного течения жидкости.

Проектируя уравнение системы (3.5) на оси координат с учетом реологической модели бингамовского пластика, получаем [8]:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial V_1}{\partial t} + V_1 \frac{\partial V_1}{\partial x} + V_2 \frac{\partial V_1}{\partial y} + V_3 \frac{\partial V_1}{\partial z} &= F_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\left(\frac{\eta}{\rho} + \frac{\tau_0}{\rho H} + \nu_t \right) \frac{\partial V_1}{\partial x} \right) + \\
&+ \frac{\partial}{\partial y} \left(\left(\frac{\eta}{\rho} + \frac{\tau_0}{\rho H} + \nu_t \right) \frac{\partial V_1}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\left(\frac{\eta}{\rho} + \frac{\tau_0}{\rho H} + \nu_t \right) \frac{\partial V_1}{\partial z} \right); \\
\frac{\partial V_2}{\partial t} + V_1 \frac{\partial V_2}{\partial x} + V_2 \frac{\partial V_2}{\partial y} + V_3 \frac{\partial V_2}{\partial z} &= F_y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\left(\frac{\eta}{\rho} + \frac{\tau_0}{\rho H} + \nu_t \right) \frac{\partial V_2}{\partial x} \right) + \\
&+ \frac{\partial}{\partial y} \left(\left(\frac{\eta}{\rho} + \frac{\tau_0}{\rho H} + \nu_t \right) \frac{\partial V_2}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\left(\frac{\eta}{\rho} + \frac{\tau_0}{\rho H} + \nu_t \right) \frac{\partial V_2}{\partial z} \right); \\
\frac{\partial V_3}{\partial t} + V_1 \frac{\partial V_3}{\partial x} + V_2 \frac{\partial V_3}{\partial y} + V_3 \frac{\partial V_3}{\partial z} &= F_z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\left(\frac{\eta}{\rho} + \frac{\tau_0}{\rho H} + \nu_t \right) \frac{\partial V_3}{\partial x} \right) + \\
&+ \frac{\partial}{\partial y} \left(\left(\frac{\eta}{\rho} + \frac{\tau_0}{\rho H} + \nu_t \right) \frac{\partial V_3}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\left(\frac{\eta}{\rho} + \frac{\tau_0}{\rho H} + \nu_t \right) \frac{\partial V_3}{\partial z} \right)
\end{aligned} \tag{3.9}$$

где ν_t – турбулентная кинематическая вязкость.

В настоящее время существует достаточно большое количество различных моделей турбулентности [132, 136, 140], успешно используемых для расчетов различных типов течения. Во многих работах проводят сравнение результатов [3, 6, 8, 273], полученных с помощью различных моделей турбулентности, и приходят к выводу, что одной из универсальных моделей является модель Ментера SST [8]. Эта модель имеет преимущество при моделировании приграничных течений и дает хорошие результаты для расчетов ограниченных стенками потоков [8], поскольку в нем нет недостатков, присущих семейству моделей Сафмена-Вилкокса (стандартная модель).

Осредненные характеристики турбулентности связаны с турбулентной вязкостью следующим соотношением [273]:

$$\nu_T = \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega, \Omega F_2)}, \tag{3.10}$$

где k – кинетическая энергия турбулентности; $a_1 = 0,31$ – эмпирический коэффициент; ω – удельная (в единице объема) скорость диссипации; Ω – абсолютна величина завихренности; F_2 – функция смешения:

$$F_2 = \tanh \left[\left[\max \left(\frac{2\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right) \right]^2 \right],$$

где y – расстояние от стенки; β^* – константа, которая равна 0,075.

С помощью уравнений переноса характеристик турбулентности можно описать изменение во времени и пространстве кинетической энергии турбулентности и удельной скорости ее диссипации [8, 264]:

$$\begin{cases} \frac{\partial k}{\partial t} + V_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = P_k - \beta^* k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\nu + \sigma_{k1} \nu_T) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right]; \\ \frac{\partial \omega}{\partial t} + V_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \alpha \Omega^2 - \beta \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\nu + \sigma_{\omega 1} \nu_T) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2(1 - F_1) \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, \end{cases} \quad (3.11)$$

где V_j – компоненты скорости; $P_k = \min \left(\tau_{ij} \frac{\partial V_i}{\partial x_j}, 10\beta^* k \omega \right)$ – генерационный

турбулентный член; $F_1 = \tanh \left\{ \min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right), \frac{4\sigma_{\omega 2} k}{CD_{k\omega} y^2} \right]^4 \right\}$ –

эмпирическая функция; $CD_{k\omega} = \max \left(2\rho\sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, 10^{-10} \right)$ – положительная

часть перекрестных диффузионных членов [8, 136].

Преимуществами данной модели турбулентности является нечувствительность к краевым условиям во внешнем потоке и учет влияния структуры турбулентности со стороны слоев жидкости, расположенных выше по течению [136].

Параметры $\tau_0, \eta(\mu_{cm})$ – начальное напряжение сдвига и структурная вязкость принимаются по результатам экспериментальных исследований относительно реологических параметров ТВУС.

Кроме того, для численного моделирования применяются универсальные «жесткие» граничные условия, позволяющие рассчитать поле течения.

На твердых стенках, учитывая прилипание жидкости, принимается следующее граничное условие:

$$\bar{V}|_b = 0.$$

Во входном сечении канала задается входная скорость:

$$V|_b = V_{in}.$$

В выходном сечении канала принимается равенство нулю статического давления:

$$p|_b = 0.$$

Для характеристик турбулентности на твердой поверхности принимаются следующие предельные условия [6]. Равенство нулю потока кинетической энергии турбулентности: $F_k = 0$.

Удельная скорость диссипации энергии турбулентности на жесткой стенке рассчитывается по зависимости [136]:

$$\omega = 10 \frac{6\nu}{\beta_1 (\Delta y)^2},$$

где Δy – приграничный шаг.

Во входном сечении канала удельную скорость диссипации рассчитывается по зависимости:

$$\omega_\infty = (1 \rightarrow 10) \frac{V}{L_\infty},$$

где L_∞ – ориентировочная длина расчетной области.

Во входном сечении кинетическая энергия турбулентности рассчитывается на основе вихревой вязкости:

$$k_\infty = \nu_{t_\infty} \omega_\infty,$$

где $\nu_{t_\infty} = 10^{-(2 \rightarrow 5)} \nu$ – вихревая вязкость во входном сечении.

Расчет течения водоугольного топлива каналом на предложенной математической модели занимает длительный промежуток времени, составляющий примерно 3 часа при использовании персонального компьютера средней мощности (CPU 5200 MHz, RAM 8192 Mb), что говорит о сложности процессов, описываемых ею и необходимости использования мощной компьютерной техники для расчета течения, особенно при сложных элементах сужения потоков или поворотов.

3.2 Характер течения ТВУС в кольцевой области потока

3.2.1 Течение топливной водоугольной суспензии с различной степенью разрушения структуры.

Системы, в которых жидкая фаза иммобилизована сплошной структурной сеткой, приобретают способность к течению только после разрушения сетки. Течение таких жидкостей начинается после приложения к ним напряжения сдвига большего, чем предельное напряжение сдвига τ_0 . Уравнение, описывающее течение вязкопластичных жидкостей, известно как уравнение Шведова–Бингама [285]:

$$\tau = \tau_0 + \eta(du/dr).$$

При рассмотрении кривых течения реальных вязкопластичных жидкостей можно наблюдать три характерные точки (рисунок 3.1): τ_c — напряжение сдвига, при котором начинается течение (статическое напряжение сдвига); τ_0

— динамическое (предельное) напряжение сдвига; τ_p — напряжение сдвига, при котором разрушение структуры заканчивается.

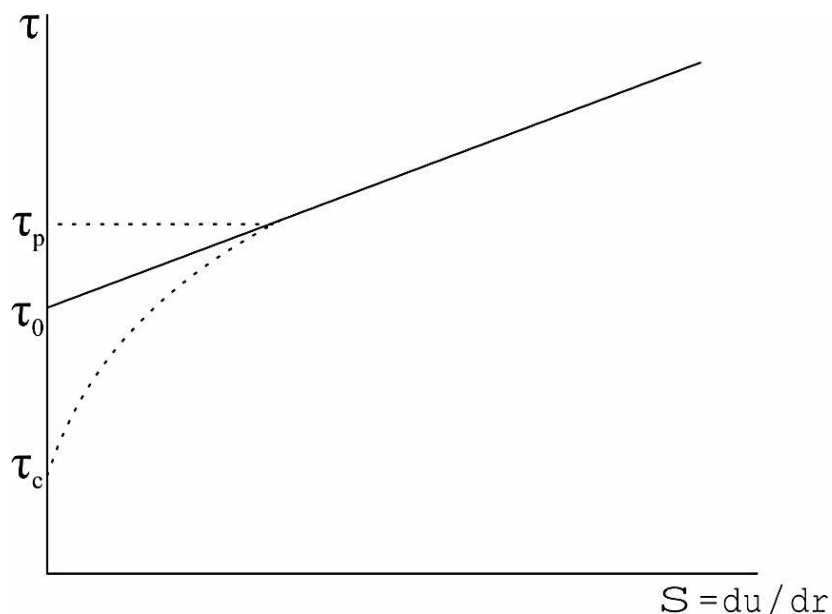


Рисунок 3.1 – Кривые течения реальных вязкопластичных жидкостей

Многочисленные исследования реологических моделей водоугольных суспензий высокой концентрации (ВСУВК) показывают, что они хорошо подчиняются модели Шведова–Бингама [251].

Разрушение коагуляционных структур, в отличие от разрушения хрупких кристаллизационных, имеет свои особенности. После приложения определенной нагрузки к жидкости, обладающей структурой коагуляционного происхождения, немедленного разрушения структуры не наблюдается; степень разрушения зависит не только от скорости сдвига, при которой происходит разрушение, но и от времени воздействия нагрузки [27]. Характерно, что после снятия нагрузки прочность структуры через определенное время восстанавливается полностью, а при уменьшении нагрузки — частично, до той степени разрушения, которая соответствует оставшейся уменьшенной нагрузке. Такая способность к самопроизвольному восстановлению структуры после ее разрушения называется тиксотропией.

Эпюры напряжений сдвига и скоростей течения представлены на рис. 3.2. В отличие от параболического распределения скоростей по всему сечению

трубы в случае ньютоновской жидкости, при течении вязкопластичной жидкости имеется бесдвиговая зона-ядро, напряжение сдвига τ в котором всюду меньше предельного напряжения сдвига τ_0 [29].

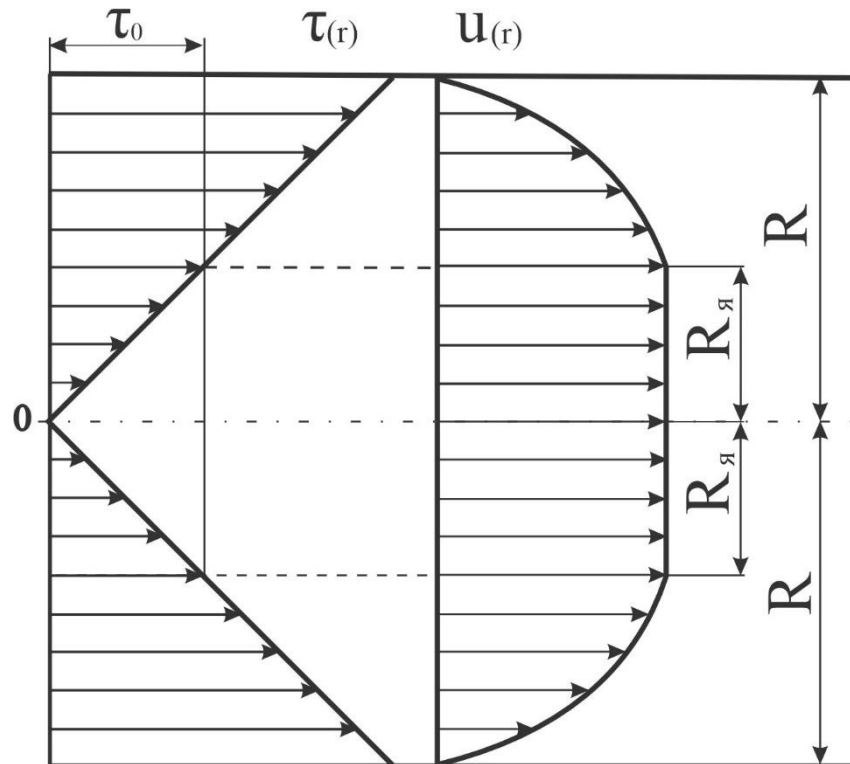


Рисунок 3.2 – Эпюры скоростей течения вязкопластической жидкости (ТВУС)

Влияние основных факторов на свойства и поведение ТВУС при перемещении по трубопроводам необходимо рассматривать с учетом основных вариантов взаимодействия зерен твердой фазы, расстояния между частицами коагуляционной структуры, характера и скорости течения.

В качестве одного из подходов при этом можно принять сравнение энергии связи частиц коагуляционной структуры ТВУС и внешней энергии потока, направленной на разрыв этой связи. В соответствии с теорией устойчивости лиофобных коллоидов (ДЛФО) суммарная энергия E_c взаимодействия двух сферических частиц в жидкости определяется уравнением

$$E_c = 2\pi\varepsilon_n r\phi_\delta^2 \cdot \ln[1 + \exp(-\chi h)] - \frac{rA}{12h}, \quad (3.12)$$

где ε_n – абсолютная диэлектрическая проницаемость воды, $7,26 \cdot 10^{-10}$ Ф/м; r – радиус сферических угольных частиц, м; φ_δ – потенциал диффузной частиц двойного электрического слоя (ДЭС) на поверхности угольных частиц, В; χ – обратный дебаевский радиус, в большинстве случаев $1 \cdot 10^{-8}$ м; h – расстояние между угольными частицами, м; A – константа Гамакера, Дж.

А энергия потока жидкости определяется по формуле [24, 121]

$$E_{\Pi} = 0,5\alpha\rho_0\Delta u^3St, \quad (3.13)$$

где α – коэффициент Кориолиса; ρ_0 – плотность жидкости; Δu – разность скоростей потоков, набегающих на две смежные частицы в коагуляционной структуре ВУТ; S – площадь поперечного сечения потока, набегающего на отдельную частицу; t – продолжительность действия потока.

Условием разрушения коагуляционной структуры ТВУС является неравенство

$$E_{\Pi} > E_C. \quad (3.14)$$

С учетом выражений для сил, входящих в условие (3.14), рассматриваемое неравенство можно записать в виде

$$\alpha\rho\Delta uSt > 4\pi\varepsilon_0\varepsilon\phi^2\delta l_n [1 + \exp(-\chi h)] - A\frac{r}{6h}. \quad (3.15)$$

Отсюда, для критической величины Δu , при которой наблюдается разрушение парных коагуляционных связей между смежными частицами твердой фазы ТВУС, которые могут находиться в первом или втором энергетическом минимуме кривых $E_C=f(h)$

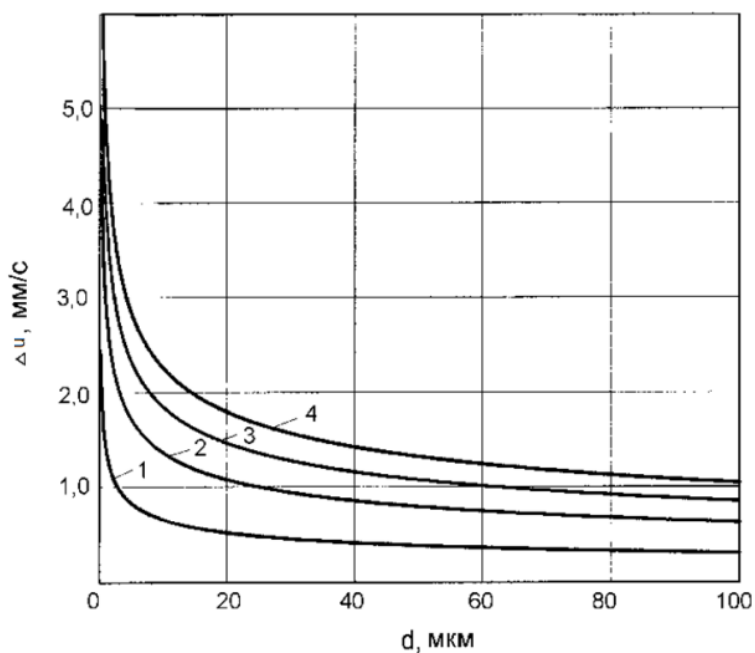
$$\Delta u = \sqrt[3]{\frac{2E_C}{\alpha \cdot \rho \cdot S \cdot t}}. \quad (3.16)$$

Для расчетов по первому энергетическому минимуму значения константы Гамакера (A) для поверхности частиц ТВУС можно принять в интервале $(0,3 \dots 5) \cdot 10^{-19}$ Дж ($A=1 \cdot 10^{-19}$ Дж); расстояние между частицами в коагуляционной структуре (необратимая коагуляция) $h=2$ нм, что соответствует

интервалу расстояний между частицами в первом потенциальном минимуме; диапазон крупности угольных частиц и соответственно сечения набегающего на них потока жидкости $2r=1-100$ мкм; диапазон изменения поверхностного потенциала угольных и минеральных частиц выбирается в пределах 50–100 мВ [24, 121]; коэффициент Кориолиса $\alpha=1,15$; плотность воды $\rho=1000$ кг/м³.

Полученные для этих условий кривые $\Delta u=f(d)$ (рис. 3.3), иллюстрируют две характерные для дисперсных систем тенденции.

Во-первых, возрастание потенциала поверхности угольных зерен приводит к укреплению коагуляционных структур, что, в свою очередь, требует большей энергии потока для их разрушения. Так, например, для частиц крупностью 20 нм в случае возрастания потенциала поверхности с 50 мВ до 200 мВ критическое значение Δu вырастает почти в четыре раза.



1 – 50 мВ; 2 – 100 мВ; 3 – 150 мВ; 4 – 200 мВ

Рисунок 3.3 - График зависимости скорости разрушения коагуляционных структур в случае фиксирования частиц в первом энергетическом минимуме при изменении потенциала из поверхности в пределах 50-200 мВ

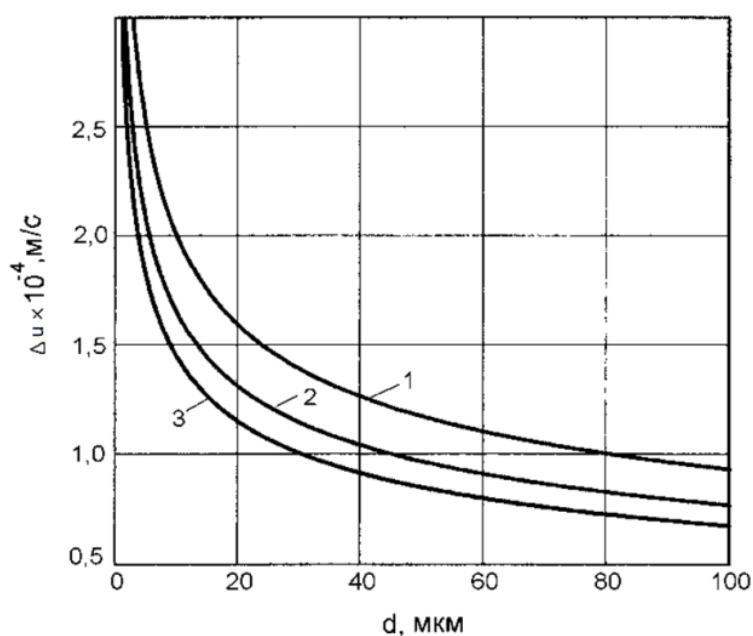
Во-вторых, четко прослеживается зависимость Δu от крупности частиц. Причем, в области тончайших частиц величина Δu , при которой наблюдается разрушение парных коагуляционных связей между смежными частицами

твёрдой фазы ТВУС, резко возрастает. Это соответствует классическим представлениям о коллоидных дисперсных системах.

Чем меньше крупность твёрдой фазы ТВУС, тем более прочными являются коагуляционные связи между частицами в первом энергетическом минимуме. Для практики приготовления и транспортирования таких ТВУС очень важным вопросом является стабильность начальных характеристик и определение условий разрушения необратимых коагуляционных структур.

Как правило, транспортирование ТВУС по трубопроводам осуществляется в ламинарном режиме течения [24, 25]. Анализ влияния фактора гетерогенности поверхности на энергетическое состояние частиц твёрдого материала ТВУС подтверждает, что с уменьшением константы Гамакера сила притяжения между частицами уменьшается, и они становятся менее гидрофобными. Агрегативная устойчивость повышается.

Важным аспектом исследований является изучение свойств тиксотропных структур ТВУС, образующихся благодаря фиксации частиц угля во втором энергетическом минимуме (рис. 3.4) [24].



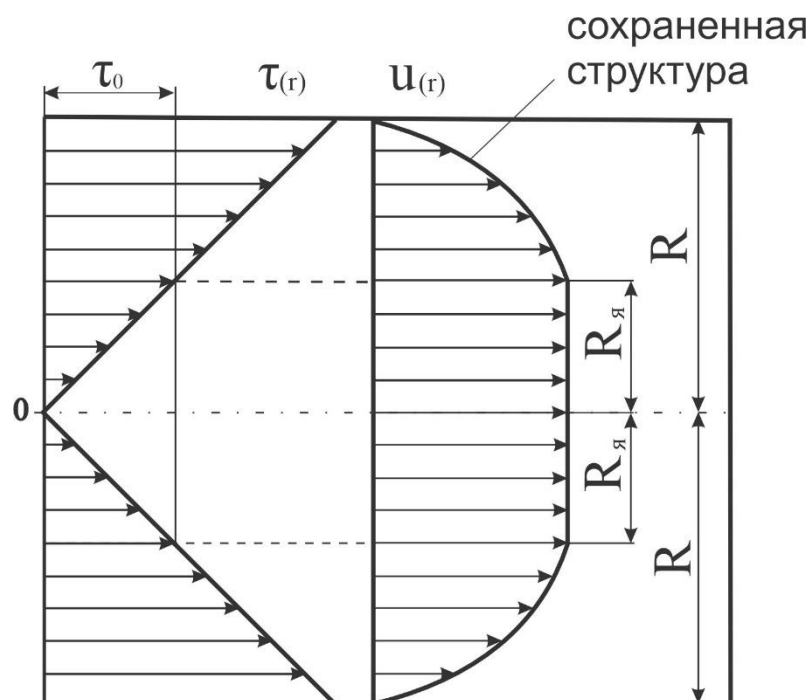
1 – 50 нм; 2 – 100 нм; 3 – 150 нм

Рисунок 3.4 - График зависимости скорости разрушения коагуляционных структур в случае фиксации частиц во втором энергетическом минимуме при расстоянии между ними

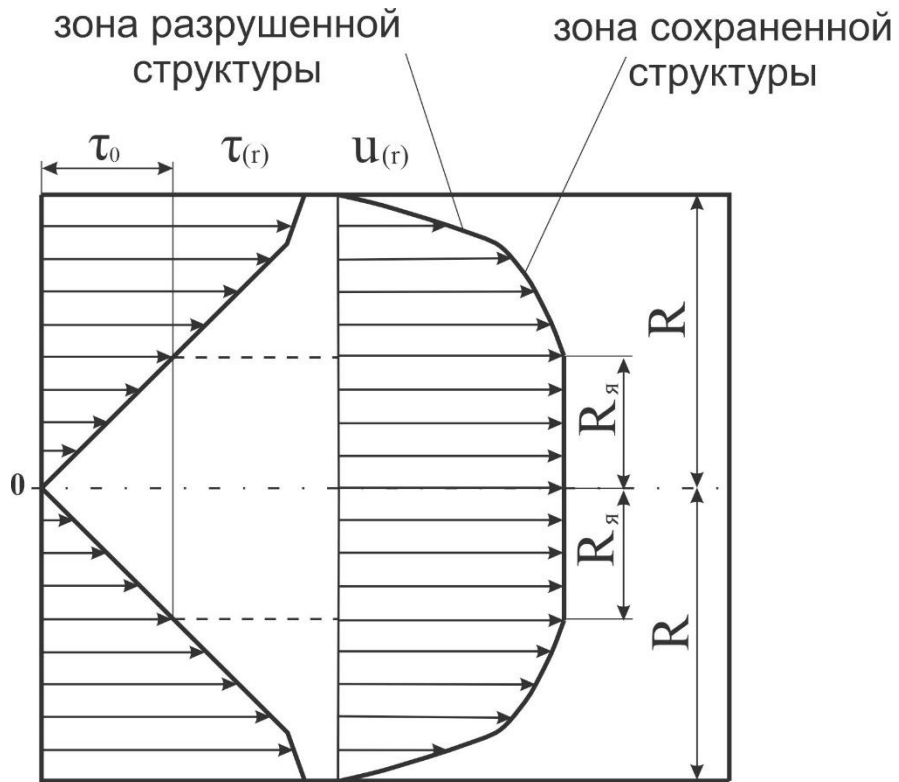
По данным исследований [24] фиксация частиц твердой фазы ТВУС во втором энергетическом минимуме наблюдается на расстояниях $h=50-150$ нм.

Из приведенных материалов видно, что при увеличении расстояния между частицами критическая величина Δu , ответственная за разрушение парных коагуляционных связей между смежными частицами, уменьшается. При этом критическая величина Δu для частиц крупностью $50-100$ мкм составляет $(5-10) \cdot 10^{-5}$ м/с, что практически совпадает с реальными значениями Δu в трубопроводе в области максимальных градиентов скорости потока.

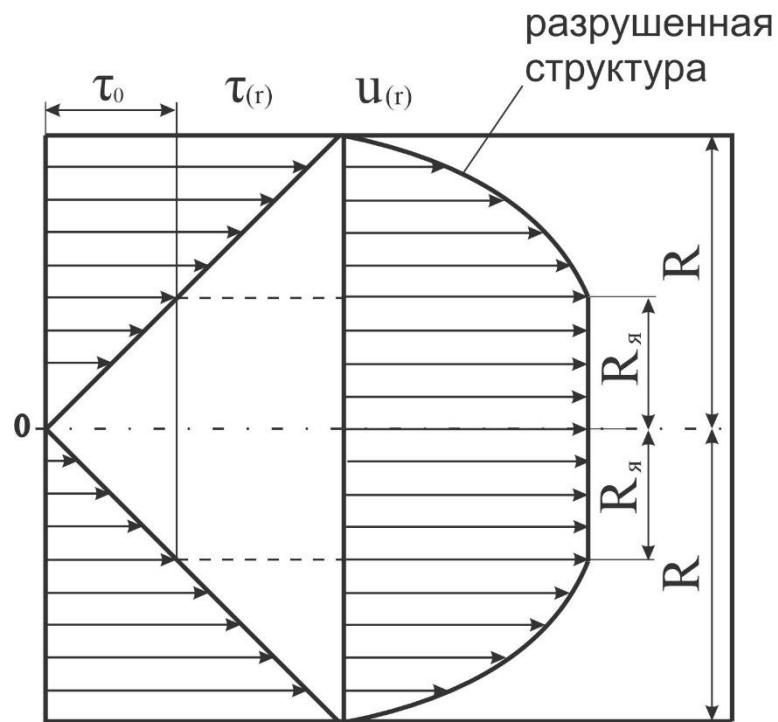
Исходя из указанного выше следует, что возможны три случая поведения водоугольной суспензии в кольцевой области потока: сохранении коагуляционных структур, их полное разрушение, а также режим частичное разрушение структуры в промежутке между ядром потока и стенкой трубопровода (рисунок 3.5 а, б, в).



а)



б)



в)

а – сохраненная коагуляционная структура; б – частично сохраненная коагуляционная структура; в – разрушенная коагуляционная структура

Рисунок 3.5 – Характер течения водоугольной суспензии в кольцевой области потока

Следует отметить, что все три случая реализуются в зависимости от режима транспортирования среды. При этом точность расчета расхода по уравнению Букингема будет снижаться тем больше, чем большая часть сечения будет находиться в структурном состоянии (при более высоких значениях начального напряжения сдвига и структурной вязкости).

3.2.2 Анализ параметров течения ТВУС по трубопроводу.

Во время движения бингамовского пластика наблюдается зона упругих деформаций (ядро потока), которая с ростом скорости течения уменьшается, при этом происходит полное либо частичное разрушение структуры дисперсной системы за счет роста градиента скорости сдвига. Для ВУТ (ТВУС) критическая величина сдвиговых деформаций $\dot{\gamma}$ равна 9 с^{-1} , что обуславливает необходимость определения доли площади сечения трубопровода, с реализуемыми значениями $\dot{\gamma}$ до указанного значения.

В качестве инструментальной среды для организации вычислений выбран Python 3.11. Для управления зависимостями и удобной установки необходимых пакетов, в среде Anaconda создано виртуальное окружение, в котором установлен Spider 5.1.5, а также дополнительные пакеты необходимые для работы программы [52, 252, 351].

Пакет Numpy используется для эффективной обработки массивов, Pandas – для удобной манипуляции с данными вычислений, Matplotlib [2, 69, 252] и Seaborn служат для визуализации результатов и построения диаграмм. Результаты вычислений записываются в формате xlsx (Приложение А).

Диапазоны изменений входных параметров принимали следующие значения: $\tau_0=1-30 \text{ Па}$, $\mu_{cm}(\eta)=0,2-1 \text{ Па}\cdot\text{с}$, диаметр трубопровода задавался через значения радиуса в диапазоне $R=0,025-0,25 \text{ м}$. Кроме того, потери энергии Δp задавались в виде удельных потерь давления $\Delta p/L$, диапазон составил от 15 до 1000 Па/м.

На ряду со значениями эпюры скоростей, производился расчет скоростей сдвига $\Delta V_{cдв}$ по следующей зависимости

$$\Delta V_{\text{сдв}} = u_{i+1} - u_i, \quad (3.17)$$

где u_i, u_{i+1} - значения скоростей на i -м и $(i+1)$ -м радиусе, м/с.

Также рассчитывалось значение средней скорости течения $u_{\text{ср}}$

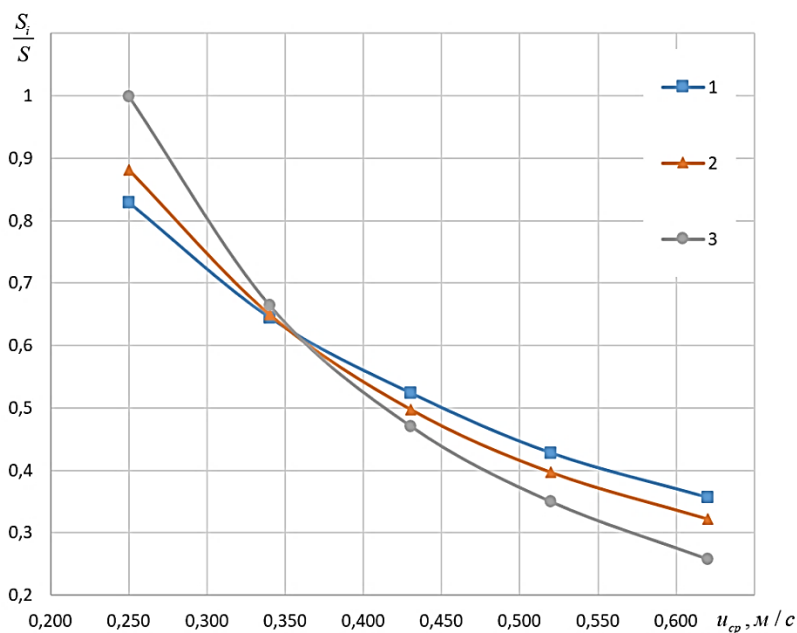
$$u_{\text{ср}} = \frac{\left(\sum_1^n \pi r_i \Delta r u_i + \pi R_{\text{я}}^2 u_{\text{я}} \right)}{\pi R^2}, \quad (3.18)$$

где r_i - i -й радиус трубопровода, м; Δr - шаг изменения радиуса, м; $R_{\text{я}}$ - радиус ядра потока, м; R - радиус трубопровода.

Также рассчитывались значения градиента скорости сдвига $\dot{\gamma}(r)$ для соответствующего радиуса трубопровода и средней скорости течения $u_{\text{ср}}$.

После выполнения вычислений все найденные подходящие векторы параметров и значения $u_{\text{ср}}$, а также значения радиусов сохраняются в файл модели для использования в дальнейшем анализе.

В результате, получены зависимости отношения площади сечения трубопровода с реализуемыми скоростями деформации менее $9 \text{ с}^{-1} S_i$ к общей площади сечения S (рис.3.6).



1 - $A^d=15\%$, $V^f=5\%$; $\Gamma=2$; 2 - $A^d=25\%$, $V^f=25\%$; $\Gamma=2$; 3 - $A^d=35\%$, $V^f=45\%$; $\Gamma=1$

Рисунок 3.6 – Зависимость площади сечения трубопровода с $\dot{\gamma} < 9 \text{ с}^{-1} S_i$ к общей площади сечения S для трубопровода диаметром $D=0,250$ м, $C=64,5\%$

Установлено (рис. 3.6), что при малых скоростях транспортирования величина площади трубопровода с реализуемыми скоростями сдвига менее 9 с^{-1} стремится к 1. С ростом средней скорости течения u_{cp} до максимальной рекомендуемой величины для данного диаметра трубопровода наблюдается снижение ее доли до 0,26 (26%), что обуславливает необходимость учета специфики движения данной зоны при расчете потерь давления.

3.3 Модель движения ТВУС по трубопроводу

3.3.1 Физико-математическая модель течения вязкой среды.

Для определения зависимости между удельными потерями давления (I) и расходом среды (концентрированных суспензий) используют аналитическое интегрирование местной скорости потока в трубопроводе, при этом скорость определяют из баланса сил вязкого трения, действующих на боковую поверхность внутреннего цилиндра длиной L (с радиусом r , меньшим радиуса трубопровода R) и перепадом давления Δp , действующего на торцы того же цилиндра [1, 57, 98, 188]. В виде, соответствующем физике процесса, этот баланс составляет соотношение

$$\pi r^2 \Delta p = 2\pi r L \tau .$$

Скорость находят интегрированием уравнения Ньютона $\tau = \mu \frac{du}{dr} = \mu \dot{\gamma}$,

записанного с учетом приведенного выше соотношения, переписанного для τ :

$$du = \frac{\Delta p r}{2L\eta} dr . \quad (3.17)$$

Поскольку для внутритрубного течения концентрированных водоугольных суспензий характерным является наличие центрального ядра, в поперечном сечении которого напряжение сдвига распределено от 0 до значения начального τ_0 , физике процесса соответствует, практически наряду с

законом Ньютона, реологическая модель Шведова-Бингама. В ней напряжение сдвига, так же, как и для ньютоновских жидкостей является функцией градиента скорости движения \dot{u} и зависят от двух реологических параметров – пластической вязкости η и начального напряжения сдвига τ_0

$$\begin{aligned}\tau &= \eta(\dot{u}) + \tau_0; \\ \dot{u} &= 0 \text{ при } \tau \leq \tau_0.\end{aligned}\quad (3.18)$$

Аналогичное (3.17) соотношение для вязкопластической жидкости получают в виде

$$du = \frac{\Delta p r}{2L\eta} dr - \frac{\tau_0}{\eta} dr. \quad (3.19)$$

Таким образом, поскольку в модели Шведова-Бингама, как и в законе Ньютона напряжение сдвига и вязкость имеют физические размерности, соответственно $\frac{H}{m^2}$ (Па) и $H/m^2 \frac{H \cdot c \cdot m}{m^2 \cdot m} = \frac{H \cdot c}{m^2}$ (Па с), и, как и размерности, четкий физический смысл: соответственно сила, действующая на m^2 поверхности движущихся взаимно соприкасающихся слоев сплошной среды и аналогичная сила, действующая при единичной угловой скорости сдвига $\dot{\gamma}$ (1/с), данная модель может быть принята для вязкопластических сред в качестве реологического закона.

С учетом изложенного выше, вполне корректным представляется определение реологических характеристик водоугольного топлива из углей Донбасского региона посредством математически планируемых экспериментов. Осмелимся также выразить уверенность в том, что такой подход к получению «реологических моделей» для определения реологических показателей твердожидкостных суспензий, связанных в группу определенными качествами, является существенно более научно-обоснованным в сравнении с разнородными источниками получения соотношений такого типа.

Указанный метод получения численных данных о реологических показателях концентрированных водоугольных суспензий при настоящем

уровне физических знаний о такого рода средах следует признать наиболее корректным и научно обоснованным (по крайней мере в сравнении с известными). Для восприятия геометрического изображения результатов планируемого эксперимента и облегчения анализа его результатов целесообразным представляется ограничение числа переменных в уравнении регрессии (число факторов, учитываемых при его проведении) пятью.

При использовании предложенного метода, в результате научно обоснованного учета основных существенных факторов, влияющих на вязкость исследуемых суспензий, ее значения в максимальной степени приближены к ее реальным значениям, реализуемым в ходе физического процесса транспортирования, и поэтому, с некоторой погрешностью, могут быть подставлены в реологический закон Шведова-Бингама в качестве эффективной вязкости. При этом, равенство размерностей слева и справа от знака равенства вследствие определения в ходе планируемых экспериментов физической (динамической) вязкости можно считать обеспеченным.

Вследствие криволинейности геометрических форм представлений напряжения сдвига и вязкости (особенно в начальной области факторного пространства) квадрата для функции отклика имеет вид [98]:

$$\Phi(x_i) = a_0 + \sum_{i=1}^5 a_i x_i + \sum_{\substack{i=1 \\ j=1}}^{i=5} a_{ii,j} x_i^2 x_j + \sum_{i=1}^{i=5} a_{ii} x_i^2. \quad (3.20)$$

При этом, точность вычисления реологических параметров по уравнениям регрессии определяется методами математической статистики, что исключительно важно для нахождения верхнего и нижнего пределов расхода водоугольной суспензии, без чего проектирование рациональной технологии его транспортирования не представляется возможным.

Кажущаяся сложность расчета по выражению (3.20) легко преодолевается использованием ПК для вычислительных операций.

Легко видеть, что начальное напряжение сдвига (фактическое) τ_0 получают подстановкой в данное выражение нулевого значения градиента скорости.

Таким образом, связь между реологическими параметрами τ и η получим при подстановке $\Phi(x_i)$ из (3.20) в уравнение (3.19)

$$du = \frac{\Delta p r}{2L\Phi} dr - \frac{\tau_0}{\Phi} dr.$$

При переходе к виду, пригодному для численного интегрирования, имеем:

$$\frac{du}{dr} = \frac{\Delta p r}{2L\Phi} - \frac{\tau_0}{\Phi}. \quad (3.21)$$

Для напряжения сдвига на стенке и радиуса ядра используем известные соотношения:

$$\tau_{cm} = \frac{R\Delta p}{2L} \text{ и } R_{я} = \frac{\tau_0 R}{\tau_{cm}} = \frac{2L\tau_0}{\Delta p} \text{ соответственно.}$$

С учетом приведенных выражений правая часть дифференциального уравнения (3.21) является постоянной для текущего радиуса интегрирования r_m , (где m – число предыдущих шагов интегрирования). Таким образом, для каждого текущего шага численного интегрирования уравнение (3.21) представимо в виде

$$\frac{du}{dr} = A,$$

где A – постоянная величина.

Значение местной скорости потока по радиусу r трубопровода u_r и расход жидкости Q находим двукратным последовательным численным интегрированием вдоль данного радиуса в пределах от R до $R_{я}$. При этом параллельно последовательным суммированием шагов по радиусу Δr текущее значение радиуса r_m .

Результатом указанной последовательности вычислительных операций является получение соотношения между расходом Q и текущими задаваемыми удельными потерями давления $\frac{\Delta p}{L}$, аналогичного уравнению Букингема

$$Q = F\left(\frac{\Delta p}{L}, \eta, \tau_0, R\right),$$

но при значениях реологических характеристик, определяемых из уравнений регрессии типа (3.20).

Предложен и обоснован метод расчета внутритрубного течения концентрированных водоугольных суспензий, к которым относимо водоугольное топливо, заключающийся в определении ее эффективной вязкости и напряжения сдвига методом планируемого пятифакторного эксперимента с последующей подстановкой данного реологического параметра в уравнение Ньютона, записанное в дифференциальной форме, приведении его к виду, пригодному для численного интегрирования, и решении этого уравнения методами вычислительной математики.

В качестве факторов, реализуемых и контролируемых при проведении планируемого эксперимента, предложены концентрация твердой фазы, градиент скорости сдвига, зольность твердого компонента (угля), выход летучих веществ и критерий бимодальности.

Начальное напряжение сдвига τ_0 при проведении расчетов определялось посредством подстановки в уравнение регрессии, являющееся результатом планируемого эксперимента, нулевого значения градиента скорости.

Определение соотношения между расходом среды в трубопроводе и удельными потерями давления (типа уравнения Букингема) предложено проводить посредством двукратного численного интегрирования полученного уравнения Ньютона в дифференциальном виде по радиусу трубы с параллельным вычислением его текущего значения.

3.3.2 Физико-математическая модель течения ТВУС по трубопроводу.

Наиболее важной из ныне существующих проблем в области технологий ВУТ является несовершенство математического аппарата описания течения таких сред. Для описания движения водоугольной суспензии зачастую используют модифицированные уравнения Навье-Стокса, Гагена-Пуайзеля и Букингема. Следует отметить, что из-за значительной вязкости транспортирование концентрированных водоугольных сред, к которым относится и водоугольное топливо (водоугольная суспензия), целесообразно с небольшими скоростями от 0,05 до 1 м/с, в зависимости от диаметра трубопровода, при этом градиент скорости сдвига колеблется в пределах от 9 до 20 с⁻¹ [203]. При этом величина числа Рейнольдса находится значительно ниже отметки 2300, а реализуемый режим течения исключительно ламинарный. Кроме того, отсутствует учет потерь энергии внутри слоя ВУТ, а также сил внутреннего трения движущихся слоев концентрированной среды.

Всеми без исключения авторами отмечается значительная нелинейность зависимости величины касательного напряжения от скорости сдвига на участке от 0 до 9 с⁻¹ [17, 27, 57, 96, 123, 197]. При этом, в условиях рекомендуемых скоростей транспортирования концентрированных водоугольных сред, на площади до 60% сечения трубопровода реализуются скорости сдвига указанного участка.

В связи с чем, совершенствование теоретических основ движения концентрированных водоугольных суспензий является актуальным.

Поскольку существующие классические модели течения вязких жидкостей как ньютоновских (Пуазейля), Навье-Стокса, так и вязкопластических (Букингема), не всегда и не вполне адекватно описывают их наиболее существенную характеристику: связь потери давления с расходом при внутритрубном течении, примем несколько иную концепцию силового взаимодействия сил статического давления с силами вязкого внутреннего сопротивления, в сравнении с общепринятой [93].

Приравняем силу давления, действующую на круг поперечного сечения жидкости радиуса r силе вязкого сопротивления, обусловленной взаимным трением слоев жидкости от центра трубы до границ круга на образованные данными слоями условные цилиндры.

Такой механизм силового взаимодействия может быть справедливым вследствие неполной передачи сил реакции на давление внутренних слоев к внешним, обусловленной их взаимным движением.

В то же время, закон Ньютона [57], непосредственно связывающий кинематические, динамические и реологические показатели течения ТВУС, представляет реальную основу для построения математической модели, адекватно описывающей данное явление в применении к внутритрубному напорному течению вязкопластической жидкости, и ее аналитической реализации.

При выводе уравнений математической модели (по аналогии с выводом уравнения Букингема) необходимо лишь учесть наличие сил внутреннего трения в высококонцентрированной суспензии, возникающих вследствие конечных размеров трубопровода (в ротационном вискозиметре напряжение сдвига определяют для очень тонкого слоя жидкости, где силы внутреннего трения не имеют геометрических условий для возникновения). В предлагаемом решении данный эффект учитывается введением коэффициента k , который отражает относительную долю потерь работы сил давления на преодоление указанных сил вязкости и поэтому является размерным (Па с/Па м). Кроме этого, целесообразно моделировать реальную физическую модель силового взаимодействия произвольного слоя жидкости с соседними слоями и с силами внешнего давления (рис. 3.7).

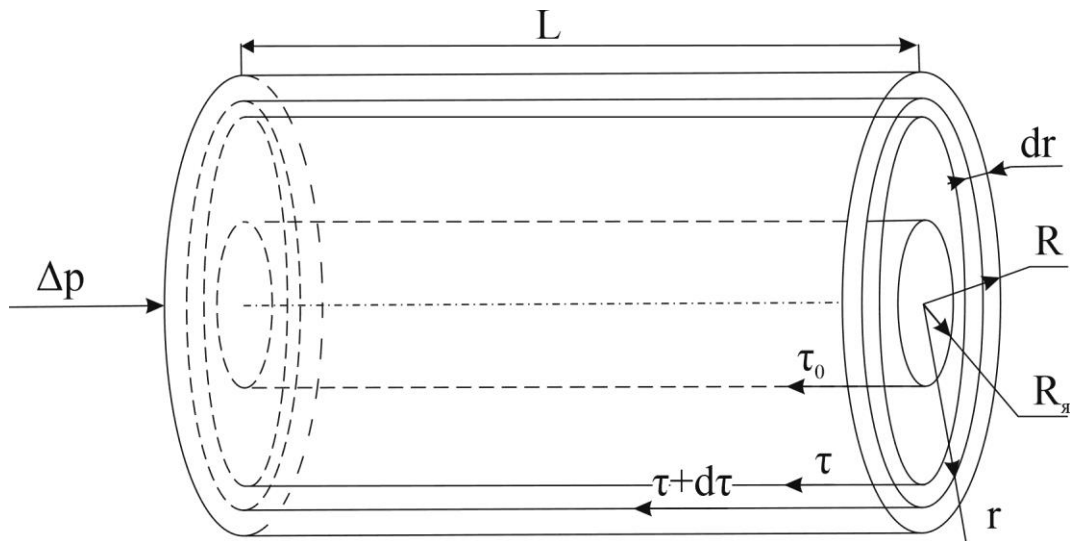


Рисунок 3.7 – Модель силового взаимодействия произвольного слоя жидкости с соседними слоями и с силами внешнего давления

Положение о том, что силы давления, действующие на поперечное сечение (торец) произвольного движущего цилиндра ТВУС длиной L , уравниваются силами напряжения сдвига на его поверхности, представляется недостаточно обоснованным ввиду взаимного сдвига внутренних слоев, сопровождающимся энергетическим, а значит и силовым взаимодействием, которое учтено в предлагаемой математической модели.

При воздействии давления Δp на цилиндр произвольного радиуса r , в движущейся равномерно вязкой жидкости по трубопроводу радиуса R , характерно наличие внутри сил вязкого трения, представленных величиной τ_0 для ядра потока радиусом $R_{я}$ и величиной касательного напряжения τ , для кольцевой области потока. При изменении цилиндра текущего радиуса r на величину dr величина касательного напряжения изменяется на величину $d\tau$.

При выводе уравнения предполагается равенство сил давления в трубопроводе силам трения между слоями жидкой среды, которые имеют градиент скорости линейного движения du/dr . Удельной характеристикой данных сил внешнего трения указанных слоев является напряжение сдвига τ .

Это предположение в отношении i -го слоя выражается следующим уравнением

$$2\pi \cdot \Delta p \cdot r dr = 2\pi r L \cdot (\tau + \Delta \tau)(r + \Delta r) - 2\pi r \cdot \tau \cdot r \cdot L, \quad (3.22)$$

где Δp – перепад давления, Па; r – расстояние трущегося слоя от центра трубопровода (радиус кольца), м; Δr – расстояние между слоями трущейся жидкости (толщина кольца), м; L – длина трущихся слоев, м; τ – напряжение сдвига, Па; $\Delta\tau$ – величина изменения напряжения сдвига, Па; dr – приращение радиуса, м.

И после перемножения соответствующих членов

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

Убрав члены высшего порядка малости, и проведя сокращение, получаем:

$$2\pi \cdot \Delta p \cdot r dr = 2\pi r L \cdot (\Delta\tau \cdot r + \tau \cdot \Delta r).$$

Учитывая крайнюю малость принятого приращения Δr , пренебрегаем соответствующими членами, а $r \cdot \Delta\tau$, переходя к дифференциалам, преобразуем к виду $r \cdot d\tau$. Учитывая уравнение Ньютона

$$d\tau = \mu_{cm} \frac{d^2 u}{dr^2} dr, \quad (3.23)$$

где μ_{cm} – структурная вязкость. Па·с.

Суммарная сила противодействия сил трения всех j слоев среды, составляющих радиус r_j , силам давления составит с учетом представления r_j в

виде $\sum_1^j r_j$ ($j=1\dots i$)

$$\sum F_{тр} = 2\pi\mu_{cm}L \sum_1^j r_j \frac{d^2 u}{dr^2}, \quad (3.24)$$

и представляя сумму $\sum_1^j r_j$ в виде произведения суммы членов натурального

ряда от 1 до j на dr , как $\frac{j^2 + j}{2} dr$, получим

$$\begin{aligned}
\sum F_{mp_j} &= 2\pi\mu_{cm}drL\frac{d^2u}{dr}\left(\frac{j^2+j}{2}\right)= \\
&= \pi\mu_{cm}Ld^2u\left(\frac{r_j^2}{dr^2}+\frac{r_j}{dr}\right)= \\
&= \pi\mu_{cm}Ld^2u\frac{r_j}{dr}\left(\frac{r_j}{dr}+1\right),
\end{aligned} \tag{3.25}$$

Далее пренебрегая 1 в сравнении с r/dr запишем

$$\sum F_{mp_j} = \pi\mu_{cm}Ld^2u\frac{r_j^2}{dr^2}. \tag{3.26}$$

Таким образом, уравнение (3.22) преобразовано к виду

$$\frac{\pi\Delta p r_j^2}{\mu_{cm}L} drdr = \pi r_j^2 du \cdot du.$$

$$\frac{\Delta p}{\mu_{cm}L} drdr = du \cdot du$$

Для учета сил трения внутри слоя введем коэффициент k :

$$(k_0 - k) \frac{\Delta p}{\mu_{cm}L} drdr = du \cdot du, \tag{3.27}$$

где значение $k_0=1$.

Интегрируя выражение (3.27), получаем:

$$(k_0 - k) \frac{\Delta p}{\mu_{cm}L} r dr = u + C. \tag{3.28}$$

В результате предложенного механизма взаимодействия сил давления и вязкого трения приходим к понятию осредненного напряжения сдвига, действующего на слой жидкости толщиной dr . Поскольку суммарная поверхность таких слоев близка к бесконечности, то и r имеет порядок dr .

Равенство $C=0$ не вызывает сомнений, так как множитель $dr = 0$.

Таким образом, после первого интегрирования получаем выражение (3.28). Имеющийся в левой части дифференциал dr указывает на

необходимость продолжения интегрирования данного выражения. Предположим, вследствие незнания уравнения для реальной связи между левой и правой частями данного выражения в дифференциальной форме наиболее простой вид:

$$(k_0 - k) \frac{\Delta p}{\mu_{cm} L} r dr = u du.$$

Интегрируем далее:

$$u^2 = (k_0 - k) \frac{\Delta p}{\mu_{cm} L} r^2 + C; \quad C = -(k_0 - k) \frac{\Delta p}{\mu_{cm} L} R^2,$$

где R – радиус трубопровода, м.

С учетом разнонаправленности возрастания u и r получим уравнения для скорости течения ТВУС

$$u = \sqrt{(k_0 - k) \frac{\Delta p}{\mu_{cm} L} \sqrt{R^2 - r^2}}. \quad (3.29)$$

Далее, определяем расход суспензии

$$\begin{aligned} Q &= 2\pi \sqrt{(k_0 - k) \frac{\Delta p}{\mu_{cm} L}} \cdot \int_0^R r \sqrt{R^2 - r^2} dr = \\ &= \frac{2}{3} \pi \sqrt{(k_0 - k) \frac{\Delta p}{\mu_{cm} L}} \cdot \sqrt{(R^2 - 0)^3} = \\ &= \frac{2\pi}{3} R^3 \sqrt{(k_0 - k) \frac{\Delta p}{\mu_{cm} L}}. \end{aligned} \quad (3.30)$$

Произведем аналогичные рассуждения для случая течения вязкопластичной жидкости с центральным изокинетическим ядром ($u = u_y = const$), размеры которого определены начальным напряжением сдвига τ_0 . При этом, вследствие взаимной неподвижности слоев жидкости в пределах

ядра радиуса R_y его размер $R_y = \frac{2L\tau_0}{\Delta p}$.

Прибавляем силу давления, действующую на периферийную зону течения вне ядра суммарной силе жидкого трения между взаимно движущимися слоями:

$$\Delta p \pi (r^2 - R_{\text{я}}^2) = \tau \frac{1}{2} 2\pi \Delta r L \left\{ \left[\left(\frac{r}{\Delta r} \right)^2 + \frac{r}{\Delta r} \right] - \left[\left(\frac{R_{\text{я}}}{\Delta r} \right)^2 + \frac{R_{\text{я}}}{\Delta r} \right] \right\},$$

$$\Delta p (r^2 - R_{\text{я}}^2) = \tau L \left[\left[r \left(\frac{r}{\Delta r} + 1 \right) \right] - \left[R_{\text{я}} \left(\frac{R_{\text{я}}}{\Delta r} + 1 \right) \right] \right] = \tau L \left(\frac{r^2}{\Delta r} - \frac{R_{\text{я}}^2}{\Delta r} \right).$$

Вынося в знаменателе правой части Δr за скобки и сокращая, получим:

$$\tau = \frac{dr \Delta p}{L} = \tau_0 + \mu_{cm} \frac{du}{dr}, \quad (3.31)$$

где τ_0 – начальное напряжение сдвига, Па.

Продолжая выкладки аналогично вышеизложенному имеем:

$$du \cdot du = (k_0 - k) \left(\frac{dr dr \Delta p}{L \mu_{cm}} - \frac{\tau_0}{\mu_{cm}} dr \right),$$

$$u du = (k_0 - k) \left(\frac{\Delta p}{L \mu_{cm}} r dr - \frac{\tau_0}{\mu_{cm}} r \right),$$

$$u^2 = (k_0 - k) \left(\frac{\Delta p}{L \mu_{cm}} r^2 - \frac{2\tau_0}{\mu_{cm}} r \right) + C,$$

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

Таким образом, получаем выражение для местной скорости течения жидкости в кольцевой области потока между ядром и стенкой трубопровода в следующем виде:

$$\begin{aligned}
u &= \sqrt{(k_0 - k) \frac{\Delta p}{L \mu_{cm}} (R^2 - r^2) - (k_0 - k) \frac{2\tau_0}{\mu_{cm} (R - r)} (R^2 - r^2)} = \\
&= \sqrt{\left((k_0 - k) \frac{\Delta p}{L \mu_{cm}} - (k_0 - k) \frac{2\tau_0}{\mu_{cm} (R - r)} \right) \cdot (R^2 - r^2)} = \\
&= \sqrt{(k_0 - k) \left(\frac{\Delta p}{\mu_{cm} L} - \frac{2\tau_0}{\mu_{cm} (R - r)} \right) \cdot (R^2 - r^2)}.
\end{aligned} \tag{3.32}$$

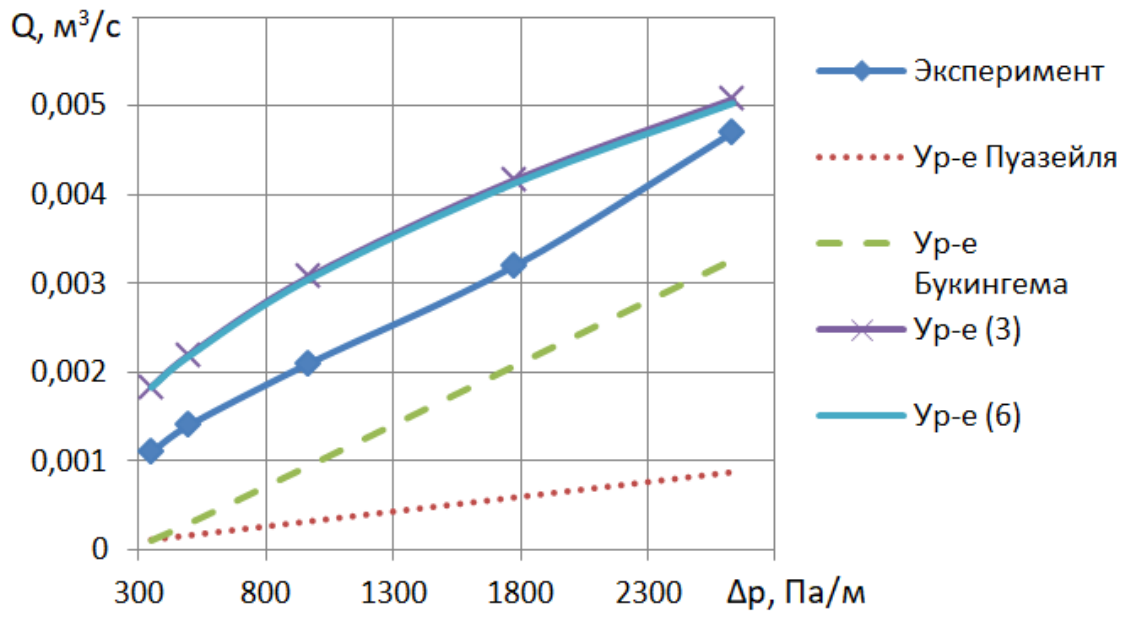
При этом, скорость ядра может быть найдена из выражения:

$$u_{\text{я}} = \sqrt{(k_0 - k) \left(\frac{\Delta p}{\mu_{cm} L} - \frac{2\tau_0}{\mu_{cm} (R - R_{\text{я}})} \right) (R^2 - R_{\text{я}}^2)}. \tag{3.33}$$

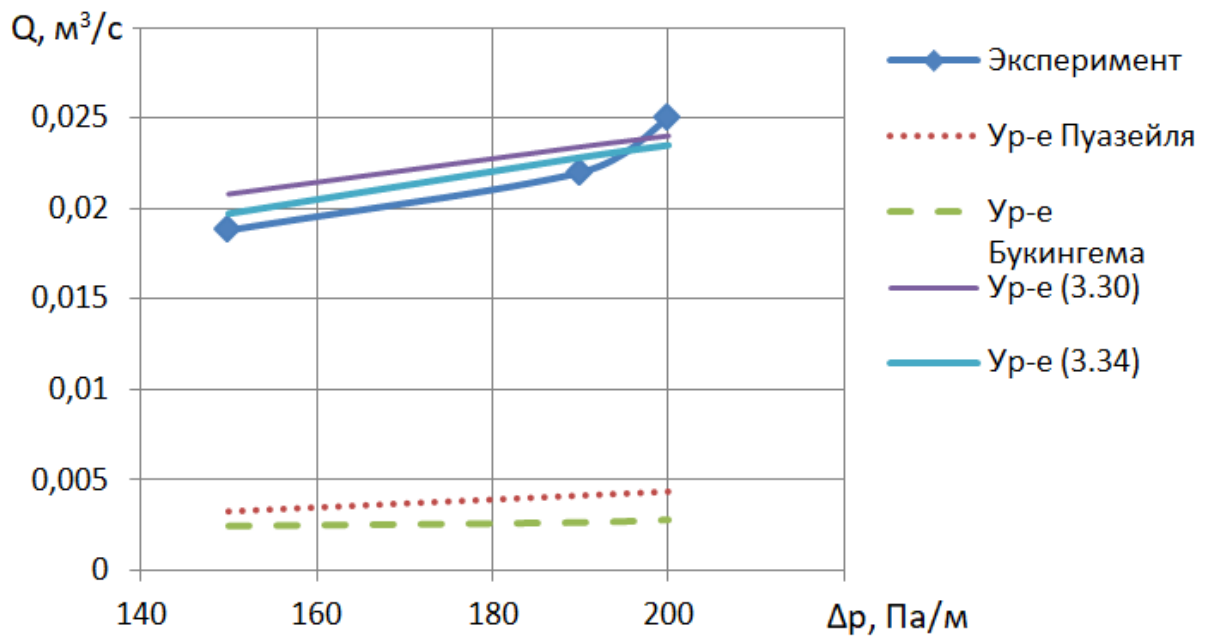
Для течения с ядром:

$$\begin{aligned}
Q_{\text{ТВУС}} &= \pi R_{\text{я}}^2 u_{\text{я}} + 2\pi \int_{R_{\text{я}}}^R \sqrt{(k_0 - k) \left(\frac{\Delta p}{\mu_{cm} L} - \frac{2\tau_0}{\mu_{cm} (R - R_{\text{я}})} \right)} \cdot r \sqrt{R^2 - r^2} dr = \\
&= \pi \left(\frac{2\tau_0 L}{\Delta p} \right)^2 \sqrt{(k_0 - k) \left(\frac{\Delta p}{\mu_{cm} L} - \frac{2\tau_0}{\mu_{cm} (R - R_{\text{я}})} \right) \left[R^2 - \left(\frac{2\tau_0 L}{\Delta p} \right)^2 \right]} + \\
&\quad + \frac{2\pi}{3} \sqrt{(k_0 - k) \left(\frac{\Delta p}{L \mu_{cm}} - \frac{2\tau_0}{\mu_{cm} (R - R_{\text{я}})} \right) \left[R^2 - \left(\frac{2\tau_0 L}{\Delta p} \right)^2 \right]^3}.
\end{aligned} \tag{3.34}$$

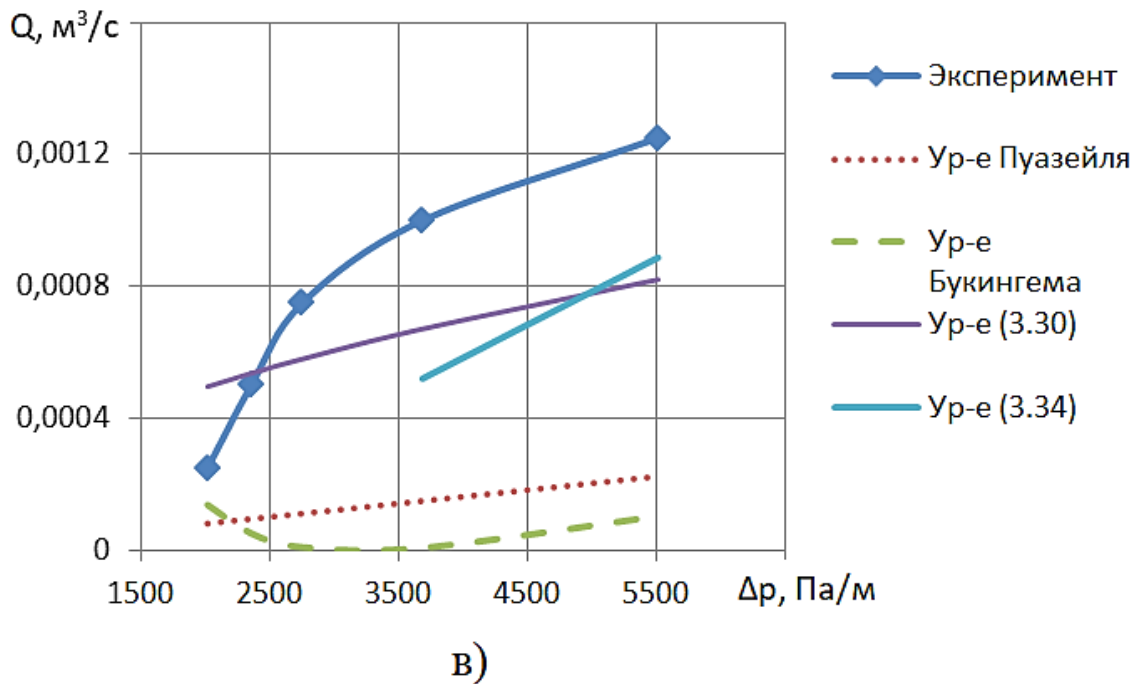
Результаты апробации определения расхода ТВУС по выражению (3.34) на дисперсии с содержанием твердого 60% и средневесовым диаметром частиц $d_{cp}=60$ мкм, а также сравнения итогов расчетов на опубликованных результатах исследований М.П. Барановой [17] и П.С. Чеснокова [260], в сравнении с классическими зависимостями Пуазейля и Букингема, представлены на рисунке 3.8 (а, б, в).



а)



б)



а) при течении пробной дисперсной среды; б) при течении ТВУС (М.П. Барановой);
в) при течении ТВУС (П.С. Чеснокова)

Рисунок 3.8 – Зависимость расхода ТВУС от удельных потерь давления

Приведенные зависимости позволяют установить, что предложенные уравнения для расчета расхода жидкости по величине потерь давления для стержневого и бес стержневого течения позволяют получить более точные результаты расчёта. Величина отклонения во многом зависит от точности определения реологических характеристик движущейся среды и ее скорости.

Следует отметить, что наряду с развитием математической модели высококонцентрированных дисперсных сред для повышения точности расчета необходим учет динамически изменяющихся от скорости сдвига касательных напряжений $\tau=f(\dot{\gamma})$ и эффективной вязкости $\mu_3=f(\dot{\gamma})$. С этой целью проведены реологические исследования, представленные в главе 4 п. 4.3.

При этом, пересчет вязкостных характеристик отслюа к слою осуществляется по следующей методике.

Производится расчет структурной вязкости в ядре $\mu_я$

$$\mu_я = \left. \frac{\partial \tau}{\partial \dot{\gamma}} \right|_{\dot{\gamma}=0} .$$

Расчет начального напряжения сдвига в ядре $\tau_{0_я}$

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

Радиус ядра $r_я$

$$r_я = \frac{\tau_0 2L}{\Delta p}.$$

Далее для 1-й точки от ядра к стенке:

$$\mu_1^1 = \mu_я + (-0,292) \cdot \frac{1}{\mu_я} \frac{\Delta p}{2L} dr,$$

$$\dot{\gamma}_1^1 = \frac{1}{\mu_1^1} \frac{\Delta p}{2L} dr,$$

$$F_1^1 = \frac{1}{\mu_1^1} \frac{\Delta p}{2L} (-0,292),$$

$$F_1 = \frac{1}{2} (F_0 + F_1^1),$$

$$\mu_1 = \mu_я + F_1 dr,$$

$$\dot{\gamma}_1 = \frac{1}{\mu_1} \frac{\Delta p}{2L} dr.$$

Далее определяем τ_{0l} для 1-й точки:

$$\mu_{s1} = \mu(\dot{\gamma}_1);$$

$$\tau_{01} = (\mu_{s1} - \mu_1) \dot{\gamma}_1.$$

Для 2-й точки предыдущие значения выступают в качестве начальных.

Расчет осуществляется до тех пор, пока $r_i < R$.

Величина касательного напряжения и эффективной вязкости пересчитываются с учетом фактического значения скорости сдвига.

Так как величина вязкостных сил зависит от скорости сдвиговых деформаций, для их определения в соответствующем слое необходимо

применение различных численных методов. Блок-схема соответствующего алгоритма представлена на рисунке 3.9 и реализована в виде программы для ПК (Приложение Б).

Для проверки адекватности представленных моделей течения водоугольных суспензий произведен расчет расхода ТВУС согласно классической модели Букингема, модели Букингема с динамически изменяющимися реологическими характеристиками и авторской модели согласно зависимости (3.34), а также сравнение полученных результатов с экспериментальными данными при транспортировании угля марки Д по трубопроводу диаметром 80 мм с концентрацией твердой фазы 62% [123] (табл. 3.1, рис. 3.10).

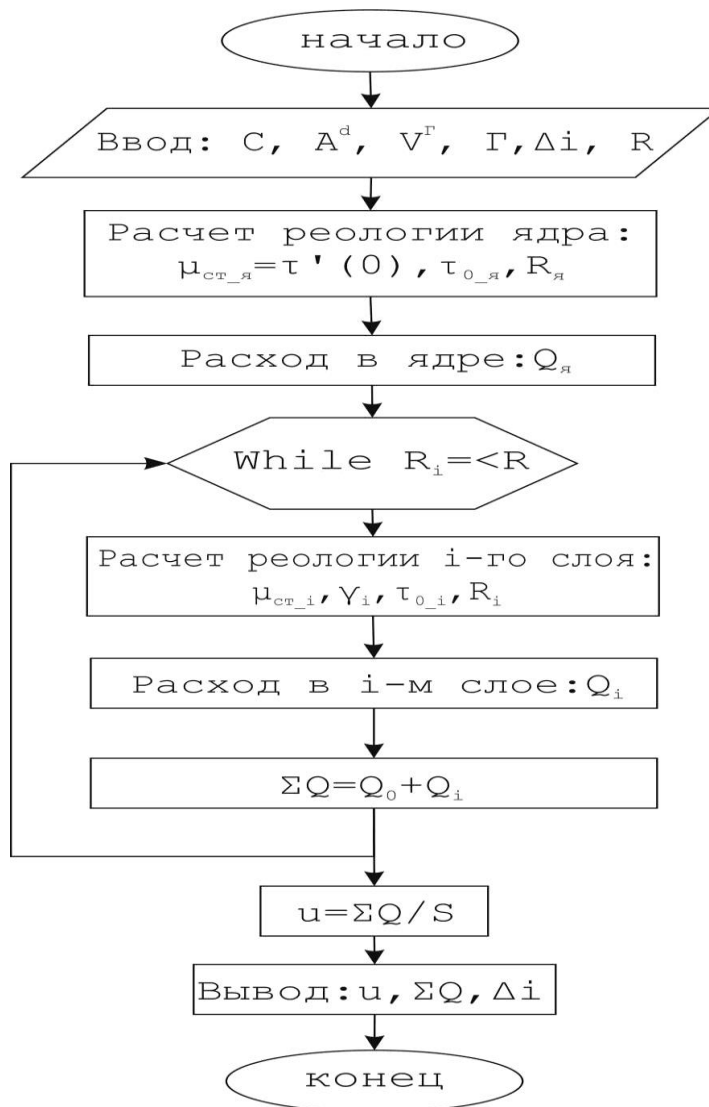


Рисунок 3.9 – Блок-схема расчета параметров течения с учетом зависимости реологических характеристик от скорости сдвига

Таблица 3.1 – Значения расхода неньютоновской жидкости

Диаметр, м	Концентрация, %	Показатели вязкости при 9 с^{-1}		Расход, $\text{м}^3/\text{с}$	Удельный перепад давления, $\text{Па}/\text{м}$				Погрешность определения расхода, %		
		τ_0 , Па	$\mu_{ст}$, $\text{Па}\cdot\text{с}$		Эксперимент	Ур-е (3.34) (д/р)	Ур-е Букин гема	Ур-е Буки нгема (д/р)	Ур-е (3.34) (д/р)	Ур-е Буки нгема	Ур-е Буки нгема (д/р)
0,08	62	3,72	0,36	0,000126	150	130	273	115	13	82	23
				0,000251	175	159	325	195	9	86	11
				0,000377	205	192	373	270	6	82	32
				0,000502	240	255	425	340	6	77	42
				0,000628	260	320	466	445	23	79	71

«д/р» – динамическая реология.

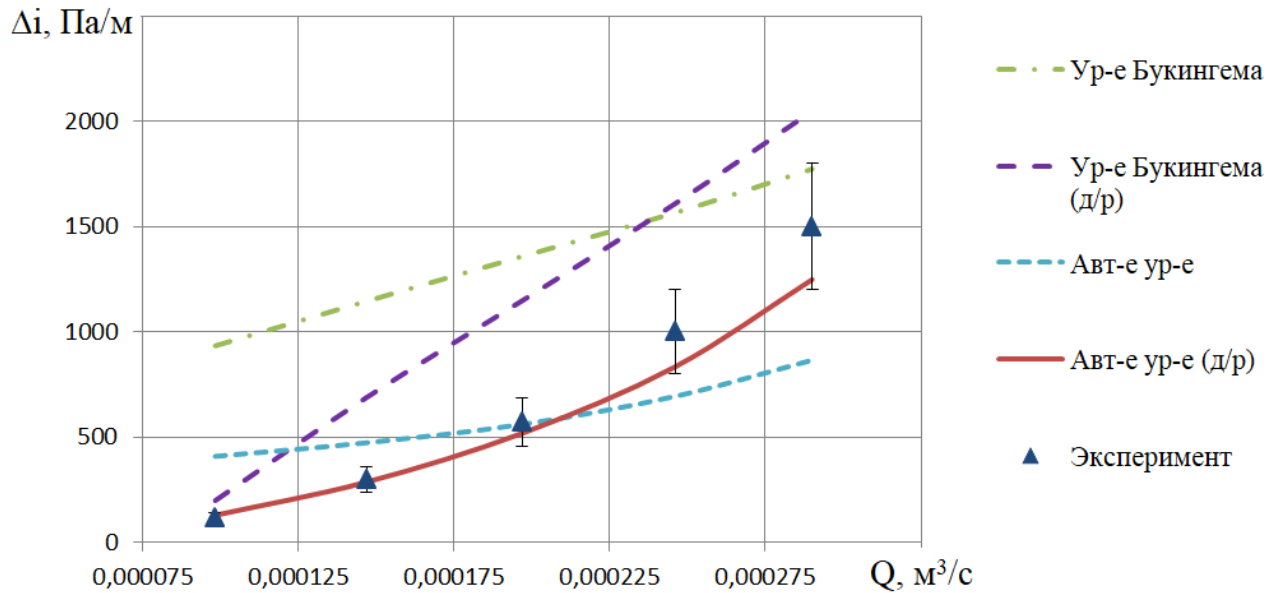


Рисунок 3.10 – Зависимость удельных потерь давления от расхода ТВУС
 $D=80 \text{ мм}$, $C=62\%$, $\tau_0=3,72 \text{ Па}$, $\mu_{ст}=0,36 \text{ Па}\cdot\text{с}$

Приведенные зависимости позволяют установить, что предложенные уравнения для расчета расхода высококонцентрированных дисперсных сред в функции потерь давления для стержневого течения позволяют получить более точные результаты. Величина отклонения во многом зависит от точности определения реологических характеристик движущейся среды и ее скорости.

Кроме того, проведены исследования по определению эпюры скорости u , скорости сдвига $\dot{\gamma}$ и расхода Q суспензии для приведенных исходных данных (табл. 3.9) (рис. 3.11-3.13).

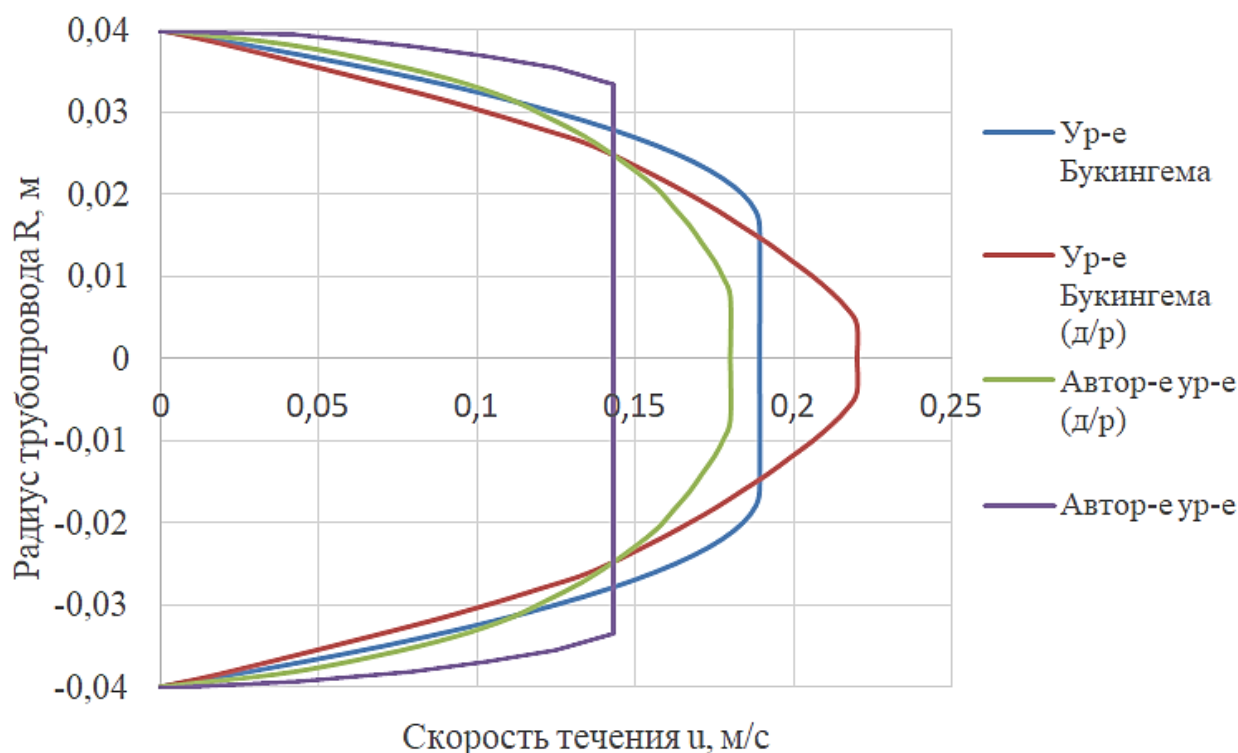


Рисунок 3.11 – Эпюра скорости течения ТВУС ($u_{cp}=0,125$ м/с)

Анализ эпюр скорости, приведенных на рисунке 3.11, 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 (3.34) 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.

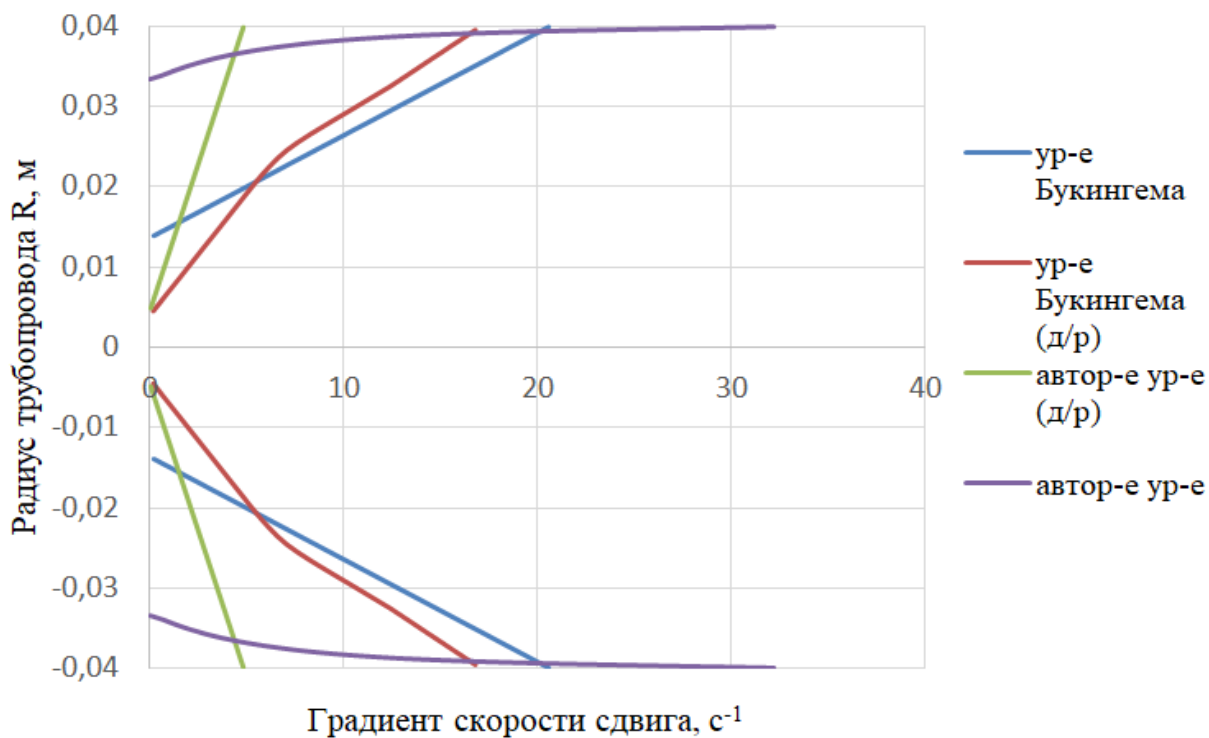


Рисунок 3.12 – Эпюра скорости сдвига ТВУС ($u_{cp}=0,125$ м/с)

Анализ приведенных на рисунке 3.12 эпюр скорости сдвига, позволил установить, что учет наблюдается значительное расхождение в их форме, в зависимости от принятой математической модели. Для классического формы уравнения Букингема характерно постоянство скорости сдвига на всей кольцевой области потока. При учете изменения вязкостных характеристик топливной водоугольной суспензии в зависимости от градиента скорости сдвига наблюдается искривление эпюры скорости сдвиговых деформаций, что соответствует изменению реологии транспортируемой среды.

Для предложенной модели течения (уравнение 3.34) без учета изменения вязкостных свойств по сечению трубопровода характерно плавное искривление эпюры скорости сдвига в кольцевой области потока. Учет нелинейного изменения реологических свойств при скорости сдвига менее 9 c^{-1} , наблюдается резкое уменьшение ядра потока и перераспределение скорости сдвиговых деформаций, что приводит к уменьшению их абсолютного значения и

обуславливает постепенное разрушение пространственной структуры вплоть до стенки канала.

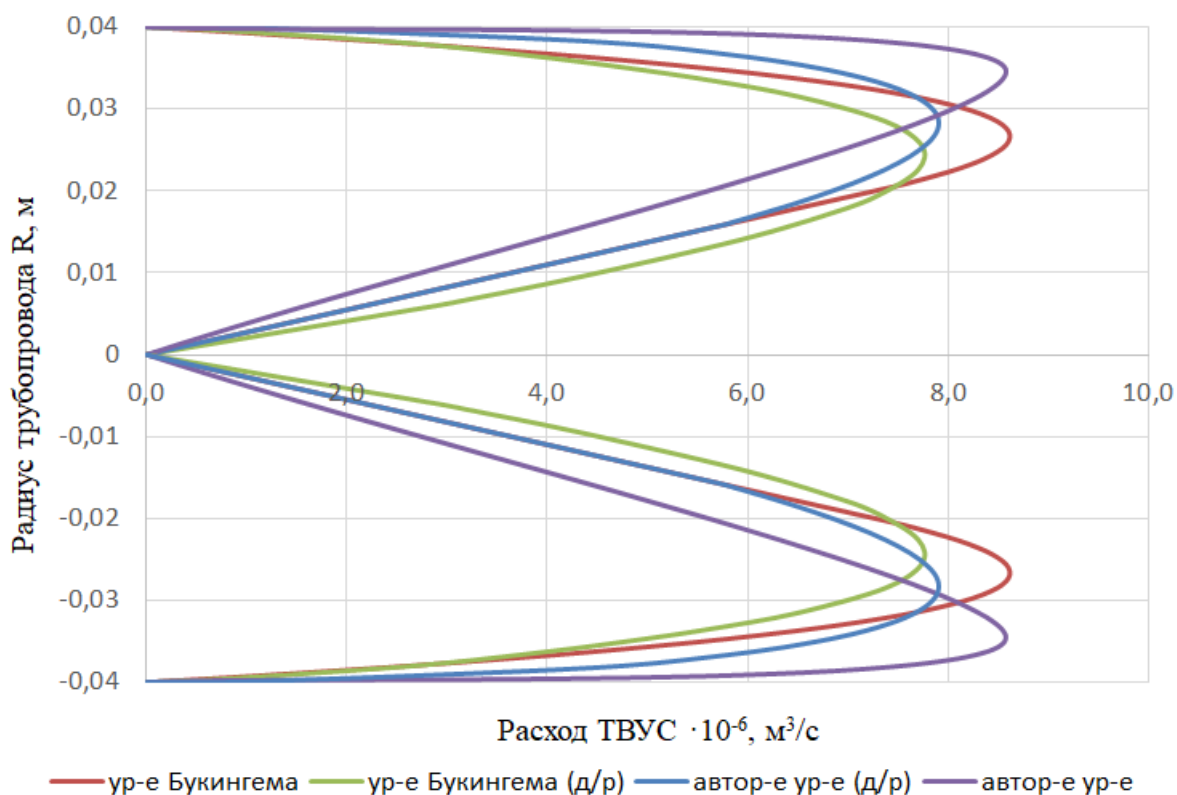


Рисунок 3.13 – Расход ТВУС по сечению трубопровода ($u_{cp}=0,125$ м/с)

Анализ кривых, приведенных на рисунке 3.13, позволил установить, что в зависимости от используемой математической модели течения топливной водоугольной суспензии наблюдается изменение формы эпюры расхода. Для уравнений Букингема и (3.34) характерна более вытянутая форма, при этом для авторской зависимости характерно смещение экстремума к стенке трубопровода, что обусловлено значительной величиной ядра потока. При учете динамического изменения реологических свойств наблюдается более равномерное распределение расхода среды по сечению, что в первую очередь связано с постепенным разрушением структуры вне ядра потока.

3.4 Модель движения ТВУС в фасонных элементах трубопроводов и арматуре

3.4.1 Особенности течения ТВУС в фасонных элементах трубопровода.

Практически все технологические системы производства, перемещения и использования ТВУС являются трубопроводными и включают насосы, трубопроводы, а также устройства подачи в топку теплогенерирующей установки. Кроме того, следует выделить фасонные части труб и запорную арматуру, которые обязательны в подобных системах и оказывают значительное влияние как на величину суммарного сопротивления сети, так и на изменения фракционного состава твердого компонента водоугольной среды. Следует отметить, что корректность и точность расчета сопротивления сети оказывает существенное влияние на правильность выбора насосного оборудования для системы гидротранспорта ВУТ.

Для решения поставленной задачи использован метод вычислительной гидродинамики – метод конечных объемов [107, 135, 219]. Сущность метода состоит в следующем: выбирается некоторая замкнутая область течения жидкости, для которой выполняется поиск полей макроскопических величин (например, скорости, давления), описывающих состояние среды во времени и удовлетворяющих определенным законам. Наиболее используемыми являются законы сохранения в эйлеровых переменных: для любой величины φ , в каждой точке пространства, окруженного некоторым замкнутым конечным объемом, в момент времени t существует следующая зависимость: общее количество величины φ в объеме может меняться за счет следующих факторов [224]:

- транспорт количества этой величины через поверхность, ограничивающий контрольный объем – поток;
- генерация (исчезновение) некоторого количества величины φ внутри контрольного объема – источник (сток).

Под контрольным объемом понимается некоторый замкнутый элементарный объем dV , ограниченный поверхностью dS .

В свою очередь, поток величины ϕ через границу dS может быть разбит на две составляющие [224]:

- конвекционная – движение вместе со средой;
- диффузионная – обусловлена хаотичным движением в среде (например, турбулентным).

Формально это может быть представлено следующим образом:

$$\underbrace{\frac{\partial \rho \phi}{\partial t}}_{\text{производная по времени}} + \underbrace{\bar{\nabla} \cdot (\rho \bar{V} \phi)}_{\text{конвекционный член}} - \underbrace{\bar{\nabla} \cdot (\Gamma_\phi \bar{\nabla} \phi)}_{\text{диффузионный член}} = \underbrace{S_\phi(\phi)}_{\text{источник}}.$$

Поскольку получение точного решения уравнений гидромеханики не всегда возможно, используется процедура дискретизации. Целью дискретизации является трансформация системы дифференциальных уравнений в частных производных в соответствующую систему алгебраических уравнений. Результатом решения алгебраической системы является множество значений, соответствующих точному решению в заданных наперед точках пространства и времени. В результате дискретизации расчетной области получается числовое описание моделируемого пространства – расчетная сетка, содержащая точки, в которых производится поиск решения и описание границ. В случае нестационарных задач временная ось также разбивается на конечное число соответствующих интервалов. При использовании метода конечных объемов разделение основного уравнения производится на составляющие, представляющие собой элементы суммарного баланса некоторой величины из числа исследуемых.

Метод конечных объемов является в настоящее время самым распространенным и наиболее популярным вследствие того, что он позволяет строго соблюдать законы сохранения энергии, а основные понятия и положения метода строго соответствуют физическим величинам.

При использовании метода расчетная область разбита на конечное число контрольных объемов, которые не перекрывают друг друга, то есть не пересекаются и полностью заполняют расчетную область. Переменные, определяемые в процессе расчета, исчисляются в центрах контрольных объемов при помощи декартовой системы координат. Набор использованных форм объемов ограничен гексаэдрами, тетраэдрами и призмами. Используются два набора элементов (объемов): на основе гексаэдров (гексагональная сетка) и на основе тетраэдров (тетрагональная сетка). Для обеих сеток использованы призмы для моделирования пограничного слоя, то есть у твердых стенок находятся исключительно призмы, имитирующие пограничный слой. Из литературы [263] известно, что использование гексагональных элементов приводит к уменьшению необходимого количества контрольных объемов при сохранении точности расчета. Поэтому, в большинстве случаев расчета использована гексагональная сетка, за исключением некоторых расчетов, в которых получение качественной сетки требует затрат значительного времени на построение, например при построении с поворотом на радиус, равный радиусу трубы [135].

В изогнутых трубах и каналах (коленах, отводах) вследствие искажения течения потока появляются центробежные силы, направленные от центра кривизны к наружной стенке трубы. Этим обуславливается повышение давления возле внешней стенки и снижение его во внутренней при переходе потока из прямолинейного участка трубопровода в изогнутую. При этом, под отводами подразумеваются изогнутые участки, в которых при равенстве входящего и исходящего сечения одноуровневые относительно оси трубопровода скругления обеих стенок (внешней и внутренней) представляют собой дуги концентрических окружностей [219]. При проектировании и оптимизации параметров течения водоугольного топлива крайне важно знать значение потерь давления при поворотах в отводах с различными значениями радиуса кривизны.

3.4.2 Модель течения ТВУС в фасонных элементах трубопровода.

Численное моделирование течения ТВУС в фасонных частях (отводах с поворотом потока на 90 и 180°) произведено методом конечных объемов с помощью приложения COMSOLmultiphysics (полнофункциональная пробная версия) для нижеприведенных характеристик транспортируемой среды и трубопровода (таблица 3.2) [89].

Таблица 3.2 – Исходные данные для численного моделирования течения ТВУС в фасонных частях

№ п/п	Марка угля	Диаметр трубопровода D , м	Радиус изгиба $R_{изг}$	Расход ТВУС $Q_{ТВУС}$, м ³ /с	Плотность ТВУС $\rho_{ТВУС}$, кг/м ³	Начальное напряжение сдвига τ_0 , Па	Структурная вязкость $\mu_{см}$, Па·с
Поворот на 90°							
1	Г	0,05-0,15	0,5R-3R	0,0001-0,003	1142-1155	3,04-16,5	0,54-2,2
2	ОС	0,05-0,15	0,5R-3R	0,0001-0,003	1179-1197	3,07-15,5	0,5-0,93
3	А	0,05-0,15	0,5R-3R	0,0001-0,003	1215-1237	1,98-10,9	0,22-0,79
Поворот на 180°							
1	Г	0,05-0,15	1,5R-4,5R	0,0001-0,003	1142-1155	3,04-16,5	0,54-2,2
2	ОС	0,05-0,15	1,5R-4,5R	0,0001-0,003	1179-1197	3,07-15,5	0,5-0,93
3	А	0,05-0,15	1,5R-4,5R	0,0001-0,003	1215-1237	1,98-10,9	0,22-0,79

На рисунке 3.14 - 41 в графическом виде способом цветопередачи уровня кинетических параметров осесимметричных слоев внутритрубного потока представлены результаты расчета течения высококонцентрированной водоугольной суспензии в отводах с поворотом потока на 90° (а) и 180° (б).

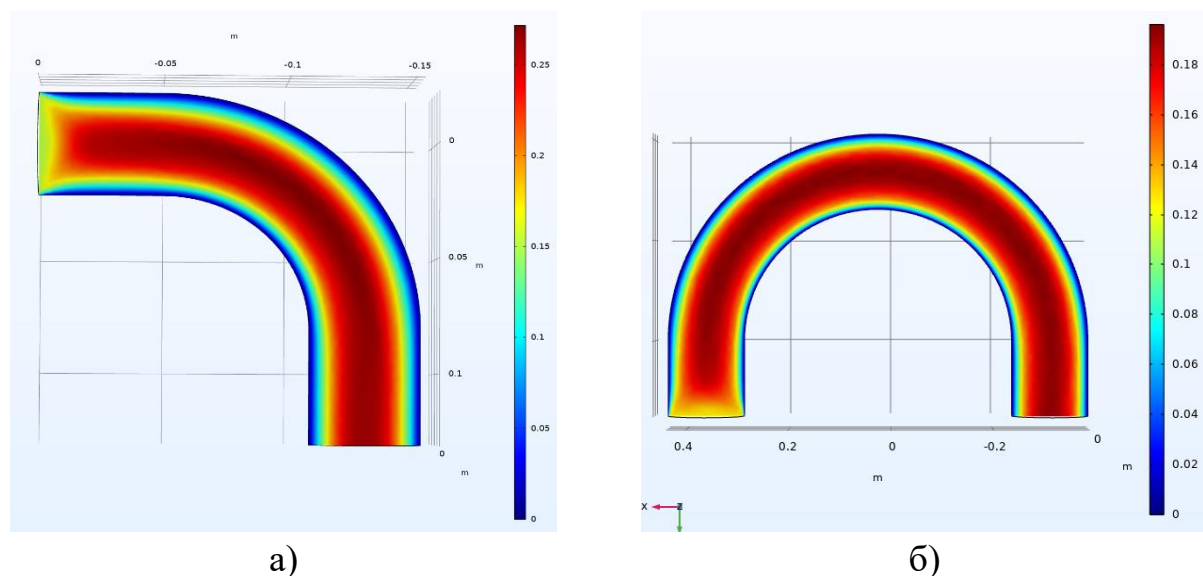
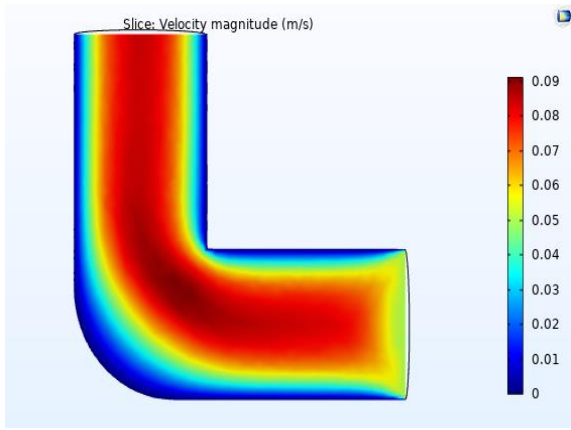
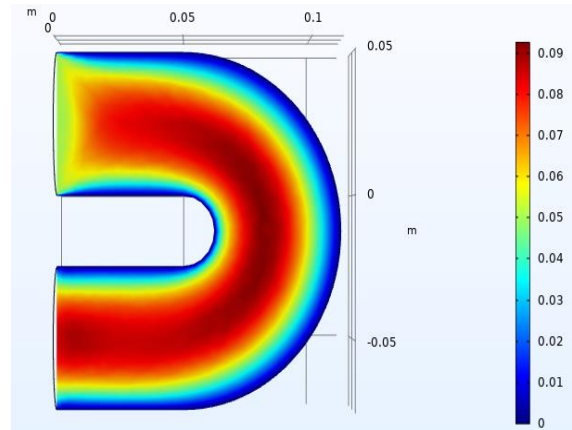


Рисунок 3.14 – Течение ТВУС в поворотах на 90° и 180° для угля марки Г диаметр $D=0,05$ м; расход суспензии $Q_{ТВУС}=0,0003$ м³/с; радиус изгиба $3R$; начальное напряжение сдвига $\tau_0=16,5$ Па; структурная вязкость $\mu_{см}=2,2$ Па·с

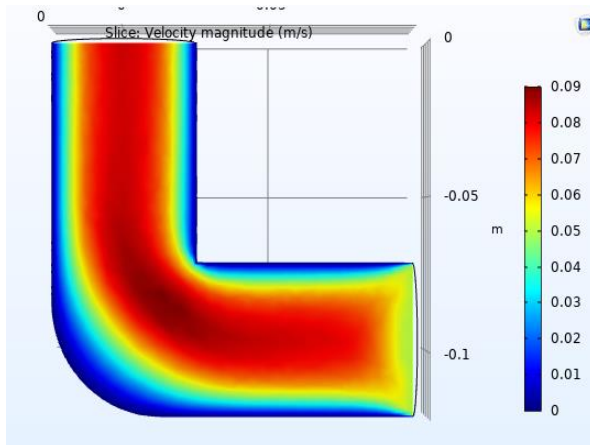


а)

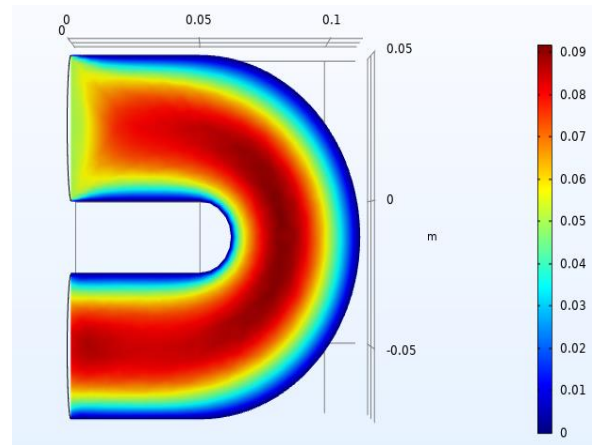


б)

Рисунок 3.15 – Течение ТВУС в поворотах на 90° и 180° для угля марки Г диаметр $D=0,05$ м; радиус изгиба (а- $0,5R$, б- $1,5R$); нач. напряжение сдвига $\tau_0=3,04$ Па; структурная вязкость $\mu_{cm}=0,54$ Па·с

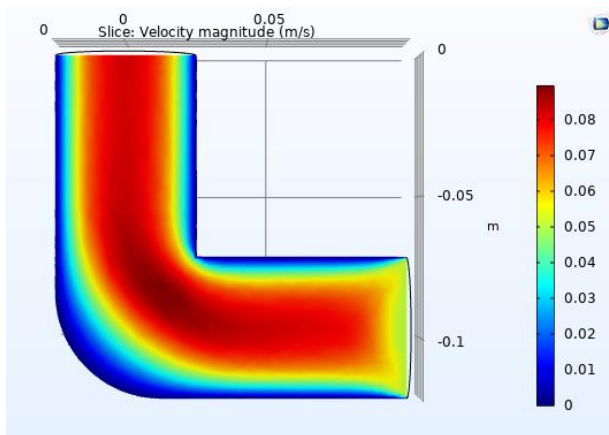


а)

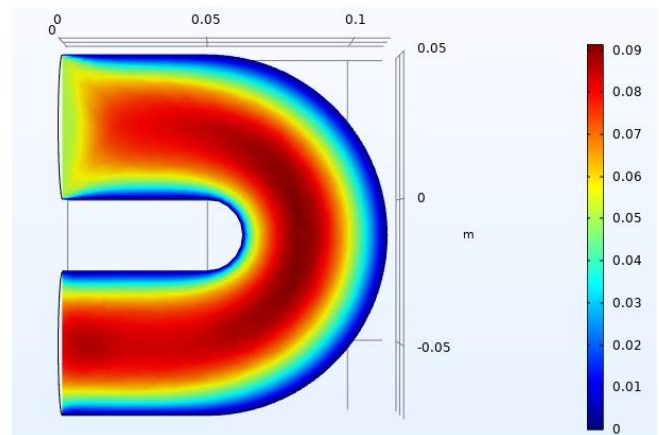


б)

Рисунок 3.16 – Течение ТВУС в поворотах на 90° и 180° для угля марки Г диаметр $D=0,05$ м; радиус изгиба (а- $0,5R$, б- $1,5R$); нач. напряжение сдвига $\tau_0=5,3$ Па; структурная вязкость $\mu_{cm}=0,77$ Па·с



а)



б)

Рисунок 3.17 – Течение ТВУС в поворотах на 90° и 180° для угля марки Г диаметр $D=0,05$ м; радиус изгиба (а- $0,5R$, б- $1,5R$); нач. напряжение сдвига $\tau_0=16,5$ Па; структурная вязкость $\mu_{cm}=2,2$ Па·с

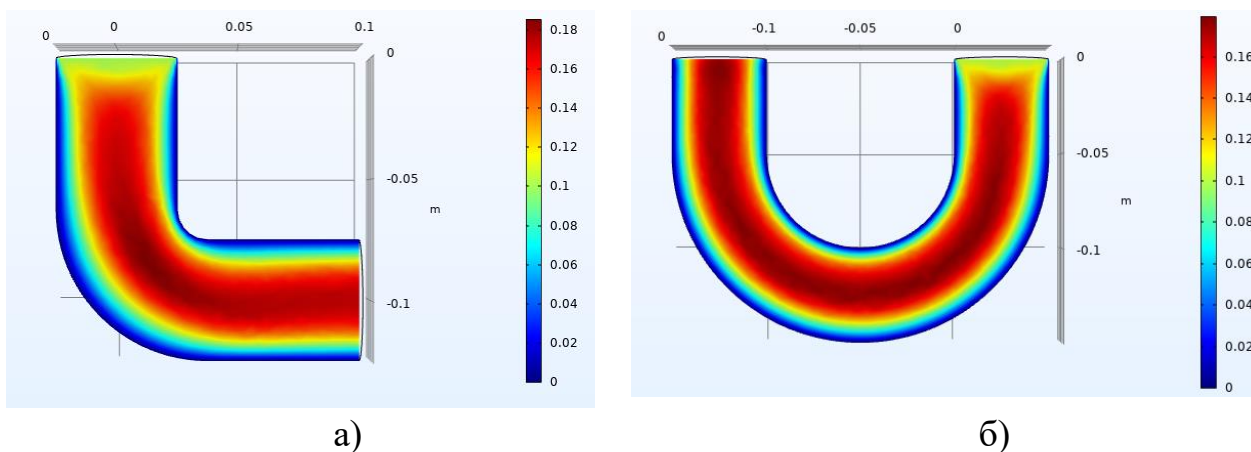


Рисунок 3.18 – Течение ТВУС в поворотах на 90° и 180° для угля марки Г диаметр $D=0,05$ м; радиус изгиба (а- $1,5R$, б- $3R$); нач. напряжение сдвига $\tau_0=3,04$ Па; структурная вязкость $\mu_{cm}=0,54$ Па·с

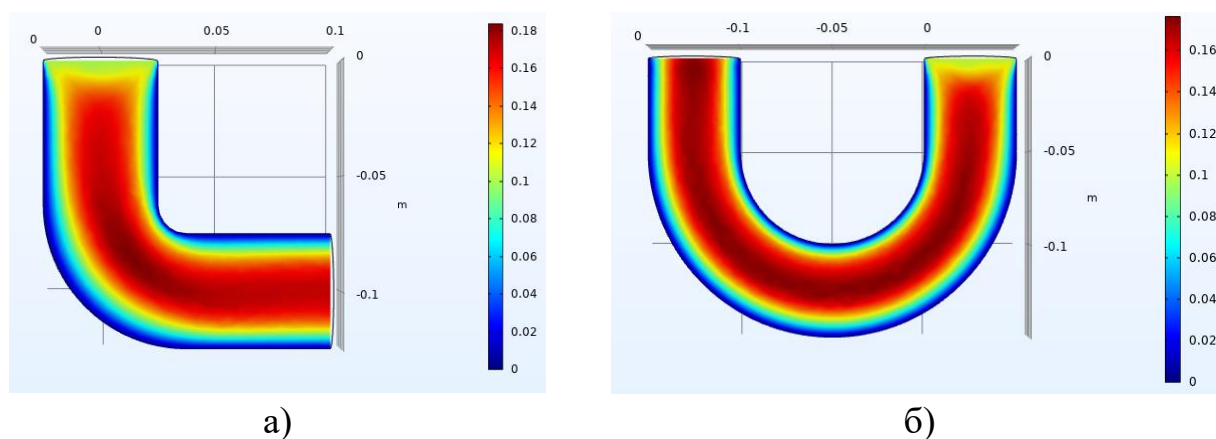


Рисунок 3.19 – Течение ТВУС в поворотах на 90° и 180° для угля марки Г диаметр $D=0,05$ м; радиус изгиба (а- $1,5R$, б- $3R$); нач. напряжение сдвига $\tau_0=5,3$ Па; структурная вязкость $\mu_{cm}=0,77$ Па·с

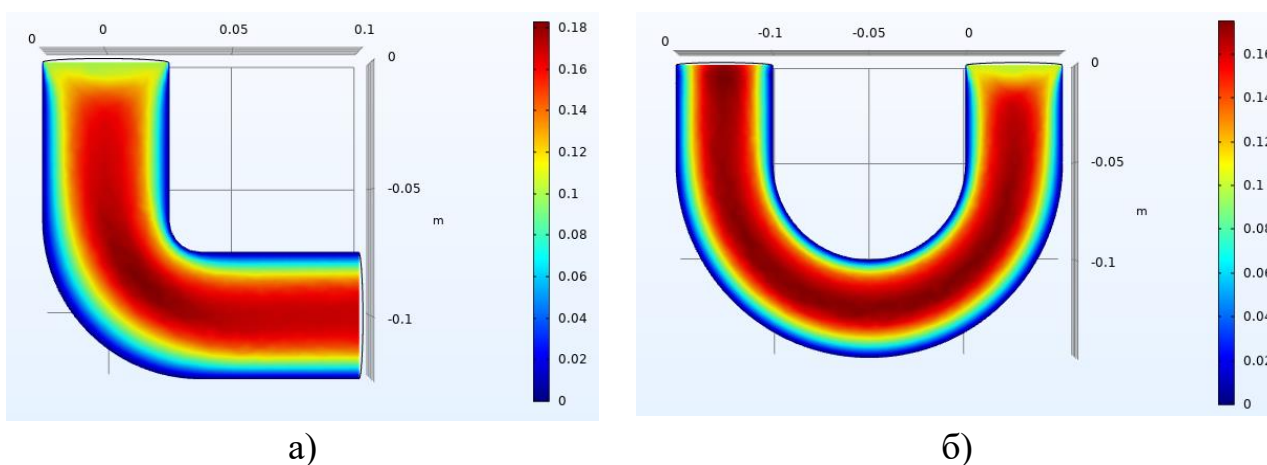


Рисунок 3.20 – Течение ТВУС в поворотах на 90° и 180° для угля марки Г диаметр $D=0,05$ м; радиус изгиба (а- $1,5R$, б- $3R$); нач. напряжение сдвига $\tau_0=16,5$ Па; структурная вязкость $\mu_{cm}=2,2$ Па·с

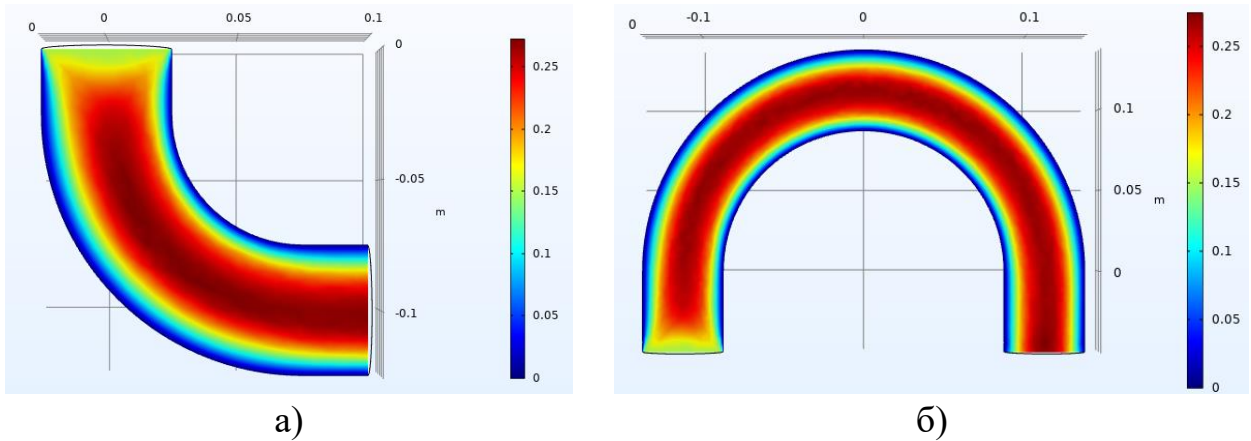


Рисунок 3.21 – Течение ТВУС в поворотах на 90° и 180° для угля марки Г диаметр $D=0,05$ м; радиус изгиба (а- $3R$, б- $4,5R$); нач. напряжение сдвига $\tau_0=3,04$ Па; структурная вязкость $\mu_{cm}=0,54$ Па·с

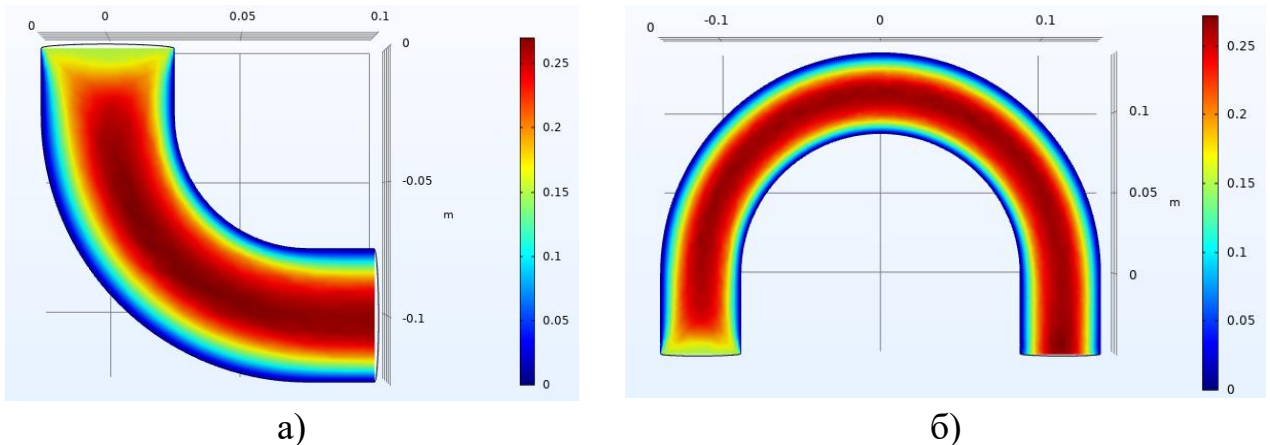


Рисунок 3.22 – Течение ТВУС в поворотах на 90° и 180° для угля марки Г диаметр $D=0,05$ м; радиус изгиба (а- $3R$, б- $4,5R$); нач. напряжение сдвига $\tau_0=5,3$ Па; структурная вязкость $\mu_{cm}=0,77$ Па·с

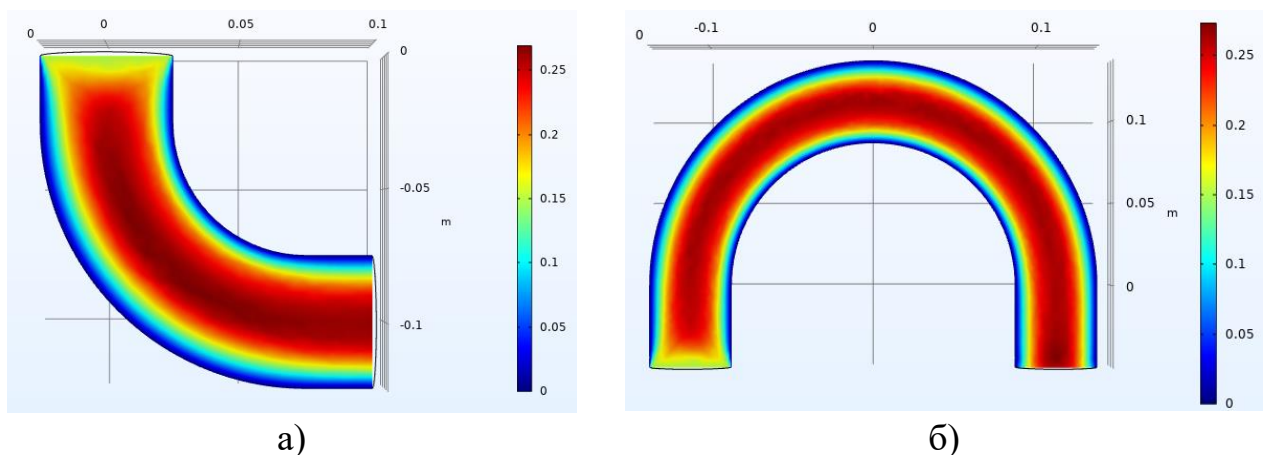


Рисунок 3.23 – Течение ТВУС в поворотах на 90° и 180° для угля марки Г диаметр $D=0,05$ м; радиус изгиба (а- $3R$, б- $4,5R$); нач. напряжение сдвига $\tau_0=16,5$ Па; структурная вязкость $\mu_{cm}=2,2$ Па·с

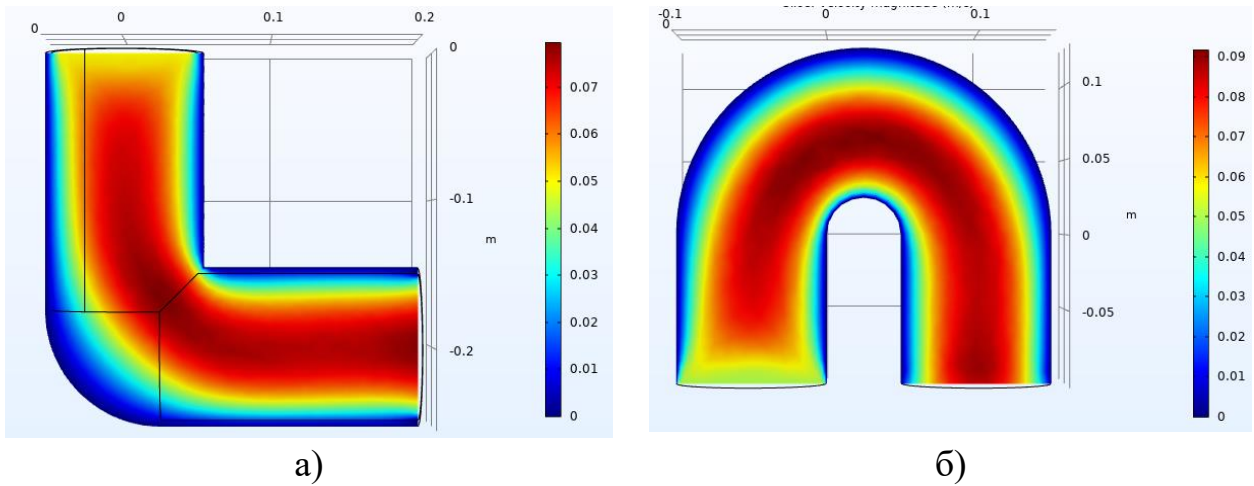


Рисунок 3.24 – Течение ТВУС в поворотах на 90° и 180° для угля марки Г диаметр $D=0,1$ м; радиус изгиба (а- $0,5R$, б- $1,5R$); нач. напряжение сдвига $\tau_0=3,04$ Па; структурная вязкость $\mu_{cm}=0,54$ Па·с

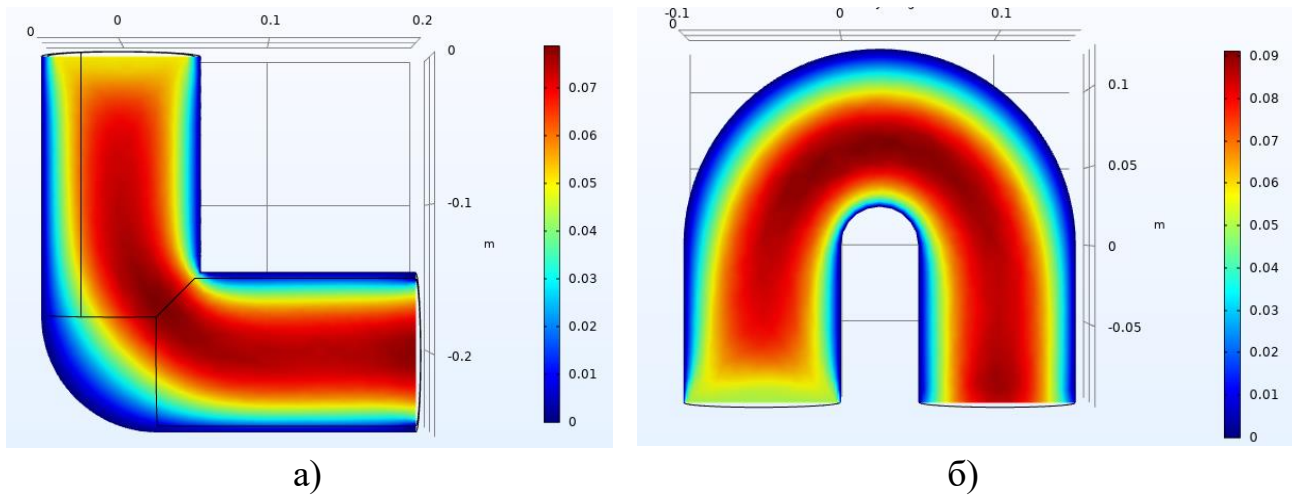


Рисунок 3.25 – Течение ТВУС в поворотах на 90° и 180° для угля марки Г диаметр $D=0,1$ м; радиус изгиба (а- $0,5R$, б- $1,5R$); нач. напряжение сдвига $\tau_0=5,3$ Па; структурная вязкость $\mu_{cm}=0,77$ Па·с

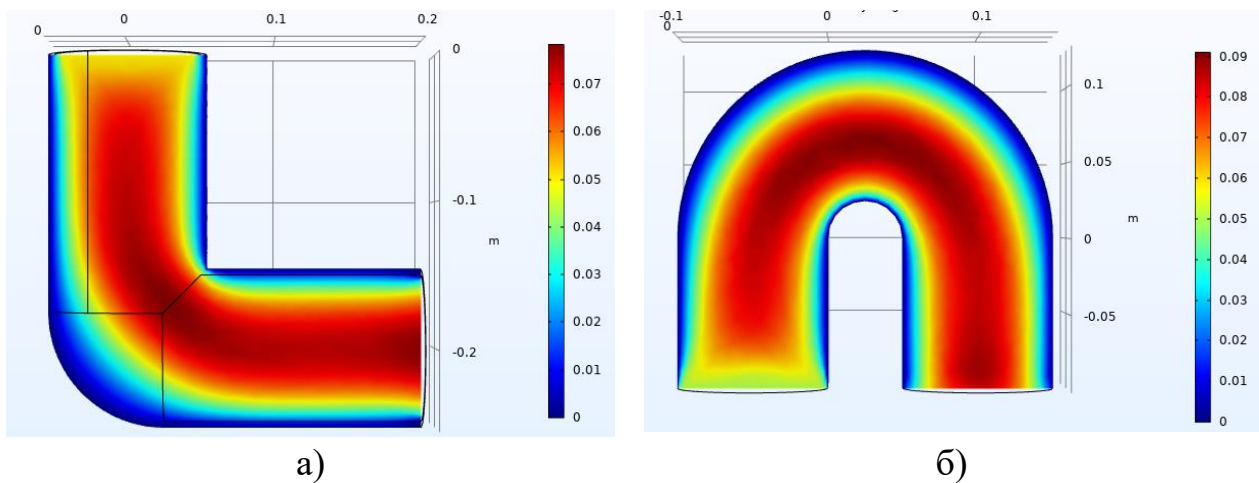


Рисунок 3.26 – Течение ТВУС в поворотах на 90° и 180° для угля марки Г диаметр $D=0,1$ м; радиус изгиба (а- $0,5R$, б- $1,5R$); нач. напряжение сдвига $\tau_0=16,5$ Па; структурная вязкость $\mu_{cm}=2,2$ Па·с

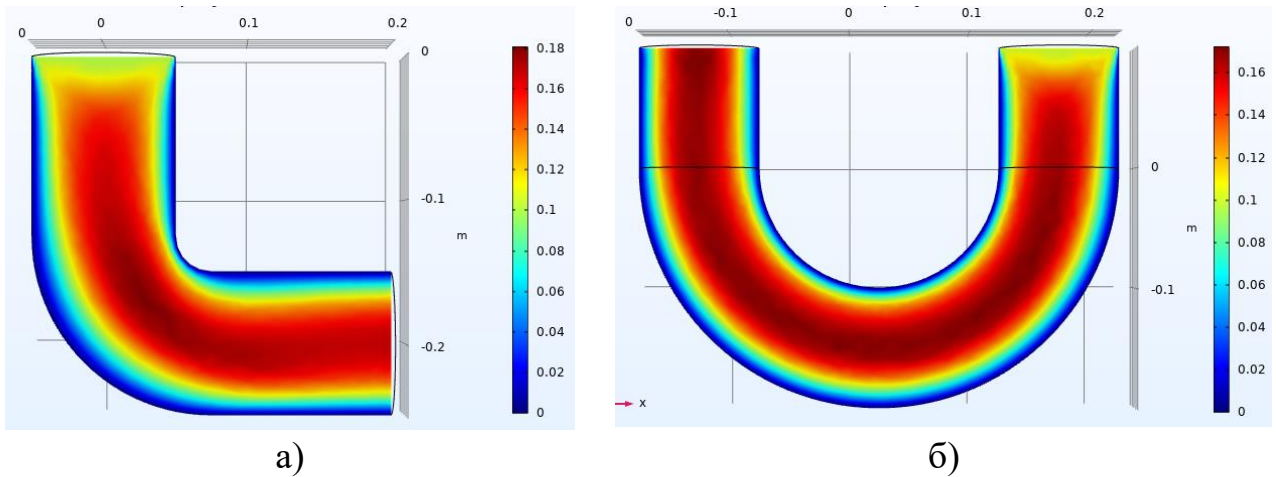


Рисунок 3.27 – Течение ТВУС в поворотах на 90° и 180° для угля марки Г диаметр $D=0,1$ м; радиус изгиба (а- $1,5R$, б- $3R$); нач. напряжение сдвига $\tau_0=3,04$ Па; структурная вязкость $\mu_{cm}=0,54$ Па·с

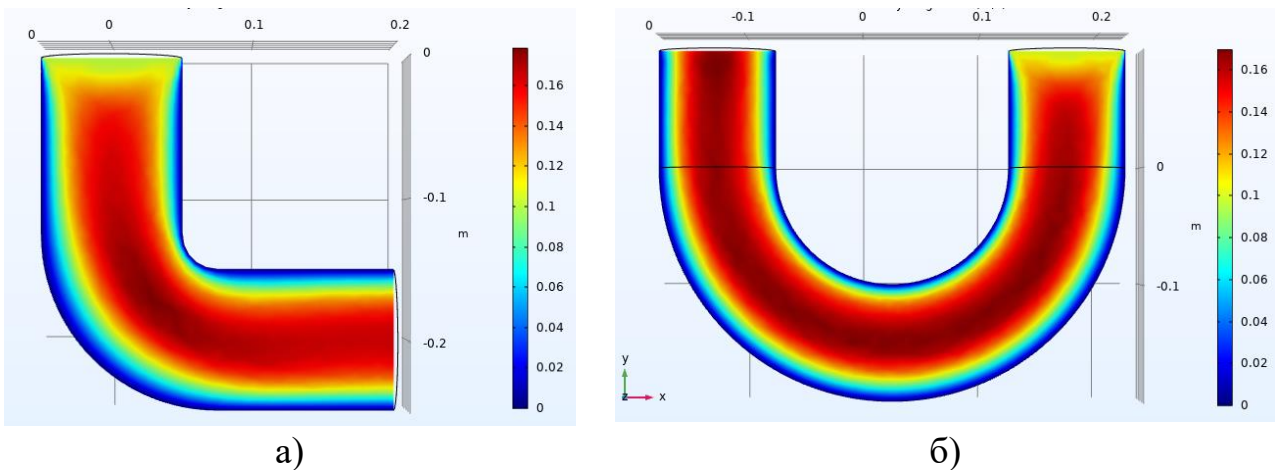


Рисунок 3.28 – Течение ТВУС в поворотах на 90° и 180° для угля марки Г диаметр $D=0,1$ м; радиус изгиба (а- $1,5R$, б- $3R$); нач. напряжение сдвига $\tau_0=5,3$ Па; структурная вязкость $\mu_{cm}=0,77$ Па·с

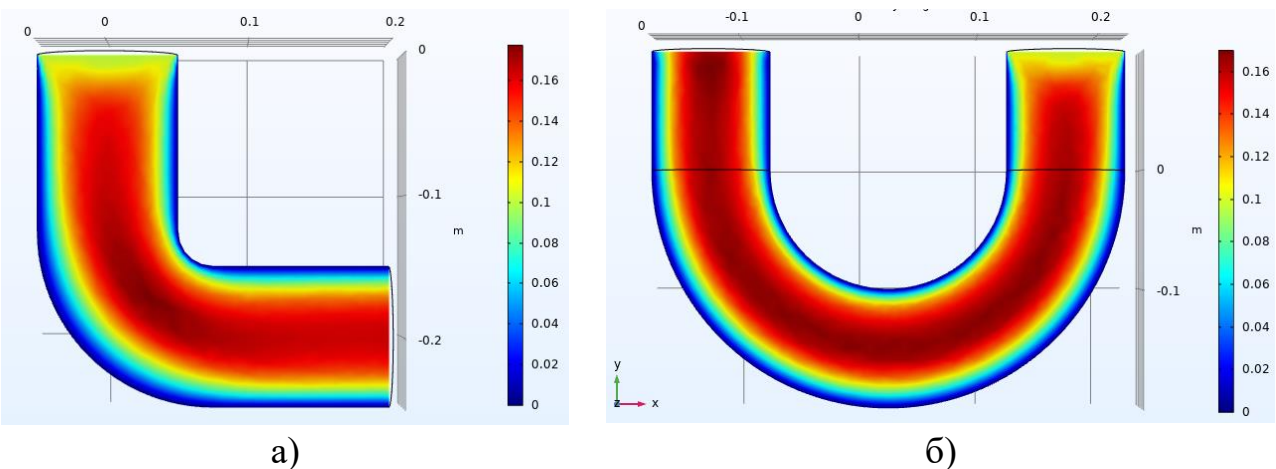


Рисунок 3.29 – Течение ТВУС в поворотах на 90° и 180° для угля марки Г диаметр $D=0,1$ м; радиус изгиба (а- $1,5R$, б- $3R$); нач. напряжение сдвига $\tau_0=16,5$ Па; структурная вязкость $\mu_{cm}=2,2$ Па·с

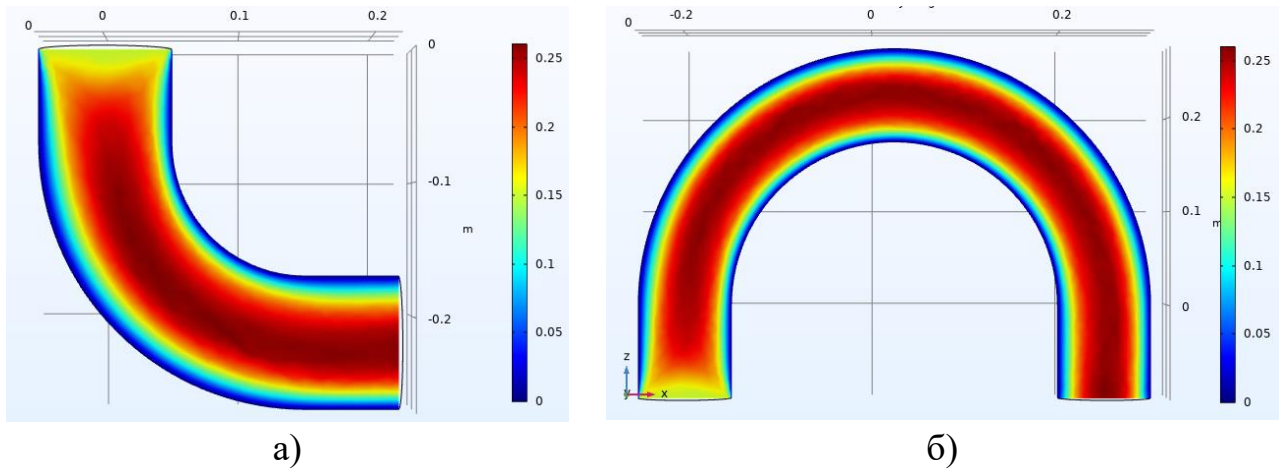


Рисунок 3.30 – Течение ТВУС в поворотах на 90° и 180° для угля марки Г диаметр $D=0,1$ м; радиус изгиба (а- $3R$, б- $4,5R$); нач. напряжение сдвига $\tau_0=3,04$ Па; структурная вязкость $\mu_{cm}=0,54$ Па·с

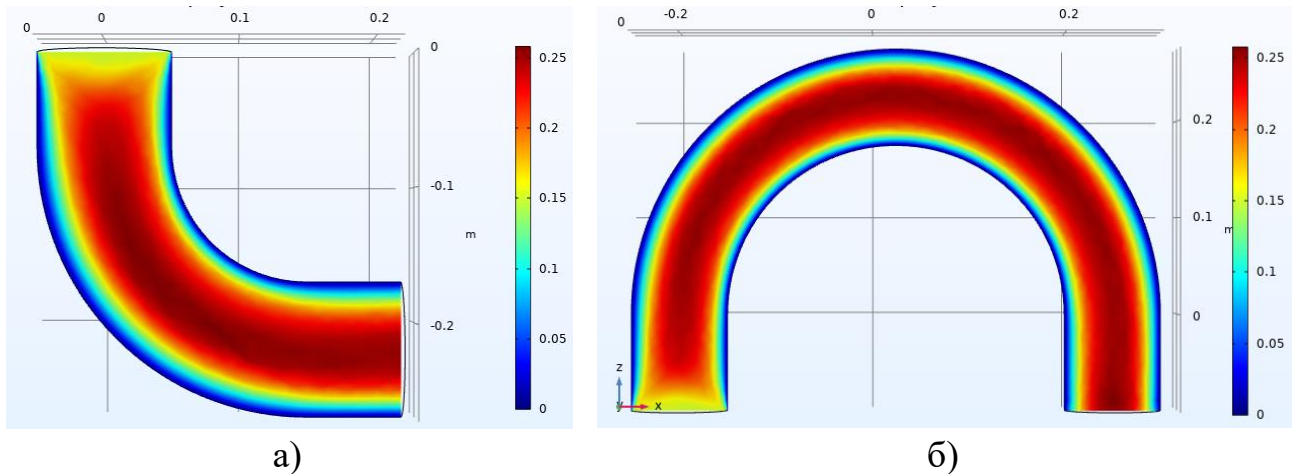


Рисунок 3.31 – Течение ТВУС в поворотах на 90° и 180° для угля марки Г диаметр $D=0,1$ м; радиус изгиба (а- $3R$, б- $4,5R$); нач. напряжение сдвига $\tau_0=5,3$ Па; структурная вязкость $\mu_{cm}=0,77$ Па·с

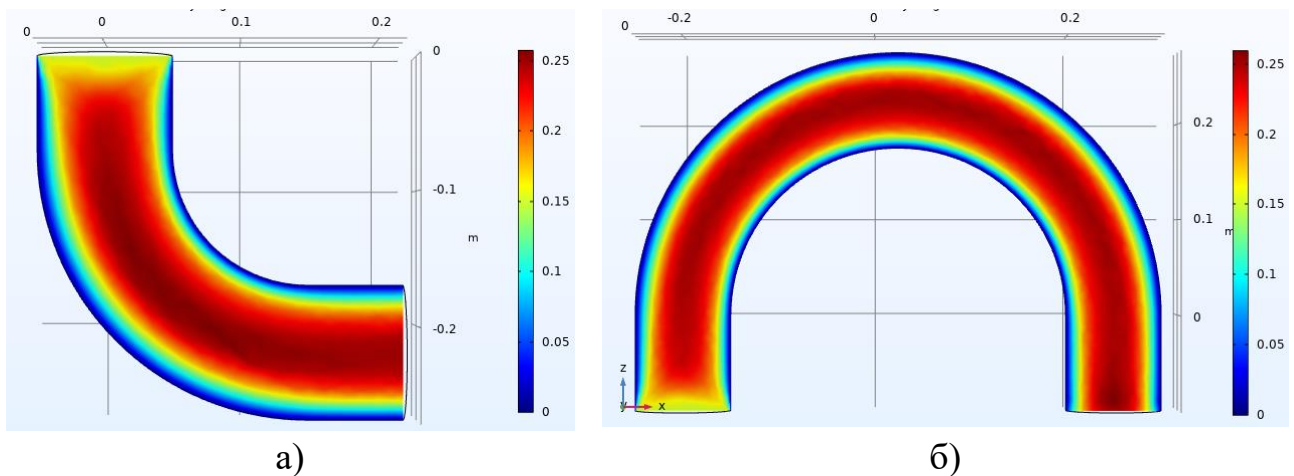
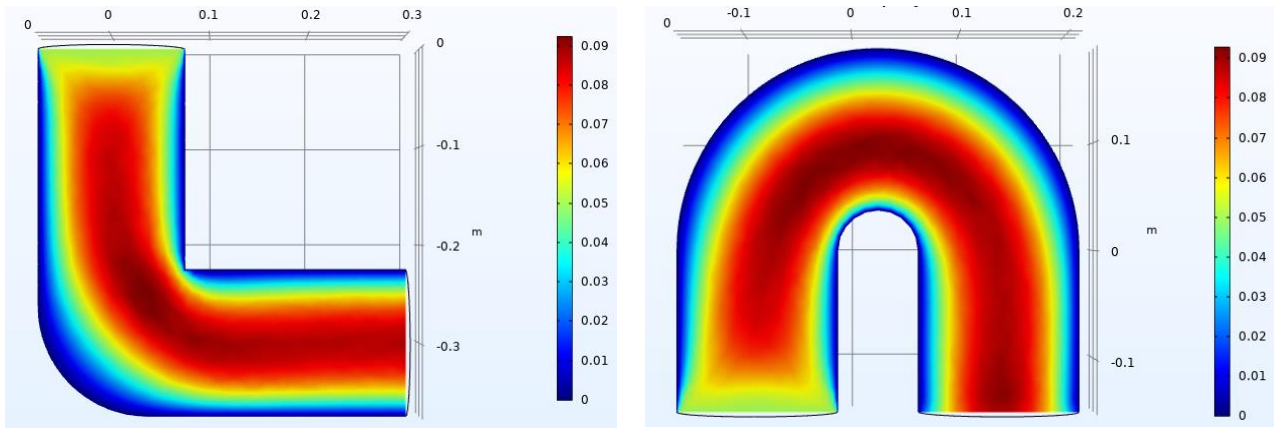


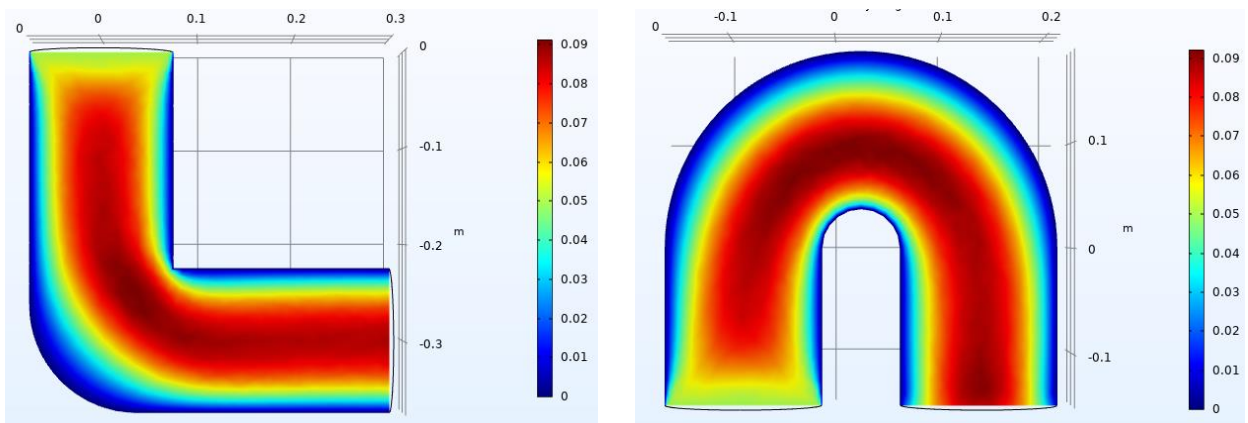
Рисунок 3.32 – Течение ТВУС в поворотах на 90° и 180° для угля марки Г диаметр $D=0,1$ м; радиус изгиба (а- $3R$, б- $4,5R$); нач. напряжение сдвига $\tau_0=16,5$ Па; структурная вязкость $\mu_{cm}=2,2$ Па·с



а)

б)

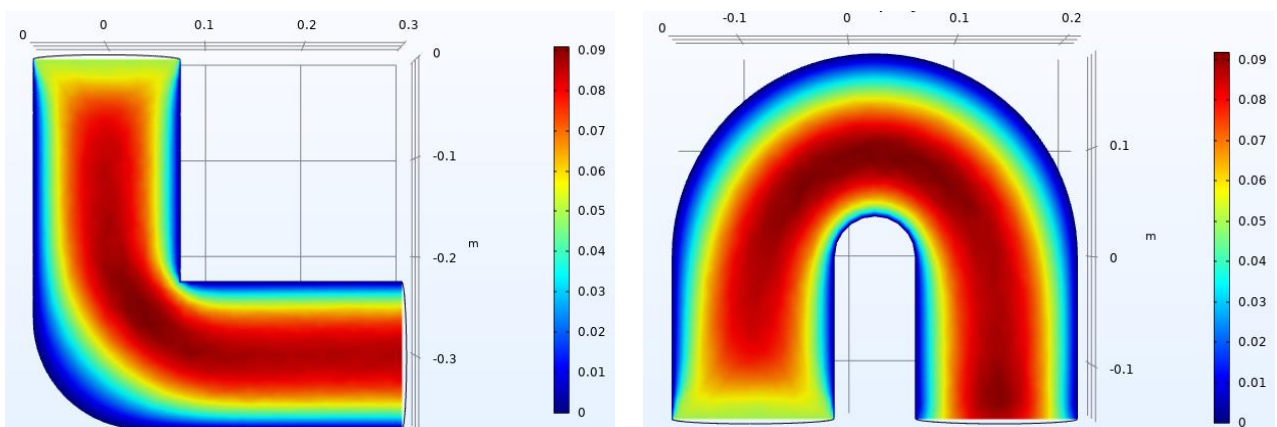
Рисунок 3.33 – Течение ТВУС в поворотах на 90° и 180° для угля марки Г диаметр $D=0,15$ м; радиус изгиба (а- $0,5R$, б- $1,5R$); нач. напряжение сдвига $\tau_0=3,04$ Па; структурная вязкость $\mu_{cm}=0,54$ Па·с



а)

б)

Рисунок 3.34 – Течение ТВУС в поворотах на 90° и 180° для угля марки Г диаметр $D=0,15$ м; радиус изгиба (а- $0,5R$, б- $1,5R$); нач. напряжение сдвига $\tau_0=5,3$ Па; структурная вязкость $\mu_{cm}=0,77$ Па·с



а)

б)

Рисунок 3.35 – Течение ТВУС в поворотах на 90° и 180° для угля марки Г диаметр $D=0,15$ м; радиус изгиба (а- $0,5R$, б- $1,5R$); нач. напряжение сдвига $\tau_0=16,5$ Па; структурная вязкость $\mu_{cm}=2,2$ Па·с

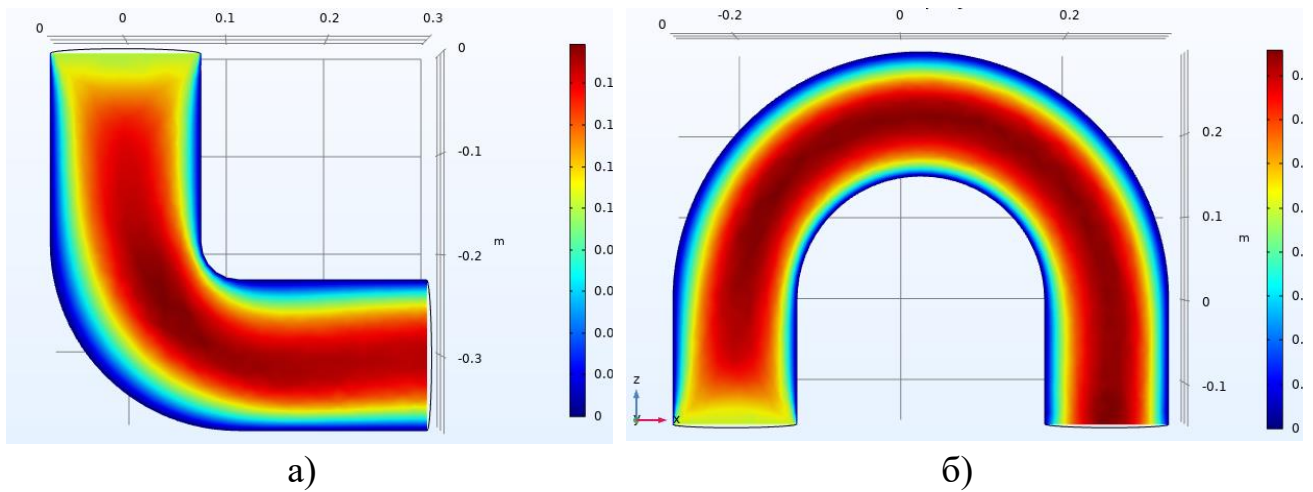


Рисунок 3.36 – Течение ТВУС в поворотах на 90° и 180° для угля марки Г диаметр $D=0,15$ м; радиус изгиба (а- $1,5R$, б- $3R$); нач. напряжение сдвига $\tau_0=3,04$ Па; структурная вязкость $\mu_{cm}=0,54$ Па·с

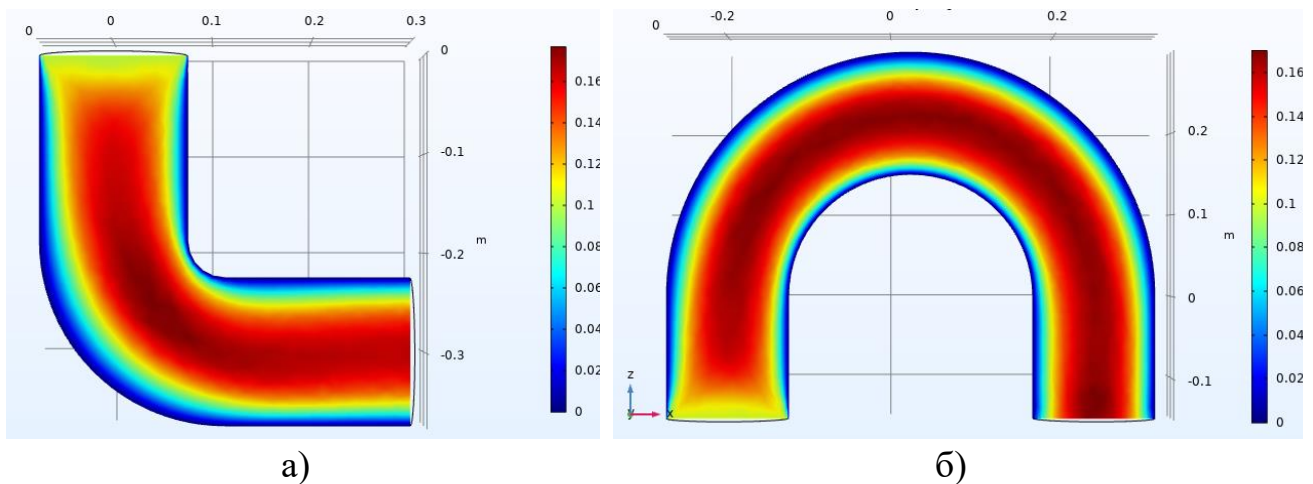


Рисунок 3.37 – Течение ТВУС в поворотах на 90° и 180° для угля марки Г диаметр $D=0,15$ м; радиус изгиба (а- $1,5R$, б- $3R$); нач. напряжение сдвига $\tau_0=5,3$ Па; структурная вязкость $\mu_{cm}=0,77$ Па·с

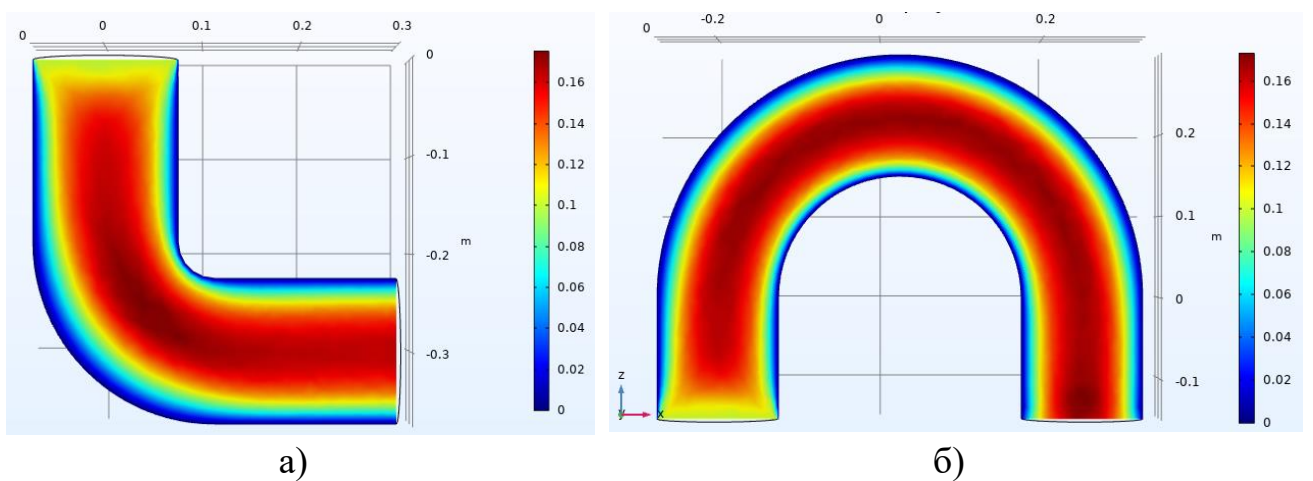
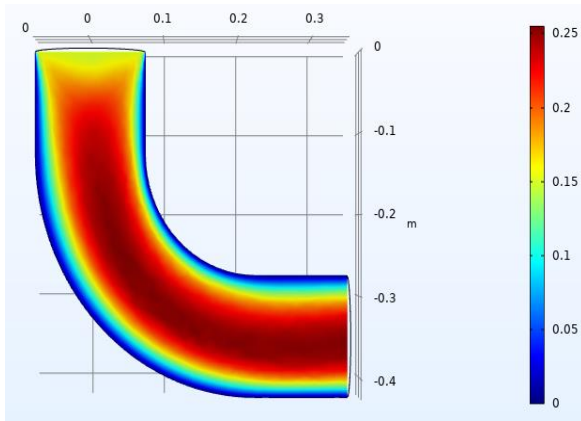
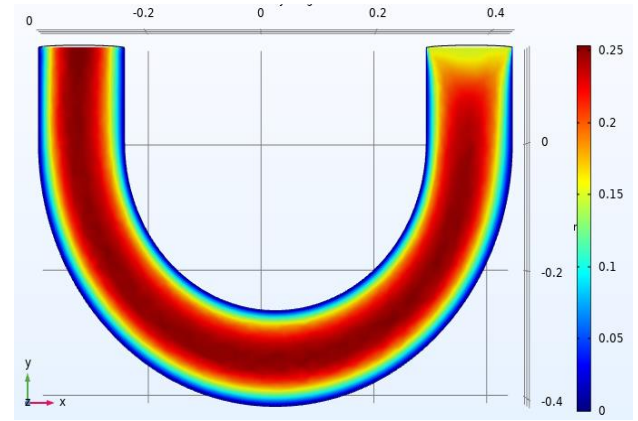


Рисунок 3.38 – Течение ТВУС в поворотах на 90° и 180° для угля марки Г диаметр $D=0,15$ м; радиус изгиба (а- $1,5R$, б- $3R$); нач. напряжение сдвига $\tau_0=16,5$ Па; структурная вязкость $\mu_{cm}=2,2$ Па·с

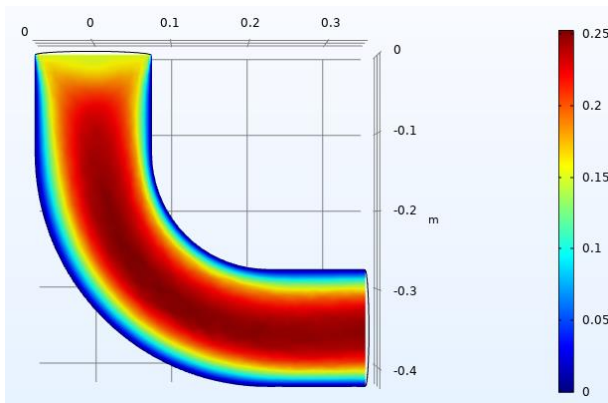


а)

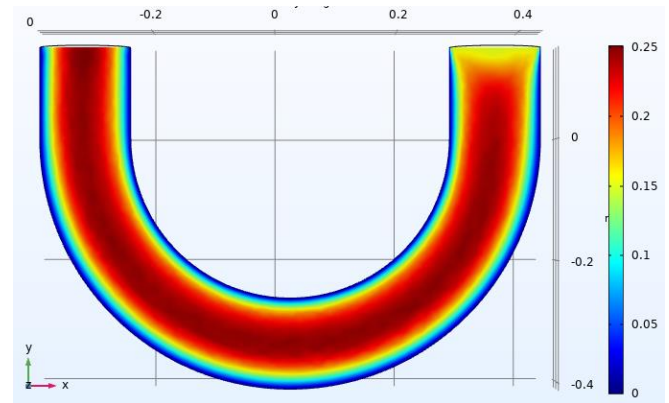


б)

Рисунок 3.39 – Течение ТВУС в поворотах на 90° и 180° для угля марки Г диаметр $D=0,15$ м; радиус изгиба (а- $3R$, б- $4,5R$); нач. напряжение сдвига $\tau_0=3,04$ Па; структурная вязкость $\mu_{cm}=0,54$ Па·с

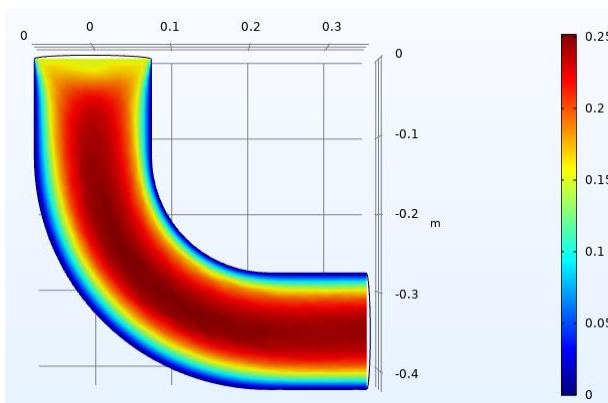


а)

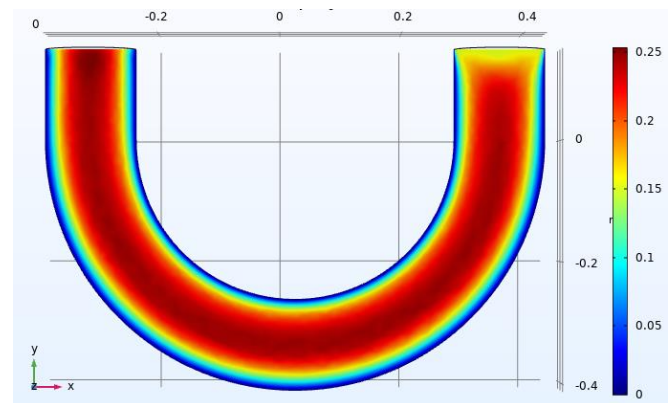


б)

Рисунок 3.40 – Течение ТВУС в поворотах на 90° и 180° для угля марки Г диаметр $D=0,15$ м; радиус изгиба (а- $3R$, б- $4,5R$); нач. напряжение сдвига $\tau_0=5,3$ Па; структурная вязкость $\mu_{cm}=0,77$ Па·с



а)



б)

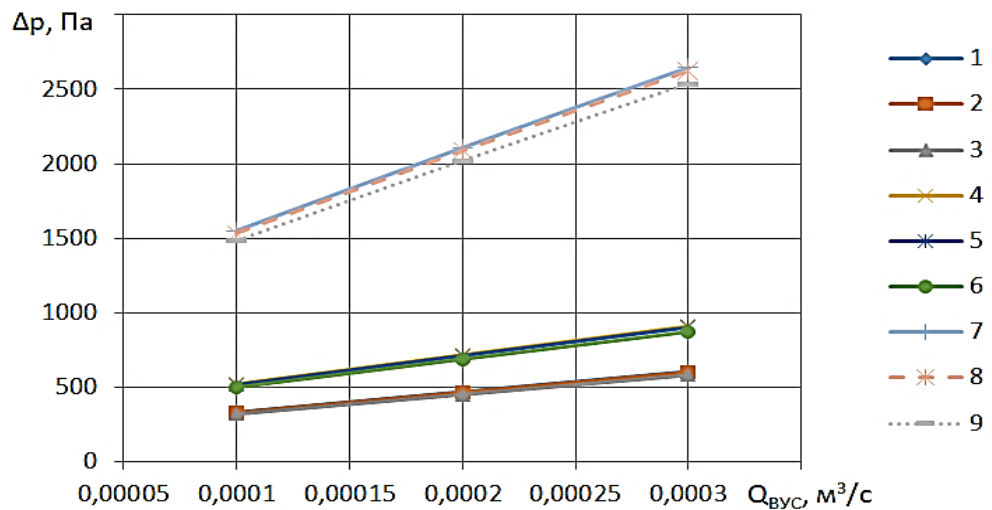
Рисунок 3.41 – Течение ТВУС в поворотах на 90° и 180° для угля марки Г диаметр $D=0,15$ м; радиус изгиба (а- $3R$, б- $4,5R$); нач. напряжение сдвига $\tau_0=16,5$ Па; структурная вязкость $\mu_{cm}=2,2$ Па·с

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, (что подтверждает справедливость ранее предложенной гипотезы о характере течения данных сред в подобных условиях применительно к течению в фасонных частях [89]). При этом периферийное течение в пристенной кольцевой области имеет неизокинетический характер. Следует отметить, что непосредственно на входе в элемент в соответствии с начальными условиями течение изокинетично.

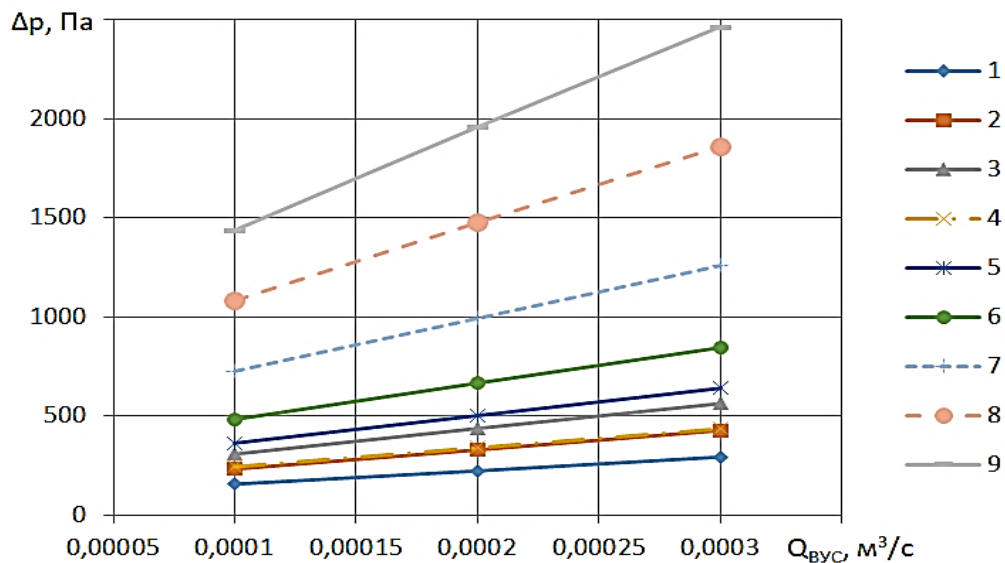
В результате расчетов и последующего анализа установлена линейная зависимость местных потерь давления от расхода высококонцентрированной водоугольной суспензии при значениях диаметра трубопровода, указанных в табл. 3.2, как для отвода с поворотом на 90° (а), так и на 180° (б) (рис.3.14-3.41). Это обстоятельство, очевидно, объясняется совпадением размерностей напряжения сдвига и давления – Па. Известна линейная зависимость сил механического трения от давления на трущиеся поверхности; вследствие этого логично предположить и прямую пропорциональность сил взаимного внутреннего трения слоев ТВУС увеличению градиента линейной скорости u , обуславливающего величину напряжения сдвига. Естественно, что связь величины скорости с ее градиентом характеризуется пропорциональностью (при сохранении кинетической структуры потока).

Действительно, полагая вязкость физической характеристикой вещества, не зависящей от скорости его перемещения, из соотношения размерностей, характерного для закона Ньютона $\tau = \mu \text{ grad } u$, имеем $\text{Па} = \text{Па} \cdot \text{с} \cdot \text{м} / \text{с} \cdot \text{м}$. Из анализа размерностей в левой и правой частях данного соотношения следует пропорциональность напряжения сдвига от скорости течения, при этом величину с размерностью $\text{Па} \cdot \text{с} / \text{м}$ следует расценивать как удельную динамическую вязкость суспензии, (приведенную к погонному метру слоя суспензии). Трудно ожидать, что в результате такого приведения она перестанет быть постоянной (для данного варианта суспензии) величиной.

Таким образом, проведенный анализ размерностей подтверждает полученный результат – линейную зависимость потерь давления от расхода ТВУС в трубопроводе.



а)



б)

а) поворот на 90° : 1, 2, 3 - $\tau_0=3,04$ Па, $\mu_{cm}=0,54$ Па·с, радиус изгиба $0,5R$, $1,5R$, $3R$ соответственно; 4, 5, 6 - $\tau_0=5,3$ Па, $\mu_{cm}=0,77$ Па·с, радиус изгиба $0,5R$, $1,5R$, $3R$ соответственно; 7, 8, 9 - $\tau_0=16,5$ Па, $\mu_{cm}=2,2$ Па·с, радиус изгиба $0,5R$, $1,5R$, $3R$ соответственно;

б) поворот на 180° : 1, 2, 3 - $\tau_0=3,04$ Па, $\mu_{cm}=0,54$ Па·с, радиус изгиба $1,5R$, $3R$, $4,5R$ соответственно; 4, 5, 6 - $\tau_0=5,3$ Па, $\mu_{cm}=0,77$ Па·с, радиус изгиба $1,5R$, $3R$, $4,5R$ соответственно; 7, 8, 9 - $\tau_0=16,5$ Па, $\mu_{cm}=2,2$ Па·с, радиус изгиба $1,5R$, $3R$, $4,5R$ соответственно

Рисунок 3.42 – Зависимость потерь давления от расхода ТВУС для угля марки Г (диаметр $D=0,05$ м)

В ходе обработки результатов численных экспериментов установлено, что потери давления для поворота на 90° в диапазоне указанных исходных данных (табл. 3.2) снижаются с увеличением радиуса кривизны поворота, однако при увеличении $R_{изг}$ в 6 раз (от $0,5R$ до $3R$) Δp снижается не более чем на 10% (см. рис. 3.42а), в связи с чем влиянием радиуса изгиба трубопровода на сопротивление фасонной части можно пренебречь. Соответствующее математическое выражение с учетом того, что указанные потери существенно зависят от структурной вязкости и начального напряжения сдвига, целесообразно аппроксимировать следующей экспоненциальной функцией:

$$\Delta p = \rho_{BVC} \cdot g \cdot \exp(a + b \cdot \ln D + c \cdot \ln Q_{BVC}), \quad (3.35)$$

где ρ_{BVC} - плотность ТВУС, кг/м³; g - ускорение свободного падения, м/с²; a , b , c – коэффициенты; D – диаметр трубопровода, м; $Q_{ТВУС}$ – расход суспензии, м³/с.

Для выяснения закономерностей влияния на коэффициенты уравнения 1 величин τ_0 и $\mu_{ст}$ и одновременного обеспечения линейности данного выражения для потерь давления были выполнены дополнительно численные исследования указанного течения ТВУС методом конечных объемов в приложении COMSOLmultiphysics (табл. 3.3).

Таблица 3.3 – Величина коэффициентов a , b , c при различных значениях τ_0 и $\mu_{ст}$ для поворота на 90°

Коэфф.	Начальное напряжение сдвига τ_0 , Па/ Структурная вязкость $\mu_{ст}$, Па·с								
	1,98/ 0,22	3,04/ 0,54	3,07/ 0,5	4,6/ 0,57	5,3/ 0,77	6,4/ 0,67	10,9/ 0,79	15,5/ 0,93	16,5/ 2,2
a	-4,69	-4,09	-4,13	-3,98	-3,74	-3,73	-3,45	-3,18	-2,77
b	-1,69	-2,02	-1,94	-1,76	-1,83	-1,58	-1,37	-1,23	-1,77
c	0,6	0,69	0,67	0,6	0,62	0,54	0,47	0,42	0,59

Для определения формы поверхности отклика, а также её математической интерпретации, представлены трехмерные зависимости коэффициентов a , b , c от величины реологических показателей топливной водоугольной суспензии (рис. 3.43 а, б, в).

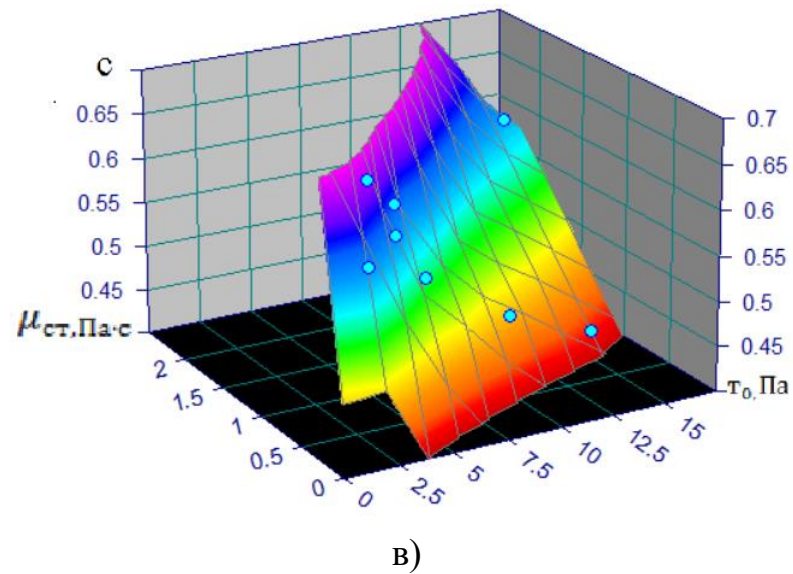
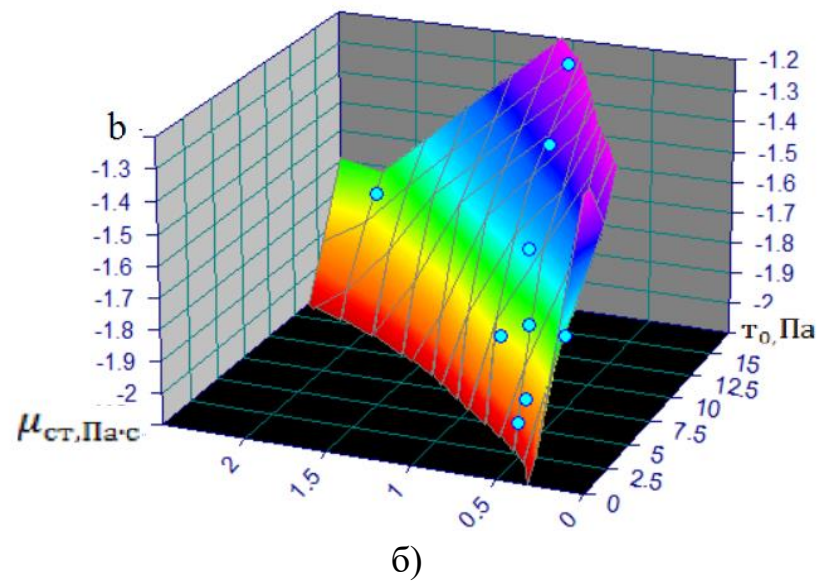
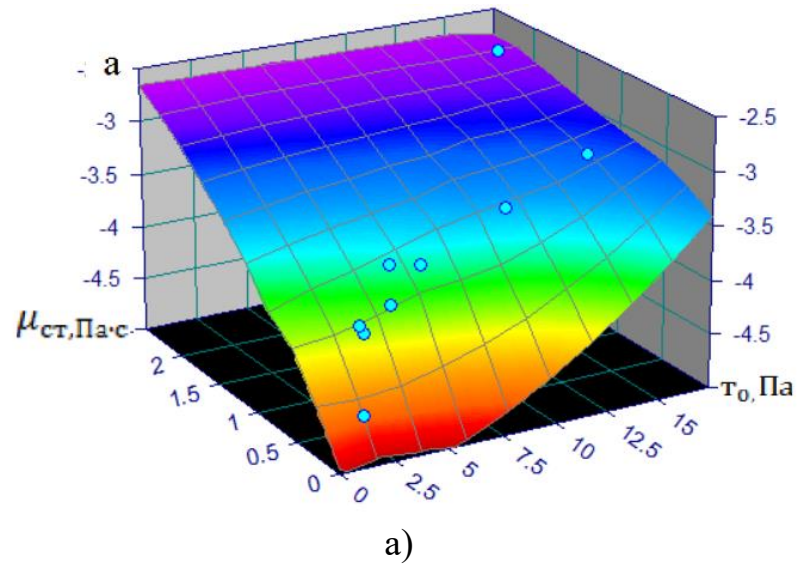


Рисунок 3.43 -Зависимости коэффициентов a , b , c от начального напряжения сдвига τ_0 и структурной вязкости $\mu_{ст}$ - а, б, в соответственно

Полученные двухпараметрические зависимости поверхности с точностью не менее $R^2=0,99$ аппроксимируются соответствующими выражениями специального вида:

$$a = -\frac{1}{0,141 + 0,022\sqrt{\tau_0} + 0,087\sqrt{\mu_{cm}}};$$

$$b = -3,2 + 0,7 \ln \tau_0 - 0,68 \ln \mu_{cm};$$

$$c = 1,07 - 0,23 \ln \tau_0 + 0,21 \ln \mu_{cm}.$$

Аналогичные вычисления были проведены также в отношении отводов с углом поворота 180° .

В результате обработки результатов данных численных экспериментов установлено, что зависимость потерь давления в диапазоне указанных исходных данных (см. табл. 3.2) определяется аналогичным (3.35) (с учетом отличия в виде наличия коэффициента k_R) выражением вида

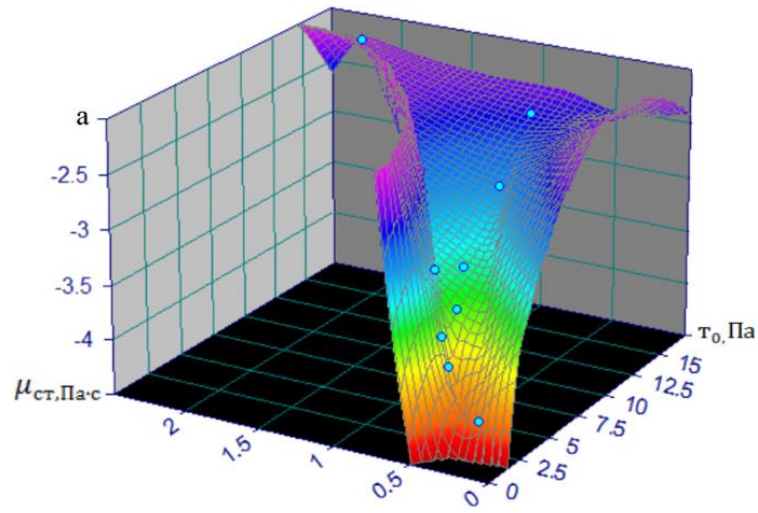
$$\Delta p = k_R \cdot \rho_{BVC} \cdot g \cdot e^{a+b \ln D + c \ln Q_{BVC}}, \quad (3.36)$$

где k_R - коэффициент, зависящий от радиуса изгиба трубопровода.

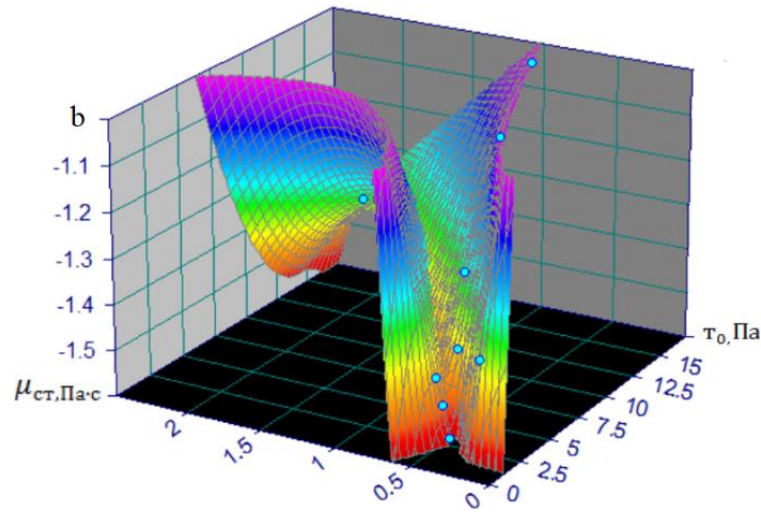
Значения коэффициентов a , b , c зависят от величины начального напряжения сдвига τ_0 и структурной вязкости μ_{cm} (табл. 3.4 и рис. 3.44).

Таблица 3.4 – Величина коэффициентов a , b , c при различных значениях τ_0 и $\mu_{ст}$ для поворота на 180°

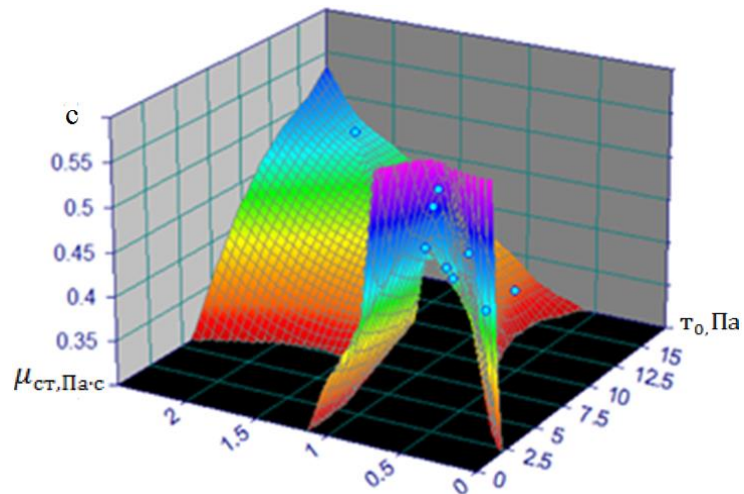
Коэфф.	Начальное напряжение сдвига, Па/ Структурная вязкость, Па·с								
	1,98/0,22	3,04/0,54	3,07/0,5	4,6/0,57	5,3/0,77	6,4/0,67	10,9/0,79	15,5/0,93	16,5/2,2
1,5R									
a	-4,69	-4,18	-4,26	-4,10	-3,87	-3,82	-3,54	-3,22	-2,84
b	-1,46	-1,64	-1,68	-1,42	-1,46	-1,32	-1,09	-1,03	-1,47
c	0,51	0,54	0,56	0,46	0,47	0,43	0,35	0,33	0,47
3R									
a	-4,53	-3,99	-3,8	-3,74	-3,50	-3,48	-3,15	-2,83	-2,43
b	-1,39	-1,53	-1,6	-1,44	-1,53	-1,31	-1,10	-1,01	-1,41
c	0,46	0,48	0,54	0,465	0,48	0,42	0,35	0,32	0,45
4,5R									
a	-4,19	-3,61	-3,86	-3,48	-3,24	-3,26	-2,86	-2,51	-2,18
b	-1,42	-1,62	-1,46	-1,4	-1,48	-1,32	-1,09	-0,94	-1,43
c	0,48	0,52	0,45	0,45	0,47	0,42	0,35	0,3	0,45-



а)



б)



в)

а) - коэффициент a радиус изгиба $4,5R$; б) - коэффициент b радиус изгиба $3R$;

в) - коэффициент c радиус изгиба $1,5R$

Рисунок 3.44 – Зависимости коэффициентов a , b , c от начального напряжения сдвига τ_0 и структурной вязкости $\mu_{ст}$ при различных значениях радиуса изгиба трубопровода для поворота на 180° (диаметр $D=0,05$ м)

Анализ графического представления результатов численных исследований зависимостей коэффициентов a , b , c от величины реологических показателей водоугольного топлива, выполненных при разных значениях радиуса изгиба трубопровода (рис. 3.44 а, б, в) позволил установить, что зависимость коэффициентов аппроксимации a , b , c для поворота на 180° носит сложный характер с выраженными локальными экстремумами, что обусловило введение в качестве аппроксимирующих выражений функций специального вида, которые с привязкой к соответствующим радиусам поворота, представлены непосредственно ниже.

$$1,5R \left\{ \begin{array}{l} a = -\frac{1}{0,17 + 0,0044\tau_0 - 0,075\mu_{cm}^{0,5}}; \\ b = -\frac{1}{1,53 - 2,38\frac{\ln \tau_0}{\tau_0} - 0,13\mu_{cm}^{1,5}}; \\ c = 0,101 + \frac{0,97}{\tau_0^{0,5}} + 0,17 \ln \mu_{cm}. \end{array} \right.$$

$$3R \left\{ \begin{array}{l} a = -\frac{1}{0,16 + 0,0056\tau_0 + 0,11\mu_{cm}^{0,5}}; \\ b = -0,0023 - 3,8\frac{\ln \tau_0}{\tau_0} - 0,35\mu_{cm}; \\ c = -0,012 + 1,27\frac{\ln \tau_0}{\tau_0} + 0,111\mu_{cm}. \end{array} \right.$$

$$4,5R \left\{ \begin{array}{l} a = -\frac{1}{0,18 + 0,0085\tau_0 + 0,095\mu_{cm}^{0,5}}; \\ b = -\frac{1}{0,69 + 0,046\tau_0 - 0,34\mu_{cm}}; \\ c = 0,47 - 0,039(\ln \tau_0)^2 + 0,13\mu_{cm}. \end{array} \right.$$

Представленные зависимости адекватно аппроксимируют результаты вычислений с точностью, соответствующей значению $R^2=0,99$.

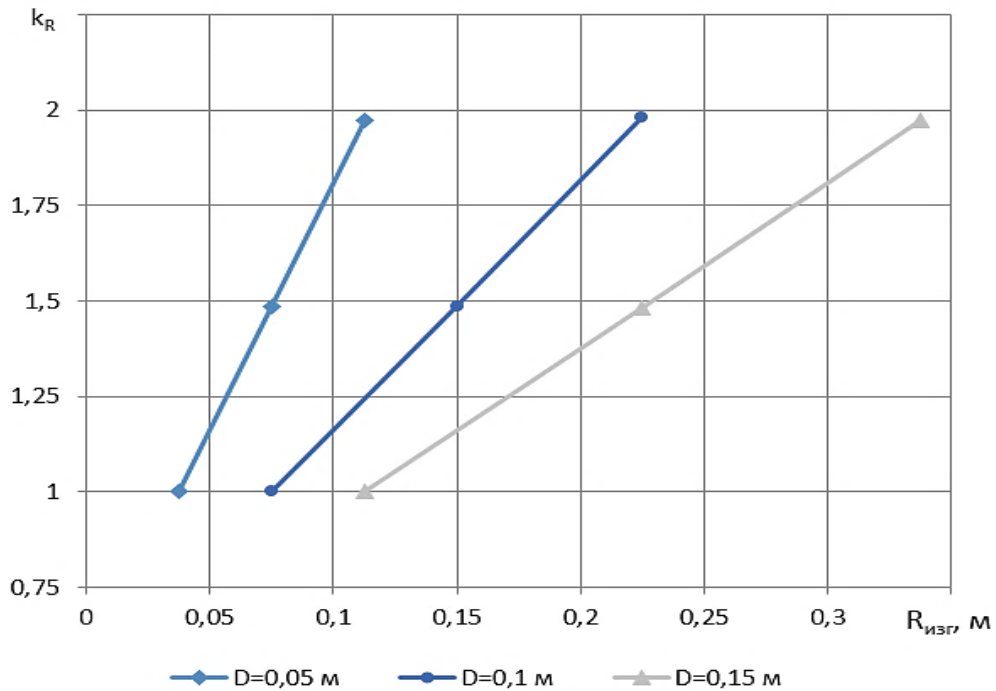


Рисунок 3.45 – Зависимости коэффициента k_R от радиуса изгиба трубопровода $R_{изг}$

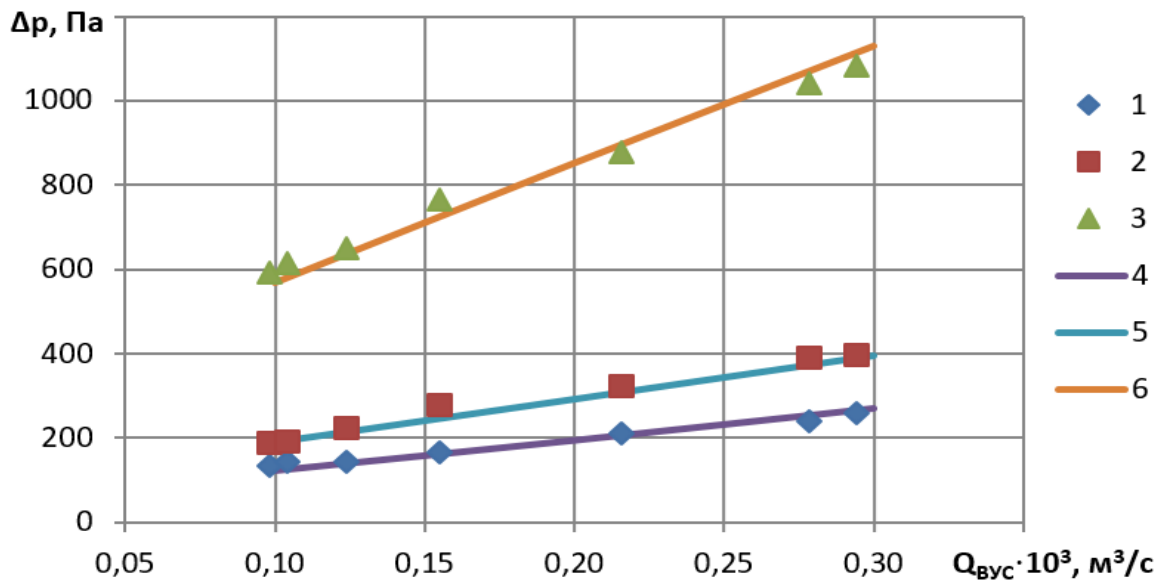
Анализ полученных зависимостей величины коэффициента k_R от радиуса изгиба трубопровода $R_{изг}$ (рис. 3.45) позволил установить, что его значение увеличивается при возрастании указанного параметра трубопровода. Аппроксимирующее выражение для численных результатов принимает вид (при $R^2=0,99$):

$$k_R = \frac{1}{0,86 + 0,43 \ln D - 0,43 \ln R_{изг}}. \quad (3.37)$$

Следует отметить, что коэффициент k_R не зависит от значений начального напряжения сдвига τ_0 и структурной вязкости $\mu_{ст}$, и определяется только геометрическими характеристиками трубопровода, его диаметром D и радиусом колена $R_{изг}$, что обусловлено, очевидно, постоянством кинетической структуры течения ТВУС в присутствии ему ламинарном режиме.

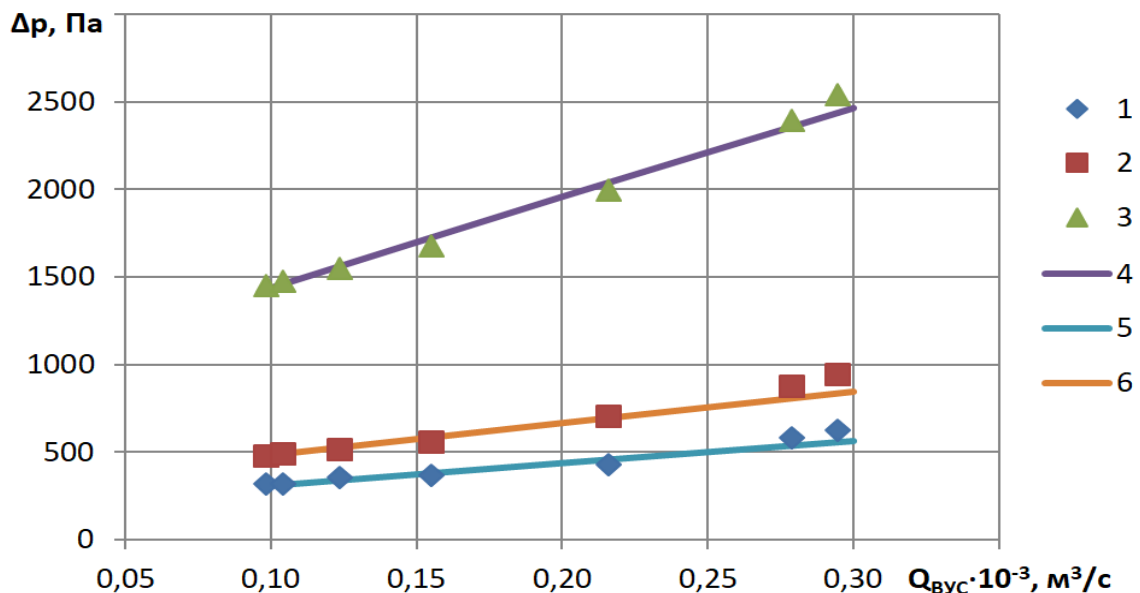
Для проверки адекватности результатов численного моделирования течения высококонцентрированной водоугольной среды в фасонных элементах (поворотах на 90° и 180°), произведена сравнительная оценка расчетных и

экспериментальных потерь давления, полученных при гидравлических испытаниях на лабораторном стенде [97] (рис. 3.48, 3.49).



1, 2, 3 – экспериментальные точки для $\tau_0=3,04$ Па, $\mu_{см}=0,54$ Па·с, $\rho_{ТВУС}=1142$ кг/м³; $\tau_0=5,3$ Па, $\mu_{см}=0,77$ Па·с, $\rho_{ТВУС}=1148$ кг/м³; $\tau_0=16,5$ Па, $\mu_{см}=2,2$ Па, $\rho_{ТВУС}=1155$ кг/м³ соответственно; 4, 5, 6 – результаты численного моделирования для $\tau_0=3,04$ Па, $\mu_{см}=0,54$ Па·с, $\rho_{ТВУС}=1142$ кг/м³; $\tau_0=5,3$ Па, $\mu_{см}=0,77$ Па·с, $\rho_{ТВУС}=1148$ кг/м³; $\tau_0=16,5$ Па, $\mu_{см}=2,2$ Па, $\rho_{ТВУС}=1155$ кг/м³ соответственно

Рисунок 3.48 – Расчетные и экспериментальные потери давления в повороте на 90° (уголь марки Г), $D=0,05$ м, $R_{изг}=3R$



1, 2, 3 – экспериментальные точки для $\tau_0=3,04$ Па, $\mu_{см}=0,54$ Па·с, $\rho_{ТВУС}=1142$ кг/м³; $\tau_0=5,3$ Па, $\mu_{см}=0,77$ Па·с, $\rho_{ТВУС}=1148$ кг/м³; $\tau_0=16,5$ Па, $\mu_{см}=2,2$ Па, $\rho_{ТВУС}=1155$ кг/м³ соответственно; 4, 5, 6 – результаты численного моделирования для $\tau_0=3,04$ Па, $\mu_{см}=0,54$ Па·с, $\rho_{ТВУС}=1142$ кг/м³; $\tau_0=5,3$ Па, $\mu_{см}=0,77$ Па·с, $\rho_{ТВУС}=1148$ кг/м³; $\tau_0=16,5$ Па, $\mu_{см}=2,2$ Па, $\rho_{ТВУС}=1155$ кг/м³ соответственно

Рисунок 3.49 – Расчетные и экспериментальные потери давления в поворот на 180° (уголь марки Г), $D=0,05$ м, $R_{изг}=4,5R$

Установлено, что результаты численного моделирования течения водоугольного топлива в поворотах на 90° и 180° хорошо коррелируют с экспериментальными данными, а величина относительного отклонения не превышает 10%.

Данный факт может быть обусловлен следующими сопутствующими ему обстоятельствами:

1) перестройка кинематической структуры потока (как это видно на рис. 3.14-3.41) происходит в первой по ходу потока половине полуокружности, которая соответствует колену в 90° , поэтому зона деформации изокинетичного входного потока, которая в значительной мере определяет сопротивление колена в целом, имея относительно небольшую протяженность в сравнении с развернутой длиной данного колена, в относительных размерах практически вдвое больше в сравнении с 180° -тиградусным коленом;

2) незначительное смещение ядра потока к наружной образующей колена (см. рис. 3.14-3.41), закономерно вызванное действием центробежной силы, небольшой вследствие малой скорости течения и также вызывающее некоторые гидравлические потери также происходит в первой половине указанной полуокружности, районировав и данный компонент сопротивления в колене 90° ;

3) стабилизированная кинетическая структура потока (степень его деформации) в повороте определяется величиной действующей центробежной силы. В диапазоне исследованных значений скорости данные силы характеризуется малыми величинами и практически к незначительному изменению спектра скоростей в трубопроводе.

С учетом указанных обстоятельств, протяженность участка стабилизированного течения в колене имеет разное значение для величины его местного гидравлического сопротивления: в 180° -градусном колене его длина практически вдвое больше в сравнении с 90° -градусным при одинаковом радиуса изгиба. Естественно, что при увеличении радиуса изгиба такого колена увеличивается его развернутая длина, что и обуславливает пропорциональное

увеличение гидравлических потерь. Влияние зоны перестройки потока на указанное изменение сопротивления сводится к постоянной величине, не зависящей от радиуса изгиба.

Что касается 90-градусного колена, то для него характерна взаимная компенсация последствий воздействия на суммарное местное гидравлическое сопротивление центробежных сил, увеличивающихся с уменьшением радиуса изгиба трубопровода и сил сопротивления участка стабилизированного течения, протяженность которого увеличивается по мере возрастания радиуса.

Таким образом, эффект увеличения местного сопротивления по мере увеличения радиуса изогнутого участка трубопровода, характерный, как следует из результатов данного исследования, для течения ТВУС в 180-тиградусном колене получил объяснение, по крайней мере, в качественном отношении.

Для определения радиуса изгиба поворота на 180° , обеспечивающего минимизацию потерь давления, произведено построение и анализ зависимости потерь энергии Δp от кривизны фасонной части $R_{изг}$ для угля марки А с концентрацией твердого компонента в ТВУС 62%, при этом плотность среды составила 1215 кг/м^3 (рис. 3.50).

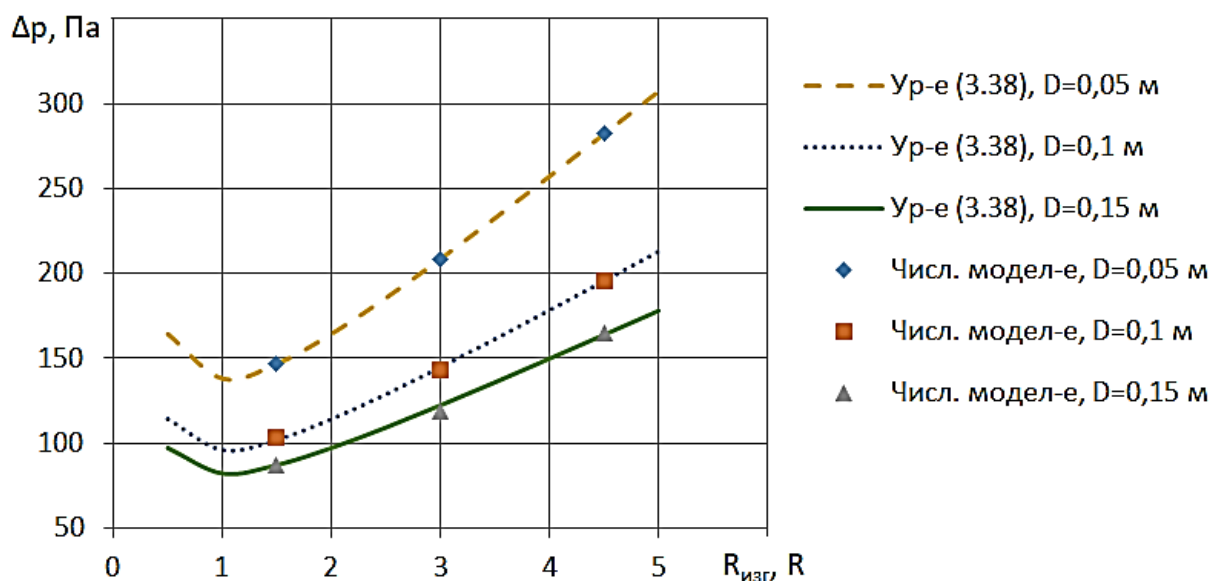


Рисунок 3.50 – Зависимость величины потерь давления от радиуса кривизны поворота на 180°

Анализ кривых, приведенных на рисунке 3.50, позволил установить, что связь кривизны $R_{изг}$ фасонной части и потерь давления Δp носит нелинейный характер и с точностью $R^2=0,99$ аппроксимируется выражением

$$\Delta p = \left(a + b \left(\ln(R_{изг}) \right)^2 \right)^2, \quad (3.38)$$

где a и b – коэффициенты аппроксимации.

Значения коэффициентов аппроксимации можно определить по следующим зависимостям

$$a = \sqrt{54,28 + \frac{4,19}{D}}; \quad b = \sqrt{-0,35 + \frac{1,19}{D^{0,5}}}.$$

У функции наблюдается локальный минимум при значении радиуса кривизны $R_{изг}=R$. Исходя из особенностей организации поворота трубопровода на 180° минимальным значением следует считать $R_{изг}=1,2R$.

3.4.3 Модель течения ТВУС в запорной арматуре.

Среди многообразия трубопроводной арматуры для технологических систем наиболее надежными являются задвижки – запорная арматура, в которой затвор (шибер, клин) перемещается перпендикулярно основному потоку суспензии. Шиберная задвижка может использоваться в качестве запорного устройства на трубопроводах с рабочим давлением до 25 МПа, с максимальным расходом $6 \text{ м}^3/\text{с}$ и скоростью транспортируемой среды до 5 м/с [39].

Преимущество пульповых задвижек перед общепромышленными клиновыми задвижками, пробковыми и шаровыми кранами заключается в отсутствии конструктивных элементов, быстро забивающихся мельчайшими частицами абразива, и приводящих к потере функциональности и выходу из строя данного узла в целом.

К положительным качествам задвижки следует отнести сравнительную простоту конструкции и малое гидравлическое сопротивление. У подобной

арматуры коэффициент гидравлического сопротивления при полностью открытом рабочем органе обычно находится в пределах, $\zeta=0,08-0,2$, в то время как у вентиля он составляет $\zeta=3-5$ и более [76].

В результате обработки и анализа результатов проведенных экспериментов [39] по определению зависимости изменения гидравлического сопротивления шибберных задвижек при течении дисперсных сред построены следующие графические зависимости (рис. 3.51).

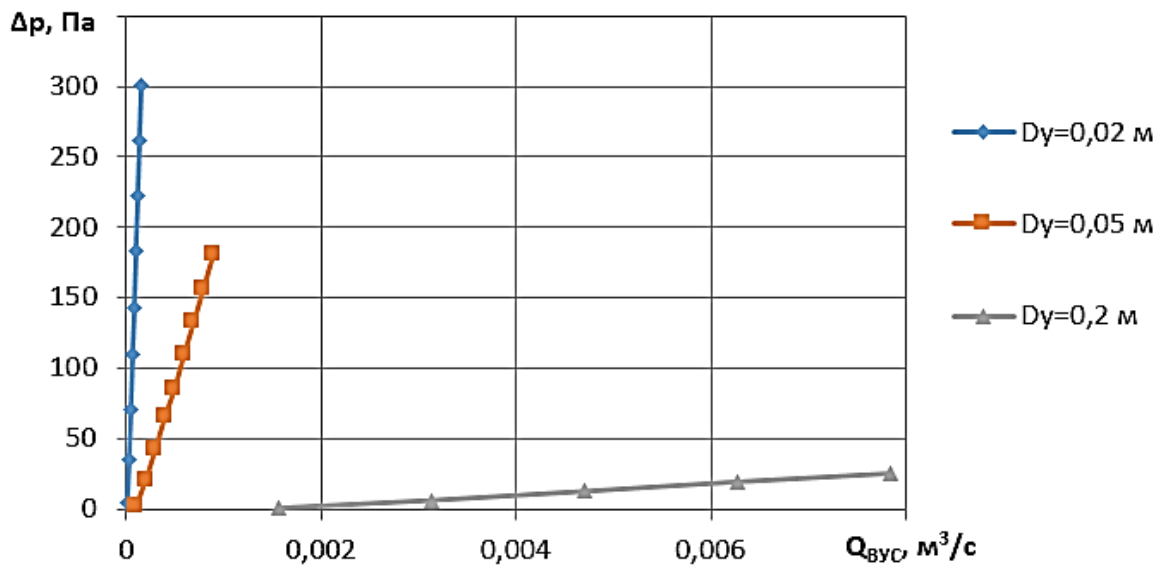


Рисунок 3.51 – Зависимость потерь давления от расхода ТВУС для шибберной задвижки ($\rho_{ТВУС}=1200 \text{ кг/м}^3$; $\tau_0=15,5 \text{ Па}$; $\mu_{cm}=0,93 \text{ Па}\cdot\text{с}$)

Для получения функциональной зависимостей потерь давления от величины расхода при разных диаметрах трубопровода, произведена аппроксимация полученных численных данных выражением ($R^2=0,98$):

$$\Delta p = \exp \left(2,35 - \frac{0,036}{\sqrt{Q_{BVC}}} + \frac{0,90}{\sqrt{D_y}} \right), \quad (3.39)$$

где D_y - диаметр условного прохода задвижки, м.

Следует отметить, что зависимость сопротивления трубопроводной арматуры от расхода жидкости, является линейной прямо пропорциональной с коэффициентом пропорциональности, зависящим только от диаметра трубопровода. Кроме того, при рекомендованных скоростях

транспортирования высококонцентрированных водоугольных сред, потери давления на открытой задвижке на порядок меньше, в сравнении с сопротивлением других фасонных элементов трубопровода. Вследствие этого, при незначительном количестве (1–5 ед.) данных элементов в трубопроводной системе, потерями давления на них в гидравлическом расчете можно пренебречь.

Выводы к разделу 3

В общем случае движение вязких сред описывается дифференциальными уравнениями Рейнольдса, которые получены в результате подстановки в уравнение Навье-Стокса вместо фактических значений скорости и давления их осредненных и пульсационных значений. При этом, осуществляется их модификация за счет использования соответствующих реологических моделей для определения показателей вязкости.

Следует отметить, что топливные водоугольные суспензии зачастую перемещают по трубопроводу с незначительными (до 0,5 м/с) скоростями, что первую очередь связано со снижением затрат на транспортирование дисперсной массы. Кроме того, высокие значения вязкости ТВУС обуславливают движение потока исключительно в ламинарном режиме, в связи с чем, из математических моделей исключаются все турбулентные члены.

С развитием вычислительной техники широкое распространение получили численные методы решения задач движения жидкости на основании широкого спектра математических гипотез, при этом расчет ведется как специализированных приложениях, так и в разработанных непосредственно исследователями. Подобный метод является эффективным и позволяет относительно точно определить параметры течения, в том числе и дисперсных сред, и ограничивается лишь вычислительной мощностью компьютеров, а также адекватностью используемого математического аппарата.

Совокупность свойств водоугольного топлива формирует характер его течения по трубопроводу. Реализуются три случая течения ТВУС: с

сохранением коагуляционных структур, их полном разрушении, а также режим частичного разрушения структуры в промежутке между ядром потока и стенкой трубопровода, такое поведение обуславливает необходимость учета зависимости вязкостных характеристик от реализуемой скорости течения (скорости сдвига).

Произведен анализ параметров течения водоугольной суспензии по трубопроводу, в ходе которого установлено, что для водоугольных дисперсий при рекомендуемых скоростях течения на значительной площади сечения трубопровода (до 98%) реализуются скорости сдвига менее 9 с^{-1} . Этот факт обуславливает необходимость учета специфики движения данной зоны при расчете потерь давления, так как на начальном участке рост величины касательных напряжений нелинейно зависит от значения $\dot{\gamma}$.

В рамках исследований течения ТВУС получены новые выражения на основе скорректированного механизма силового взаимодействия давления и вязкостного трения при внутритрубном течении дисперсий, что позволило повысить точность определения расхода ТВУС до 70% по сравнению с выражением Букингема. Произведен учет динамически изменяющихся в зависимости от скорости сдвига реологических характеристик. При этом вычисления производились для участков до 9 с^{-1} и более по различным зависимостям, отражающим характер изменения величины касательного напряжения от градиента скорости сдвиговых деформаций. Полученные выражения для указанного класса жидкостей более достоверно (до 30%) позволяют определить зависимость удельных потерь давления от расхода дисперсной среды.

Произведено численное моделирование течения топливных водоугольных суспензий в фасонных частях трубопровода методом конечных объемов и установлено, что течение характеризуется образованием стабильного ядра потока жидкости с постоянной величиной скорости и неизокинетичным кольцевым периферийным слоем. Получены расчетные зависимости потерь давления на поворотах 90° и 180° в функции расхода

ТВУС с учетом концентрации твердого компонента и диаметра трубопровода, которые характеризуется линейностью и является прямопропорциональными.

Величина гидравлического сопротивления поворота трубопровода на 90° при движении таких сред с рекомендуемыми скоростями существенно не зависит от радиуса изгиба.

Впервые предложены полуэмпирические зависимости гидравлических потерь фасонных частей от расхода дисперсной среды с учетом начального напряжения сдвига, структурной вязкости, диаметра трубопровода, а также радиуса закругления для поворота на 180° . Данные зависимости обоснованы результатами проведенных расчетных и экспериментальных исследований.

Анализ результатов моделирования движения водоугольных дисперсных сред в фасонных элементах трубопровода показал, что при рекомендуемых режимах течения не происходит значительной деформации потока и потерь энергии, при этом следует рекомендовать значения радиуса изгиба не менее $3R$.

Предложена эмпирическая зависимость для определения сопротивления шиберной задвижки от расхода ТВУС. Из анализа полученных количественных значений данного параметра следует, что при реальных скоростях гидротранспортирования, сопротивлением данных элементов в расчете гидравлических потерь системы гидротранспорта топливных водоугольных сред допустимо пренебрегать.

Учет сопротивления фасонных элементов и арматуры при вычислении суммарных потерь давления (напора) позволяет повысить точность их определения до 10 %, в зависимости от конфигурации трубопроводной системы.

РАЗДЕЛ 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ И ТЕЧЕНИЯ ТВУС

4.1 Моделирование процессов течения концентрированной водоугольной суспензии в лабораторных условиях

Методы подобия достаточно эффективны при изучении задач гидродинамики. Их применение позволяет научно обосновывать приемы моделирования действительных процессов в лабораторных условиях. Это позволяет сформулировать требования, которые необходимо предъявлять к лабораторным моделям и проведению на них исследуемого процесса, чтобы результаты математического моделирования было возможно использовать при проектировании реальных трубопроводных систем [1, 37, 53].

Вследствие сложности и многообразия течений концентрированных водоугольных суспензий, представляющих собой неньютоновские жидкости, обладающие высокой вязкостью и сложным реологическим поведением, зависящим от многих внешних и внутренних факторов, их исследование зачастую целесообразно проводить на специальных моделирующих установках. Использование реальных механизмов и проведенные экспериментальные исследования позволяют определить достоверность установленных на модели закономерностей. Эксперименты в реальных условиях, как правило, обходятся намного дороже и являются более трудоемкими.

При исследовании процессов течения топливных водоугольных суспензий (ТВУС) в системах промышленного производства, теория подобия и моделирования рассматривается как база научной постановки опытов и обобщения экспериментальных данных. Основные теоремы теории подобия [53]:

1. Подобные явления имеют одинаковые критерии подобия.
2. Зависимость между переменными, характеризующими явление, может быть представлена как зависимость между критериями подобия (π -теорема).

3. Необходимым и достаточным условием подобия является подобие условий однозначности и равенство определяющих критериев подобия изучаемого явления.

4. Подобны те явления, которые описываются одной и той же системой дифференциальных уравнений и у которых соблюдается условие однозначности.

Приведенные выше теоремы могут быть проиллюстрированы выражением, которое дает значение масштабного коэффициента перехода для каждого параметра l

$$l_n = K_l \cdot l_m, \quad (4.1)$$

где m, n – индексы параметра соответственно для модели и природы; K_l – коэффициент перехода от природы к модели для данного параметра.

Очевидно, что для моделирования рабочих характеристик сложной однородной системы необходимо и достаточно выполнить небольшой по объему определительный натурный эксперимент для контроля точности расчета масштабных коэффициентов, связывающих параметры модели и природы.

Исходя из условия подобия (4.1) основных гидромеханических параметров, при движении двухфазных гидросмесей по трубопроводу, представим уравнения Навье-Стокса в общем виде для двух подобных течений жидкости на модели и натуре применительно к одной проекции (относительно остальных проекций выкладки запишутся аналогичным образом):

для природы

$$u_z^{(n)} \frac{\partial u^{(n)}}{\partial z^{(n)}} + u_r^{(n)} \frac{\partial u^{(n)}}{\partial r^{(n)}} = -\frac{1}{\rho^{(n)}} \frac{\partial p^{(n)}}{\partial z^{(n)}} + \frac{1}{\rho^{(n)}} \left[\frac{1}{r^{(n)}} \frac{\partial (\tau_{zr}^{(n)} r^{(n)})}{\partial r^{(n)}} + \frac{\partial \tau_{zz}^{(n)}}{\partial z^{(n)}} \right], \quad (4.2)$$

для модели

$$u_z^{(m)} \frac{\partial u^{(m)}}{\partial z^{(m)}} + u_r^{(m)} \frac{\partial u^{(m)}}{\partial r^{(m)}} = -\frac{1}{\rho^{(m)}} \frac{\partial p^{(m)}}{\partial z^{(m)}} + \frac{1}{\rho^{(m)}} \left[\frac{1}{r^{(m)}} \frac{\partial (\tau_{zr}^{(m)} r^{(m)})}{\partial r^{(m)}} + \frac{\partial \tau_{zz}^{(m)}}{\partial z^{(m)}} \right]. \quad (4.3)$$

Следует отметить, что составляющие дивергента тензора напряжений, составляются с учетом выбранной реологической модели и массовой концентрации твердого компонента.

Так как рассматриваемые процессы подобны, то из определения условий подобия следует

$$\frac{r^{(H)}}{r^{(M)}} = \frac{z^{(H)}}{z^{(M)}} = K_l; \quad \frac{u_z^{(H)}}{u_z^{(M)}} = \frac{u_r^{(H)}}{u_r^{(M)}} = K_u; \quad \frac{\rho^{(H)}}{\rho^{(M)}} = K_\rho; \quad \frac{p^{(H)}}{p^{(M)}} = K_p;$$

$$\frac{\tau_{zr}^{(H)}}{\tau_{zr}^{(M)}} = \frac{\tau_{zz}^{(H)}}{\tau_{zz}^{(M)}} = K_\tau = K_\mu \frac{K_u}{K_l}.$$

С учетом полученных уравнений, составляющие переменные уравнения (4.2) для натуре могут быть выражены через переменные для модели и наоборот

$$\begin{cases} r^{(H)} = K_l r^{(M)}; & z^{(H)} = K_l z^{(M)}; \\ u_z^{(H)} = K_u u_z^{(M)}; & u_r^{(H)} = K_u u_r^{(M)}; \\ \rho^{(H)} = K_\rho \rho^{(M)}; \\ \tau_{zz}^{(H)} = K_\tau \tau_{zz}^{(M)}; & \tau_{zr}^{(H)} = K_\tau \tau_{zr}^{(M)} \end{cases} \quad (4.4)$$

Подставим выражения (4.4) в (4.3) и получим уравнение течения в виде соотношения геометрического и динамического подобия

$$\frac{K_u^2}{K_l} u_z^{(H)} \frac{\partial u_z^{(H)}}{\partial z^{(H)}} + \frac{K_u^2}{K_l} u_r^{(H)} \frac{\partial u_z^{(H)}}{\partial r^{(H)}} = - \frac{K_p}{K_\rho K_l} \frac{1}{\rho^H} \frac{\partial p^{(H)}}{\partial z^{(H)}} +$$

$$+ \frac{K_\tau}{K_\rho K_l} \frac{1}{\rho^H} \left(\frac{1}{r^{(H)}} \frac{\partial (\tau_{zr}^{(H)} r^{(H)})}{\partial r^{(H)}} + \frac{\partial \tau_{zz}^{(H)}}{\partial z^{(H)}} \right). \quad (4.5)$$

Следует отметить, что в условиях структурного режима движения концентрированной водоугольной суспензии по трубопроводу критерий гомохронности и влияние силы тяжести на эпюры распределения скоростей и перепад давления могут быть исключены. Поэтому условием равенства критерия Фруда допустимо пренебречь.

Из основного определения гидромеханического подобия следует, что два явления подобны, если коэффициенты при переменных уравнения (4.5) равны, т.е.

$$\frac{K_u^2}{K_l} = \frac{K_p}{K_\rho K_l} = \frac{K_\tau}{K_\rho K_l}.$$

Для определения выполнения критериев подобия приравняем попарно полученные коэффициенты и подставим вместо них значения из формулы (4.4).

Получим

$$\frac{K_u^2}{K_l} = \frac{K_p}{K_\rho K_l} \Rightarrow \frac{K_p}{K_\rho K_u^2} = 1,$$

тогда $\frac{\rho^{(n)}}{\rho^{(n)} u_r^{(n)2}} = \frac{\rho^{(m)}}{\rho^{(m)} u_r^{(m)2}} = \frac{\rho}{\rho u_r^2} = Eu = idem$ – критерий Эйлера;

$$\frac{K_u^2}{K_l} = \frac{K_\tau}{K_\rho K_l} \Rightarrow \frac{K_u^2 K_\rho}{K_\tau} = 1,$$

тогда

$$\begin{aligned} & \frac{u_r^{2(n)} \rho^{(n)}}{\left(\tau_0(\dot{\gamma}, C, A^d, V^\Gamma, \Gamma) + \mu_{cm}(\dot{\gamma}, C, A^d, V^\Gamma, \Gamma) \dot{\gamma}\right)^{(n)}} = \\ & = \frac{u_r^{2(m)} \rho^{(m)}}{\left(\tau_0(\dot{\gamma}, C, A^d, V^\Gamma, \Gamma) + \mu_{cm}(\dot{\gamma}, C, A^d, V^\Gamma, \Gamma) \dot{\gamma}\right)^{(m)}} = \\ & = \frac{u_r^2 \rho}{\left(\tau_0(\dot{\gamma}, C, A^d, V^\Gamma, \Gamma) + \mu_{cm}(\dot{\gamma}, C, A^d, V^\Gamma, \Gamma) \dot{\gamma}\right)} = Re = idem \end{aligned}$$

– критерий Рейнольдса.

Первая теорема теории подобия гласит, что для различных величин в подобных явлениях всегда имеются строго определенные и одинаковые соотношения (одинаковые числа подобия). В гидромеханике важнейшими критериями подобия являются: критерий Фруда, критерий гомохронности, критерий Эйлера и критерий Рейнольдса. Следовательно, безразмерные коэффициенты указанных критериев должны быть равны между собой. Ранее было указано, что при установившемся течении концентрированной ТВУС по трубопроводу критериями гомохронности и Фруда можно пренебречь, тогда

основными числами подобия в данном случае являются числа Эйлера и Рейнольдса.

4.2 Методика проведения экспериментальных исследований

4.2.1 Цель и основные задачи проведения экспериментальных исследований.

Целью испытаний является экспериментальное определение реологических характеристик, гидравлических параметров транспортирования концентрированных ТВУС и получение закономерностей изменения энергетических затрат в зависимости от свойств транспортируемой среды и других факторов влияния.

Гидравлический транспорт различных материалов характеризуется совокупностью множества факторов, взаимосвязь которых обусловлена физической сущностью процесса движения взвешенного потока. Полученные теоретические зависимости описывают этот процесс в общем виде, а определение области их использования является одной из основных задач экспериментальных исследований.

Из множества параметров, определяющих процесс гидравлического транспортирования, наиболее значимыми являются концентрация твердых частиц и их гранулометрическое распределение в потоке суспензии, от величины которых зависят вязкость, плотность и потери давления потока дисперсной среды.

В процессе выполнения экспериментов по определению зависимости вязкости от концентрации твердых частиц необходимо учитывать, что она является косвенным параметром и может быть получена только опытным путем при замеренных значениях напряжения сдвига и градиента скорости. В совокупности такие параметры, как напряжение сдвига, градиент скорости сдвига и вязкость смеси являются реологическими характеристиками и,

следовательно, их определение является одной из основных задач экспериментальных исследований.

От реологических характеристик потока дисперсной среды зависят энергетические характеристики течения по трубопроводу в виде потерь давления, которые могут быть измерены непосредственно в процессе экспериментов. Рассчитанные таким образом гидравлические сопротивления необходимо сравнить со значениями, полученными по теоретическим зависимостям. По сходимости экспериментальных и теоретических результатов можно сделать вывод о степени адекватности математической модели реальным условиям внутритрубного течения.

Основной целью реологических исследований было обоснование вида реологической модели, условия формирования реологических свойств концентрированной суспензии угля.

На этапе лабораторных исследований решались основные экспериментальные задачи, и по полученным результатам определялась адекватность теоретических предположений.

4.2.2 Измеряемые параметры и измерительная аппаратура.

Как указывалось ранее, основной целью проведения экспериментальных исследований было определение реологических характеристик (μ_{cm}, τ_0) и гидравлических параметров транспортирования ($\Delta p = (p_1 - p_2) \rightarrow i = \frac{\Delta p}{L}$) концентрированной водоугольной суспензии. Для этого приборами (таблица 4.1) измерялись следующие параметры:

$\mu_э$ – эффективная вязкость ТВУС, Па·с;

τ – величина напряжения сдвига, Па;

t – время заполнения мерного бака, с;

V – объем жидкости, заполняющей бак за время t , л;

T – температура рабочей жидкости, °С;

p_1, p_2 – давления на участках трубопровода, Па.

Таблица 4.1 - Измерительные приборы

Наименование измеряемых параметров	Средства измерений			
	Наименование	Обозначение, тип	Диапазон измерения	Погрешность измерения
Эффективная вязкость рабочей смеси	Вискозиметр	Полимер РПЭ-1М	$1,8 \cdot 10^{-3} \div 3,75 \cdot 10^{-3}$	-
	Термометр	ТЛ-2 ГОСТ 215-73	-5-+255	$\pm 1 \text{ } ^\circ\text{C}$
Перепад давления на участках трубопровода	Манометр	М-1,6 ГОСТ 2405-72	0-0,16 МПа	$\pm 0,001 \text{ МПа}$
Время заполнения мерного бака	Секундомер	«Агат»4295Б ГОСТ5072-79	не ограничен	$\pm 1,9 \text{ с}$ за 60 мин
Объем жидкости	Указатель уровня мерного бака	-	0-35 л	$\pm 0,1 \text{ л}$
Наблюдение режима течения	Прозрачный участок трубопровода	-	-	-
Объем пробы жидкости	Мензурка	ГОСТ 29224-91	0-100 мл	$\pm 1 \text{ мл}$
Температура жидкости	Термометр	ТЛ-2 ГОСТ 215-73	-5-+255	$\pm 1 \text{ } ^\circ\text{C}$

4.2.3 Оценка погрешности измерений.

Для оценки точности результатов экспериментов определялись погрешности измерений искомых величин. Определение погрешности прямых многократных измерений производилось по существующим рекомендациям [195]. Находилось среднеквадратичное отклонение выборки размером n

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (4.6)$$

где n – число измерений на данном режиме испытаний (в данном опыте); x_i – результат i -го измерения; $\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n}$ – среднеарифметическое значение измеряемой величины.

В случае, если $x_i - \bar{x} \geq 3\sigma$ из выборки исключался результат i -го опыта и по формуле (4.6) пересчитывалось значение σ .

Вычислялось среднеарифметическое значение среднеквадратического отклонения $\sigma_o = \sigma/\sqrt{n}$.

При заданной доверительной вероятности $\alpha = 0,95$, находился коэффициент Стьюдента t_α (с использованием справочных данных [248]) и определялся доверительный интервал случайной составляющей погрешности $\Delta_{zc} = t_\alpha \sigma_o$

Погрешность средств измерения B_{np} определялась с использованием технической документации на измерительную аппаратуру, при этом:

– если $t_\alpha \sigma_o \leq 3B_{np}$, то граница доверительного интервала вычислялась по формуле [85, 195]

$$\Delta_z = \sqrt{(\Delta_{zc})^2 + \left(\frac{t_\alpha(\infty)}{3}\right)^2};$$

– если $t_\alpha \sigma_o > 3B_{np}$, то доверительный интервал определялся из выражения (4.6).

В случае, когда необходимо найти среднеквадратическое отклонение величины Y , являющейся функцией m параметров x_j результатов прямых измерений, т.е. определяемой в результате косвенных измерений $Y = f(x_1, x_2, \dots, x_m)$, использовалась формула

$$\sigma_y = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x_1} \sigma x_1\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2} \sigma x_2\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_m} \sigma x_m\right)^2}, \quad (4.7)$$

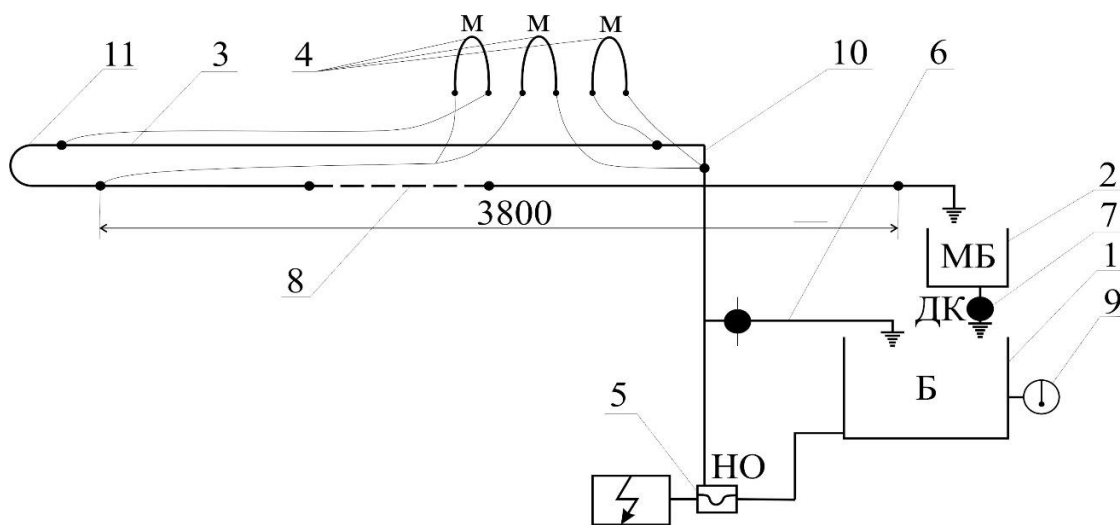
где $\frac{df}{dx_j}$ – частные производные функции $Y = f(x_1, x_2, \dots, x_m)$ по параметру x_j ;

$\sigma \cdot x_j$ – среднеквадратическое отклонение каждого из параметров, $j=1, \dots, m$

4.2.4 Описание и принцип работы экспериментального стенда.

Для исследования характеристик течения водоугольного топлива, на базе лаборатории ФГБОУ ВО ЛНР «Луганский государственный университет имени

Владимира Даля» была создана экспериментальная установка. На рисунке 4.1 (а, б) приведена схема экспериментального стенда и его фотография [97].



а)



б)

1 – емкость для суспензии; 2 – мерный бак; 3 – кольцевой трубопровод с измерительным участком; 4 – пьезометры; 5 – одновинтовой насос; 6 – перепуск; 7 – сливной патрубок с краном; 8 – прозрачный участок трубопровода; 9 – термометр; 10 – колено на 90°; 11 – колено на 180°

Рисунок 4.1 – Схема а и фотография б экспериментального стенда для исследования характеристик течения ТВУС

Эксперименты на гидравлическом стенде заключаются в перекачке подготовленной суспензии с различными концентрациями твердых частиц по кольцевому трубопроводу диаметром $D_y=50$ мм с помощью одновинтового

насоса 1В-10. Регулирование производительности насоса производится с помощью рециркуляции. В конструкцию встроен мерный бак объемом 35 л, который используется для определения действительной производительности насоса, расхода и средней скорости потока среды. Длина прямого измерительного участка на трубопроводе составляет 3800 мм, часть прямого участка является прозрачной, для наблюдения за движением жидкости и поведением твердых частиц. Длина прозрачного участка составляет 1000 мм. В качестве измерительных приборов используется три дифференциальных пьезометра, с помощью которых определяются перепады давления на прямом участке трубопровода, а также при повороте потока на 90° и 180° .

Стенд функционирует следующим образом: ТВУС с помощью одновинтового насоса 5, который приводится в действие электродвигателем, из бака 1 поступает в трубопровод с измерительным участком 3, который снабжен перепуском 6 для регулирования скорости движения топлива, коленами на 90° 10 и 180° 11 и прозрачным участком 8. Из трубопровода 3 среда поступает в мерный бак 2, из которого она поступает в бак 1 через сливной патрубок с краном 7, расположенного в днище мерного бака 2, гидравлические сопротивления на участках трубопровода измеряются дифференциальными пьезометрами 4.

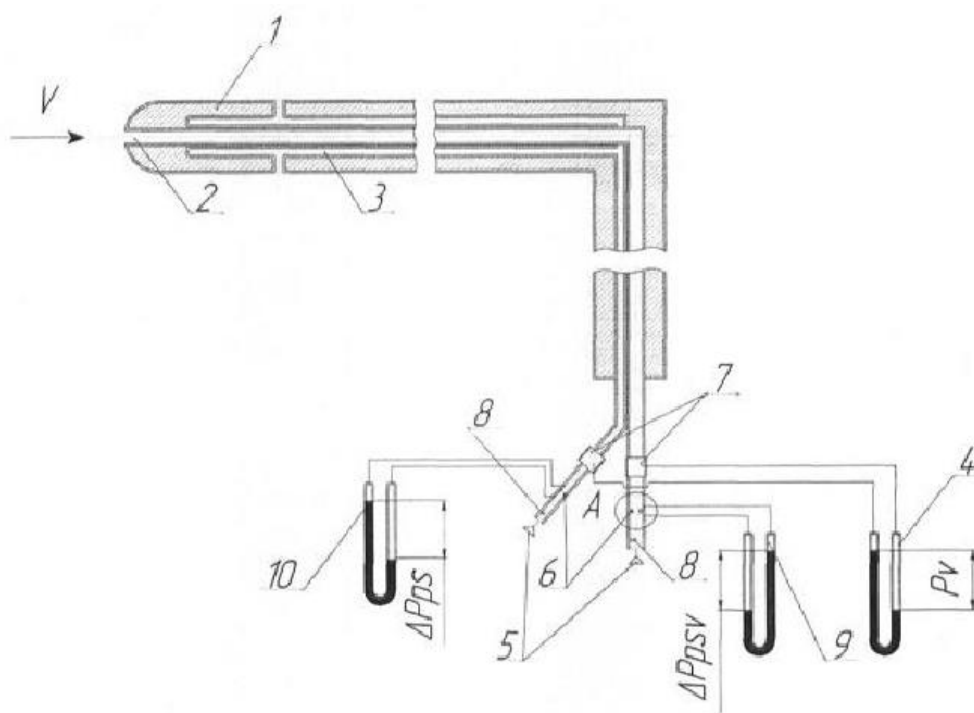
Использование винтового насоса обусловлено, прежде всего, свойствами транспортируемой среды с большим количеством твердой фазы более 50% и необходимой величиной подачи, которая бы обеспечивала скорость движения водоугольной смеси до 2,0 м/с. Центробежных насосов с такой подачей для таких жидкостей в нашей стране не производится.

Отличием стенда является наличие прозрачного участка, который расположен посередине прямого участка и предоставляет возможность наблюдать за поведением твердых частиц в суспензии. Также стенд имеет различия в измерительных приборах. Вместо U-образных манометров используются дифференциальные пьезометры, которые позволяют избежать

неточностей измерения из-за поступления жидкости в каналы, которые связывают манометры с соответствующими точками измерения.

Для расширения диапазонов измерения параметров течения высококонцентрированных водоугольных суспензий в конструкцию стенда внесены изменения, связанные с установкой на выходе их кольцевого трубопровода 3 шарового крана, который позволит снизить минимальное значение расхода (скорости течения) в трубопроводе.

Для экспериментального определения распределения скоростей потока по сечению трубопровода на прямолинейном участке кольцевого трубопровода 3 может быть установлен специальный узел, который и предназначен для фиксации скоростей течения жидкости с высоким содержанием твердой фазы на различном удалении от центра потока (рис. 4.2) [176].



1 – трубка Пито-Прандтля; 2 – трубка полного давления; 3 – трубка статического давления; 4 – манометр динамического давления; 5 – источник сжатого воздуха; 6 – измерительная диафрагма; 7 – воздушный ресивер; 8 – регулирующий дроссель; 9 – манометр полного давления; 10 – манометр статического давления

Рисунок 4.2 – Узел определения скоростей течения ТВУС

Предложенный экспериментальный стенд позволяет изучать характеристики течения водоугольного топлива (высококонцентрированной

водоугольной суспензии) с концентрацией твердой фазы более 50%, а также процессы переноса взвешенных твердых частиц в процессе движения по трубопроводу со средней скоростью течения от 0,05 м/с до 2,0 м/с при начальном напряжении сдвига до 20 Па.

4.3 Определение реологических характеристик ТВУС

Для определения реологических параметров суспензии был выбран ротационный вискозиметр «Полимер РПЭ 1-М1» с системой воспринимающих элементов «цилиндр-цилиндр». Этот тип вискозиметров является наиболее рациональным для определения параметров реологических моделей ТВУС, так как при использовании капиллярных вискозиметров трубки приборов засоряются крупными частицами твердого материала, что приводит к большой погрешности измерений.

В результате применения описанной выше методики установлены значения параметров реологической модели концентрированной водоугольной суспензии, приготовленной из углей марок Г, ОС, А с различной концентрацией. Опыты проводились по следующей схеме: в стакан вискозиметра заливался объем однородной суспензии, нормируемый инструкцией, после чего стакан вставлялся в вискозиметр и производился съем результатов. Скорость сдвига изменялась от 1,8 до 48,6 с⁻¹, при этом для каждой скорости сдвига проводилась серия из 3 опытов, со снятием стакана и гомогенизацией суспензии.

После проведения испытаний выполнено осреднение значений для каждой скорости сдвига и концентрации твердого компонента и определялось значение возникающего сдвигового напряжения.

Авторами проведены исследования по изучению реологических свойств концентрированной ТВУС при массовом содержании твердого компонента от 62 до 67% на базе лаборатории Луганского государственного университета им. В. Даля.

Свойства исследуемых углей представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 - Свойства исследуемых углей

Показатели	Марка угля		
	Г	ОС	А
Зольность A^d , %	13,6-35	10,0-35,2	10,0-35,1
Влажность W^f , %	8,0	9,0	5,1
Сера S_t^d , %	3,2	2,5	0,8
Выход летучих веществ V^G , %	45	25	5
Низшая теплота сгорания Q_H , ккал/кг	5868	6000	7188
Плотность, кг/м ³	1250	1325	1400

Проведен ситовой анализ исследуемого материала, включающий отбор проб для определения гранулометрического состава углей различной степени измельчения. Степень измельчения определяется величиной срединного диаметра частиц. Однако, при одинаковой величине данного параметра, наблюдается различное реологическое поведение получаемых суспензий, что обусловлено различным содержанием крупной (одномодальное распределение) и мелкой (одномодальное распределение) фракций в расसेве. Отношение их масс является критерием бимодальности, чем больше содержание мелкой фракции, тем выше значение критерия G .

В исследовании использованы сита с ячейками 800, 400, 280, 200, 100, 71 и 40 мкм, устанавливаемые в вибрационный ситовой анализатор, время рассева составляло 20 мин.

Рассев осуществлялся, промывкой исследуемого материала водой до получения осветленной воды на выходе. После чего сита просушивались. Содержание класса определялось взвешиванием остатка на сите на аналитических весах с точностью до 0,1 грамма.

В таблице 4.3 представлены полученные данные о гранулометрическом распределении фракций в исследуемых 8-ми пробах. Данные пробы получены в результате помола в шаровой мельнице с разной продолжительностью.

Таблица 4.3 - Гранулометрическое распределение исследуемых углей

№ п/п	Класс, мкм	Проба 1	Проба 2	Проба 3	Проба 4	Проба 5	Проба 6	Проба 7	Проба 8
		Выход классов, %							
1	500+	-	-	0,7	0,4	-	-	-	-
2	300-500	1,1	-	0,8	3,1	-	-	-	-
3	250-300	3,3	3,1	0,6	2,9	0,5	0,1	-	-
4	200-250	9,2	8,3	2,8	1,8	2,7	2,8	2,4	-
5	100-200	21,9	13,3	9,9	9	8,5	8	7,3	10,3
6	80-100	6,1	22,9	23	20,2	19,5	18,5	16	13,3
7	40-80	31,9	7,2	7,1	10,3	6,8	6,5	5,6	5,6
8	0-40	26,5	45,2	55,1	52,3	62	64,1	68,7	70,8
Значение критерия бимодальности Γ		0,71	1,02	1,54	1,69	2,02	2,19	2,67	3,01

Проведение данных испытаний обусловлено необходимостью определения существенных факторов влияния на поведение высококонцентрированного ВУТ при его внутритрубном течении для проведения в дальнейшем планированного эксперимента.

В связи со сложным поведением реологической кривой ТВУС в области определения скорости сдвига от 0 до 48,6 с⁻¹ [96] (что характерно для его внутритрубного течения) при условии выбора трех опорных точек (проба 2, проба 5, проба 8) по значению критерия бимодальности, возникла необходимость в определении параметров при промежуточных значений критерия Γ (проба 1, проба 3, проба 4, проба 6, проба 7).

С учетом предыдущих исследований в области течения высококонцентрированных ВУТ [8, 17, 37, 123, 204, 260, 264, 292], готовились пробы для реологического анализа с массовой концентрацией твердого материала 62, 64,5, 67%. При этом, низшая концентрация выбрана из соображений обеспечения минимально допустимой энергоемкости. Значения зольности A^d и выхода летучих веществ V^r принимали значения от 10 до 35,2% и от 5 до 45% соответственно для различных типов углей.

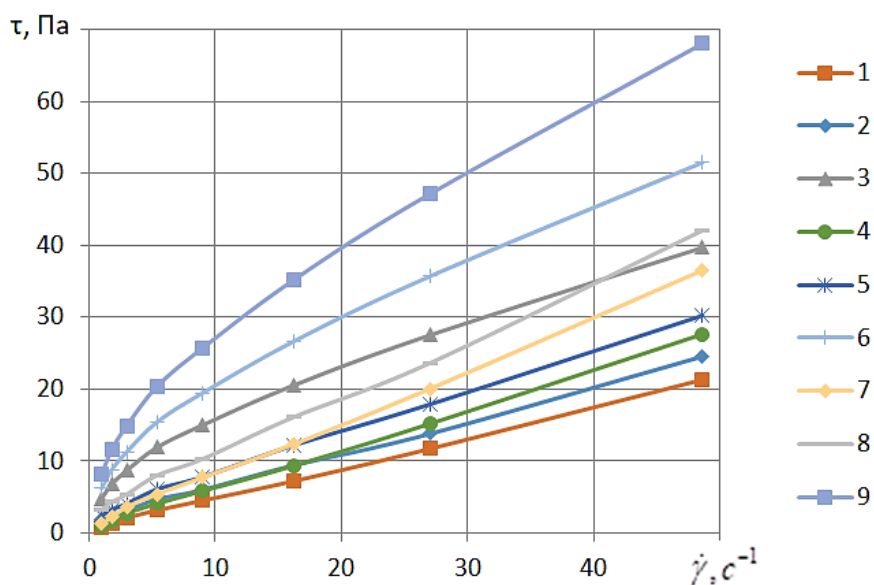
В стакан вискозиметра заливался объем суспензии, нормированный инструкцией, после чего стакан вставлялся в вискозиметр, и снимались результаты [95, 96]. Скорость смещения изменялась от 1 до 48,6 с⁻¹, при этом

для каждой скорости сдвига проводилась серия из 5 измерений, результаты которых при обработке усреднялись.

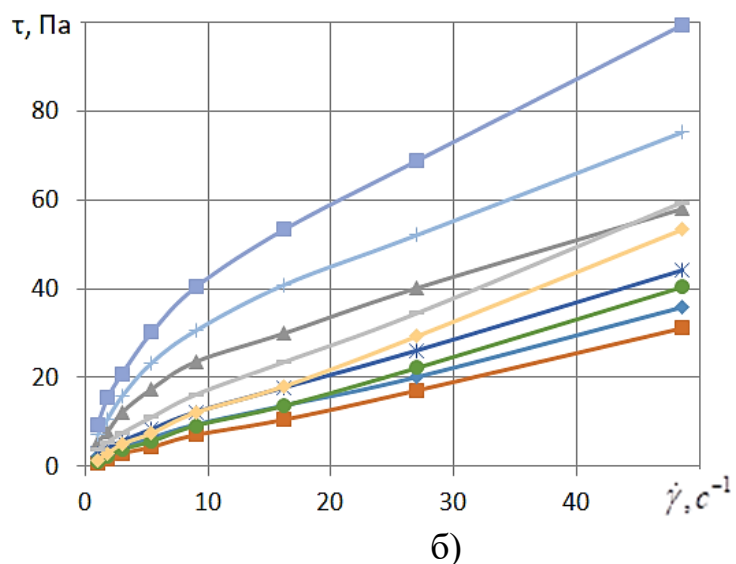
Ввиду сложности и разнохарактерности определяемых зависимостей для проведения эксперимента был выбран полнофакторный пятифакторный трехуровневый план. Пробные измерения показали недостаточность неполнофакторных планов для получения на их основе корректных функций отклика.

С целью обеспечения удобства доступа к результатам исследований и полноты восприятия по каждому из типов углей и комплексу свойств всех испытанных вариантов водоугольных составов, ниже по тексту приведены в графическом виде результаты реализации полнофакторного плана эксперимента.

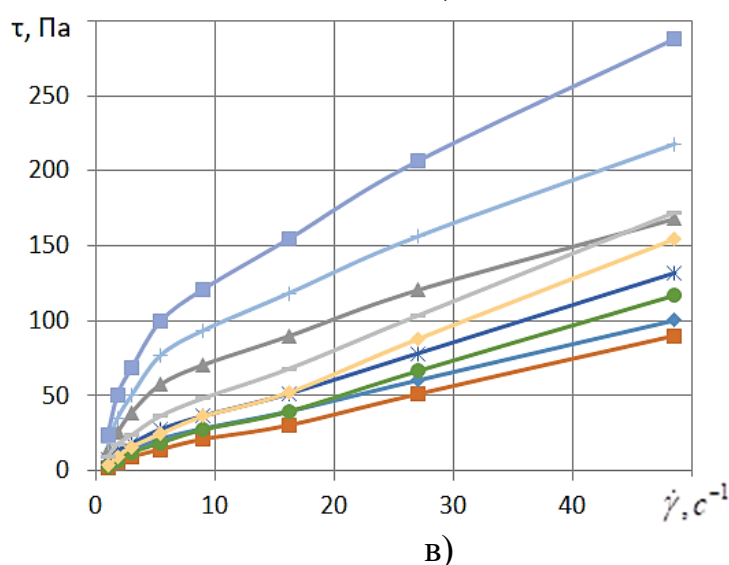
На рисунках 4.3 – 4.6 представлены кривые зависимости напряжения от скорости сдвига при различных значениях концентрации твердой фазы C , зольности исходного угля A^d , выхода летучих веществ V^T и критерия бимодальности Γ [96].



а)



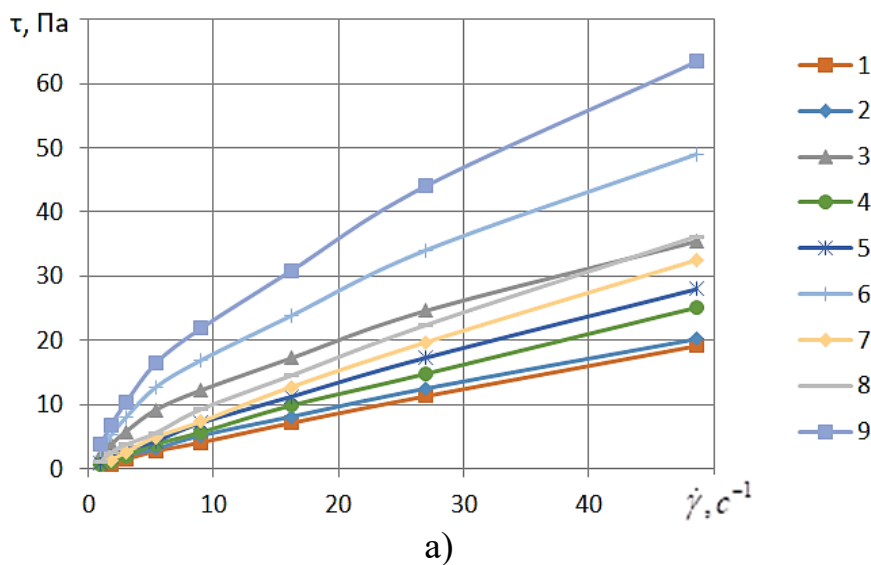
б)



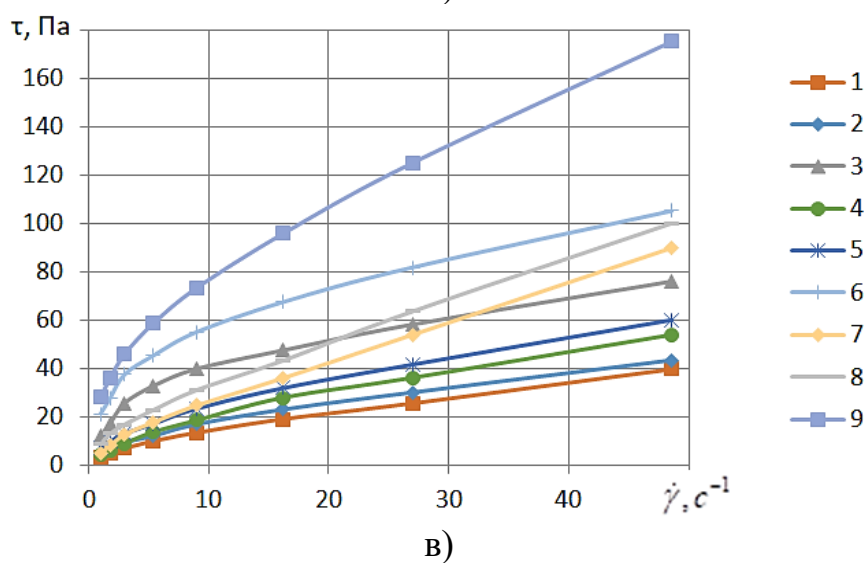
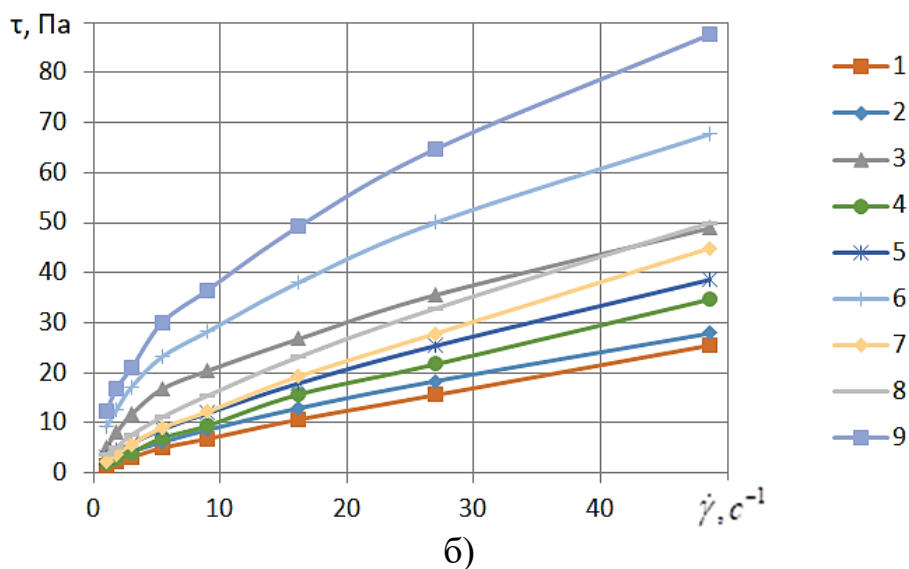
в)

а), б), в) - концентрация твердой фазы $C=62; 64,5; 67\%$ соответственно; критерий бимодальности $\Gamma = 1,02; 2,02; 3,01$ - кривые 1, 4, 7; 2, 5, 8; 3, 6, 9 соответственно; зольность угля $A^d=13,6; 25,2; 35\%$ - кривые 1-3; 4-6; 7-9 соответственно

Рисунок 4.3 - Зависимость напряжения от скорости сдвига для угля марки Г (выход летучих веществ $V^T=45\%$)

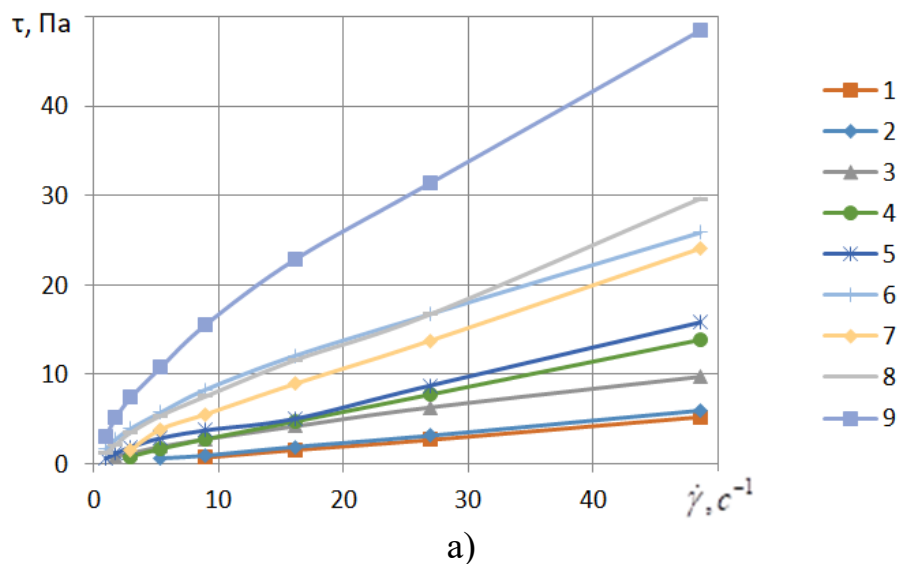


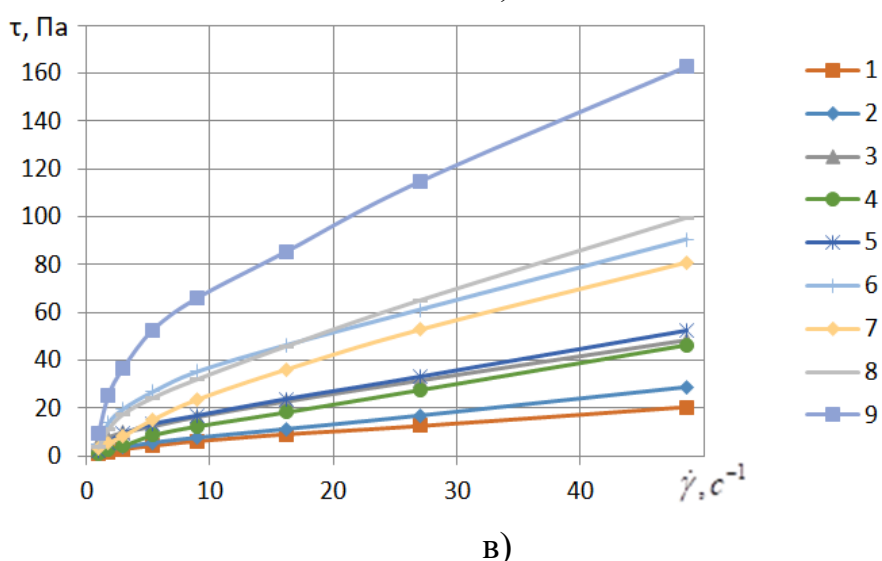
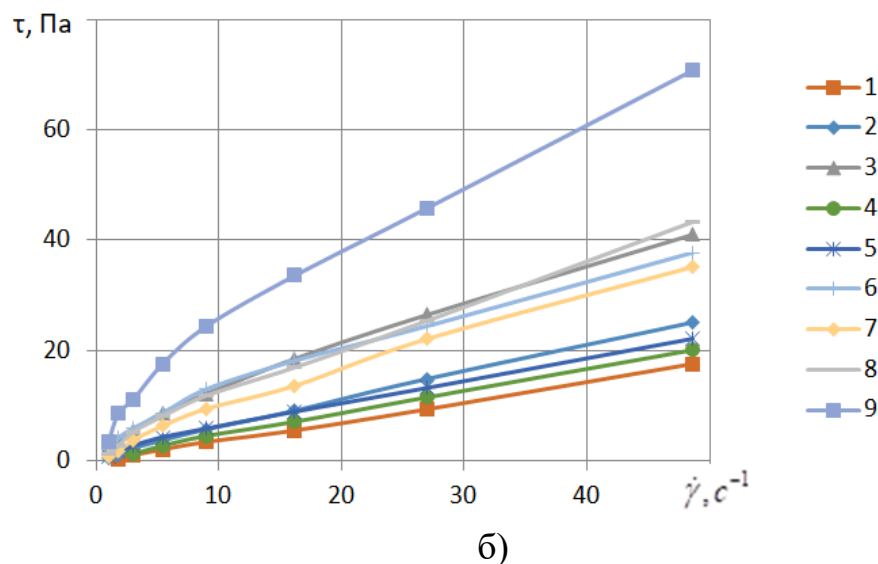
а)



а), б), в) - концентрация твердой фазы $C=62; 64,5; 67\%$ соответственно; критерий бимодальности $\Gamma=1,02; 2,02; 3,01$ - кривые 1, 4, 7; 2, 5, 8; 3, 6, 9 соответственно; зольность угля $A^d=10; 25,1; 35,2\%$ - кривые 1-3; 4-6; 7-9 соответственно

Рисунок 4.4 - Зависимость напряжения от скорости сдвига для угля марки ОС (выход летучих веществ $V^I=25\%$)





а), б), в) - концентрация твердой фазы $C=62; 64,5; 67\%$ соответственно; критерий бимодальности $\Gamma=1,02; 2,02; 3,01$ - кривые 1, 4, 7; 2, 5, 8; 3, 6, 9 соответственно; зольность угля $A^d=10; 25; 35,1\%$ - кривые 1-3; 4-6; 7-9 соответственно

Рисунок 4.5 - Зависимость величины напряжения от скорости сдвига для угля марки А (выход летучих веществ $V^T=5\%$)

Из анализа приведенных графиков следует, что существенная нелинейность кривой напряжения сдвига наблюдается в области значений скорости сдвига от 0 до 9-16 с^{-1} .

Следует отметить, что существенно нелинейным оказывается поведение исследуемой суспензии в зависимости от критерия бимодальности Γ (рис. 4.6), что оправдывает выбор 8 точек (3-х опорных и 5-ти дополнительных) для исследования ее реологических параметров.

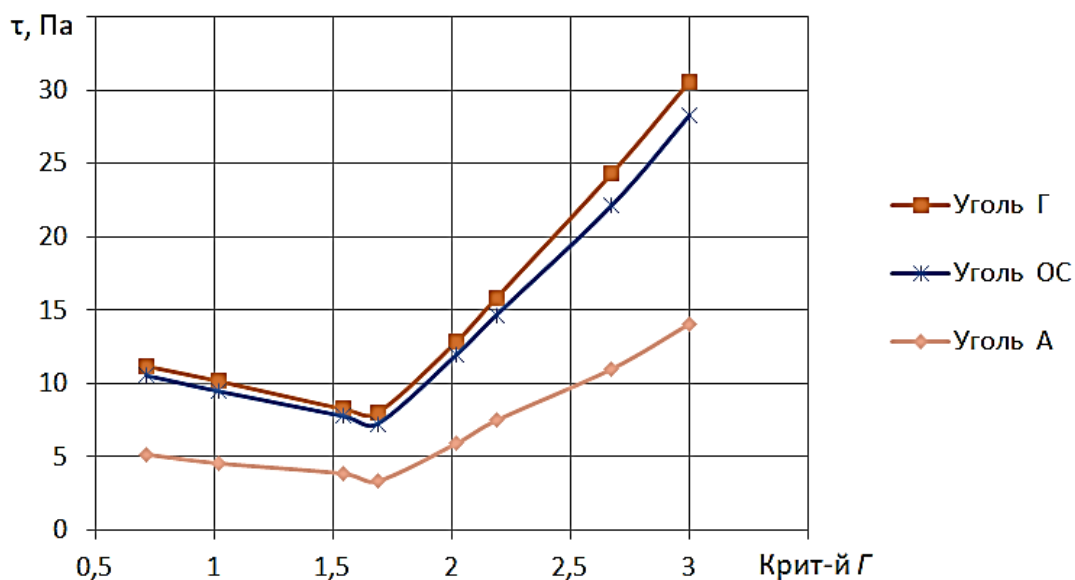


Рисунок 4.6 – Зависимость напряжения сдвига от величины критерия бимодальности Γ при концентрации твердой фазы $C=64,5\%$ и зольности исходного угля $A^d=25\%$

В ходе анализа представленных на рис. 4.6 кривых установлено, что зависимость напряжения сдвига от величины критерия бимодальности Γ имеет сложный характер с минимумом значения функции в диапазоне от 1,5 до 1,8. Такое поведение обусловлено приближением гранулометрического состава к оптимальному значению и связанному с этим снижению вязкости суспензии.

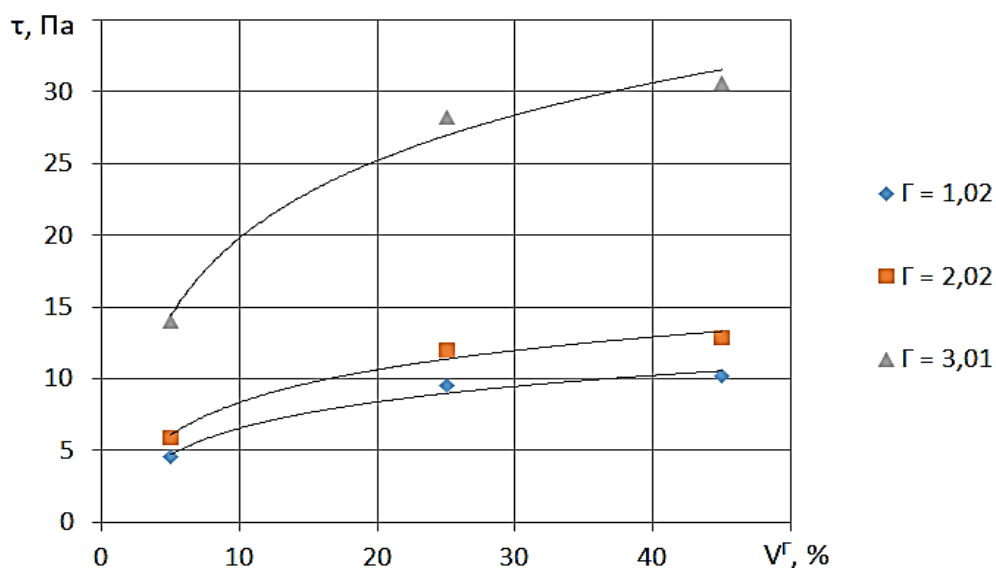


Рисунок 4.7 – Зависимость напряжения сдвига от выхода летучих веществ V^Γ при концентрации твердой фазы $C=64,5\%$ и зольности исходного угля $A^d=25\%$

Анализ зависимостей напряжения сдвига от выхода летучих веществ V^T (рис. 4.7) позволил установить, что увеличение функции происходит по логарифмическому закону. Аппроксимационное уравнение имеет вид

$$\tau = a \ln(V^T) + b, \quad (4.8)$$

где a, b – коэффициенты аппроксимации.

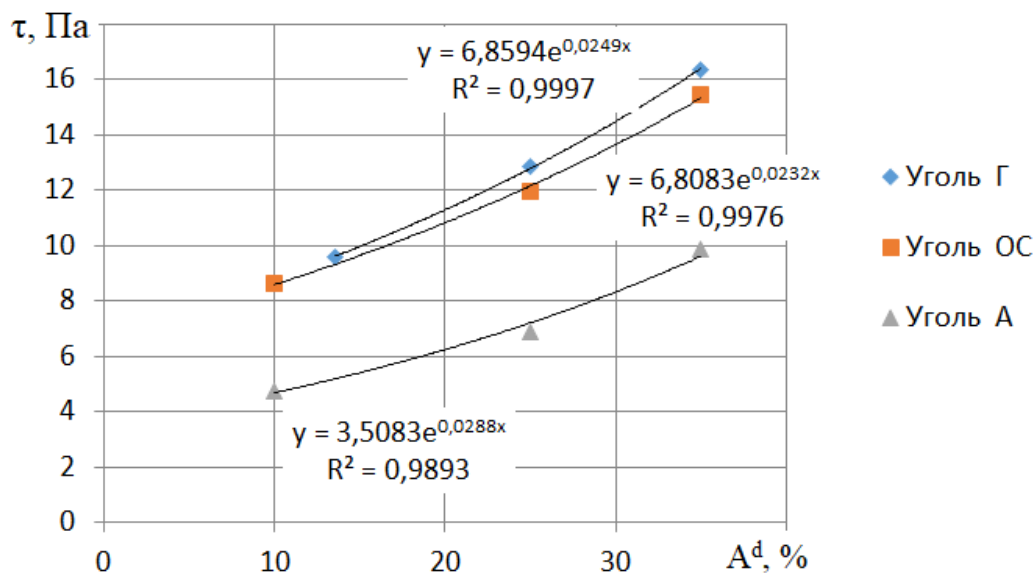


Рисунок 4.8 – Зависимость напряжения сдвига от зольности исходного угля A^d при концентрации твердой фазы $C=64,5\%$ и значении критерия бимодальности $\Gamma=2,02$

Установлено, что с увеличением зольности исходного угля происходит возрастание напряжения сдвига по экспоненциальному закону (рис. 4.8), при этом зависимость может быть аппроксимирована уравнением

$$\tau = a \cdot e^{b \cdot A^d}, \quad (4.9)$$

где a, b – коэффициенты аппроксимации, зависящие от типа угля.

Кроме этого, установлено, что каждый из исследованных факторов влияния является существенным, поскольку его влияние в исследованной области определения скорости сдвига превышает 10%.

В результате проведённых исследований установлены зависимости свойств высококонцентрированной водоугольной суспензии от концентрации твердого компонента, зольности угля, фракционного состава угля (критерий

бимодальности), выхода летучих веществ, а также скорости сдвига. Следует отметить, что проведенные эксперименты во многом подтверждают и дополняют теоретические аспекты поведения ТВУС (ВУТ), а также коррелируют с экспериментальными данными других авторов.

Исходя из результатов предварительного анализа с учетом наличия участка существенной кривизны в области определения уравнений регрессии, для дальнейших испытаний спланирован и реализован 3-х уровневый пятифакторный эксперимент. При этом учитывалось также, что осуществление эксперимента с числом факторов более 5-ти при количестве уровней более 3-х приводит к значительному увеличению, как объемов, так и продолжительности экспериментов, а также, что выполнение такого исследования было бы технически гораздо более сложным.

Диапазоны изменений и интервалы варьирования скорости сдвига $\dot{\gamma}$, концентрации твердой фазы C , критерия бимодальности Γ , зольности исходного угля A^d и выхода летучих веществ V^f принимали следующие значения (табл. 4.3).

Таблица 4.3 – Значения диапазонов изменений и интервалов варьирования факторов влияния

Факторы влияния (независимые параметры)	Факторы				
	Скорость сдвига $\dot{\gamma}$, 1/с	Концент рация C , %	Зольность A^d , %	Выход летучих веществ V^f , %	Критерий бимодальн ости Γ
1-й участок					
Нулевой уровень	5,4	64,5	25	25	2
Интервал варьирования	3,6	2,5	10	20	1
Верхний уровень	9	67	35	45	3
Нижний уровень	1,8	62	15	5	1
2-й участок					
Нулевой уровень	28,8	64,5	25	25	2
Интервал варьирования	19,8	2,5	10	20	1
Верхний уровень	48,6	67	35	45	3
Нижний уровень	9	62	15	5	1

Для обработки результатов экспериментов использовано приложение Statistica (ее бесплатная версия). В программе использованы инструменты

промышленного эксперимента DOE для экспериментов с тремя уровнями варьирования факторов (рисунок 4.9) [104, 250].

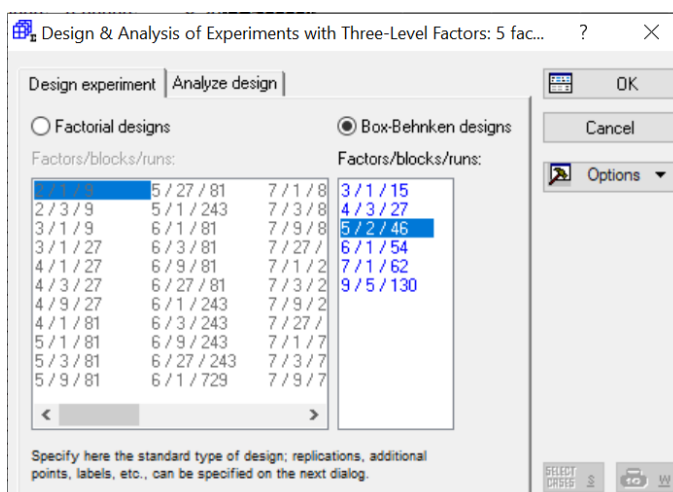


Рисунок 4.9 – Окно выбора типа матрицы планирования эксперимента

Выбраны трехуровневые планы для 5-ти независимых факторов. В качестве матриц планирования использованы матрицы Бокса-Бенкена, матрицы дробного и полнофакторного экспериментов. Произведено заполнение матриц планирования значениями функции отклика, согласно уровням варьирования аргументов.

Также произведен расчет коэффициентов регрессии, произведена оценка их значимости и дисперсия, с помощью соответствующих инструментов программного продукта (рис. 4.10).

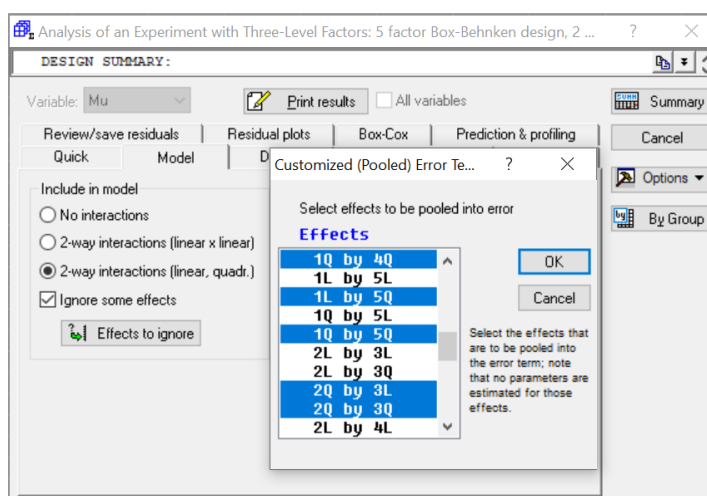


Рисунок 4.10 – Исключение из матрицы планирования малозначимых сочетаний факторов

В результате уравнения регрессии в кодированных параметрах для участка 1 представлены выражениями (4.10) и (4.11) для напряжения сдвига и эффективной вязкости соответственно.

$$\begin{aligned} \tau = & -9049,59 + 514,973\dot{\gamma} - 0,141\dot{\gamma}^2 + 280,38C - 2,165C^2 + 211,62A^d - \\ & -0,422A^{d2} + 84,03V^{\Gamma} + 689,11\Gamma^2 - 16,47\dot{\gamma} \cdot C + 0,132\dot{\gamma} \cdot C^2 + 0,0626\dot{\gamma} \cdot A^d + \\ & + 0,0691\dot{\gamma} \cdot V^{\Gamma} - 0,0009\dot{\gamma} \cdot V^{\Gamma2} - 1,547\dot{\gamma} \cdot \Gamma + 0,611\dot{\gamma} \cdot \Gamma^2 - 6,411C \cdot A^d + \\ & + 0,0068C \cdot A^{d2} + 0,0482C^2 \cdot A^d - 2,673C \cdot V^{\Gamma} + 0,0213C^2 \cdot V^{\Gamma} + 5,224C \cdot \Gamma - \\ & - 23,476C \cdot \Gamma^2 - 0,0818C^2 \cdot \Gamma + 0,198C^2 \cdot \Gamma^2 + 0,0751A^d \cdot \Gamma^2 - \\ & - 0,259V^{\Gamma} \cdot \Gamma + 0,105V^{\Gamma} \cdot \Gamma^2, \end{aligned} \quad (4.10)$$

$$\begin{aligned} \mu_s = & -56,70 - 93,89\dot{\gamma} - 0,0137\dot{\gamma}^2 + 0,927C + 0,747C^2 + 11,933V^{\Gamma} + \\ & + 139,84\Gamma^2 + 3,004\dot{\gamma} \cdot C - 0,024\dot{\gamma} \cdot C^2 - 0,00725\dot{\gamma} \cdot A^d - 0,00399\dot{\gamma} \cdot V^{\Gamma} + \\ & + 0,572\dot{\gamma} \cdot \Gamma - 0,306\dot{\gamma} \cdot \Gamma^2 + 0,00836\dot{\gamma}^2 \cdot \Gamma^2 - 0,0237C \cdot A^{d2} + \\ & + 0,000189C^2 \cdot A^{d2} - 0,383C \cdot V^{\Gamma} - 0,000015C \cdot V^{\Gamma2} + 0,00309C^2 \cdot V^{\Gamma} + \\ & + 1,204C \cdot \Gamma - 4,801C \cdot \Gamma^2 - 0,0196C^2 \cdot \Gamma + 0,0411C^2 \cdot \Gamma^2 - \\ & - 0,139A^d \cdot \Gamma + 0,0519A^d \cdot \Gamma^2 + 0,00977V^{\Gamma} \cdot \Gamma^2, \end{aligned} \quad (4.11)$$

Следует отметить, что величина достоверности аппроксимации для полученных уравнений регрессии составила $R^2=0,99$ и $R^2=0,98$ соответственно для зависимости (4.10) и (4.11). Это свидетельствует об адекватности описания характера поведения напряжения и эффективной вязкости в зависимости от приведенных факторов влияния для указанного диапазона варьирования.

Для участка 2 квадратики в кодированных параметрах представлены уравнениями (4.12) и (4.13).

$$\begin{aligned} \tau = & 13,85 + 143,85\dot{\gamma} + 7,319A^{d2} + 5,489V^{\Gamma2} - 11407,9\Gamma + 3754,09\Gamma^2 - \\ & - 4,6445\dot{\gamma} \cdot C + 0,0375\dot{\gamma} \cdot C^2 + 0,0005\dot{\gamma} \cdot A^{d2} + 0,00027\dot{\gamma} \cdot V^{\Gamma} - 0,541\dot{\gamma} \cdot \Gamma + \\ & + 0,186\dot{\gamma} \cdot \Gamma^2 - 0,233C \cdot A^{d2} - 0,00042C^2 \cdot A^d + 0,00186C^2 \cdot A^{d2} + \\ & + 0,00963C \cdot V^{\Gamma} - 0,174C \cdot V^{\Gamma2} + 0,00138C^2 \cdot V^{\Gamma2} + 363,12C \cdot \Gamma - \\ & - 119,86C \cdot \Gamma^2 - 2,883C^2 \cdot \Gamma + 0,954C^2 \cdot \Gamma^2 + 0,00117A^d \cdot V^{\Gamma2} - \\ & - 0,00002A^{d2} \cdot V^{\Gamma2} - 0,0238A^{d2} \cdot \Gamma + 0,00854A^{d2} \cdot \Gamma^2 - 0,430V^{\Gamma} \cdot \Gamma + \\ & + 0,163V^{\Gamma} \cdot \Gamma^2, \end{aligned} \quad (4.12)$$

$$\begin{aligned}
\mu_3 = & -20,20 - 9,739\dot{\gamma} + 0,0052C^2 + 0,358A^{d2} + 0,22V^{\Gamma^2} + 53,38\Gamma^2 + \\
& + 0,334\dot{\gamma} \cdot C - 0,00284\dot{\gamma} \cdot C^2 - 0,00038\dot{\gamma}^2 \cdot C + 0,000006\dot{\gamma}^2 \cdot C^2 - \\
& - 0,000021\dot{\gamma} \cdot A^{d2} - 0,0018\dot{\gamma} \cdot V^{\Gamma} + 0,000025\dot{\gamma} \cdot V^{\Gamma^2} + 0,0415\dot{\gamma} \cdot \Gamma - 0,03\dot{\gamma} \cdot \Gamma^2 + \\
& + 0,000232\dot{\gamma}^2 \cdot \Gamma^2 - 0,0113C \cdot A^{d2} + 0,00009C^2 \cdot A^{d2} - 0,00697C \cdot V^{\Gamma^2} + \\
& + 0,000016C^2 \cdot V^{\Gamma} + 0,000055C^2 \cdot V^{\Gamma^2} + 0,306C \cdot \Gamma - 1,78C \cdot \Gamma^2 - \\
& - 0,0055C^2 \cdot \Gamma + 0,0149C^2 \cdot \Gamma^2 + 0,000123A^{d2} \cdot \Gamma^2 + 0,00319V^{\Gamma} \cdot \Gamma^2,
\end{aligned} \quad (4.13)$$

Величина достоверности аппроксимации для полученных уравнений регрессии составила $R^2=0,98$ и $R^2=0,98$. Это свидетельствует об адекватности описания характера поведения эффективной вязкости в зависимости от приведенных факторов влияния для указанного диапазона варьирования.

Следует отметить, что уравнения (4.10-4.13) позволяют вычислить значения напряжения сдвига и эффективной вязкости от всех указанных факторов влияния, однако, в некоторых случаях удобно фиксировать значение концентрации твердой фазы C и определять реологические характеристики в функции 4-х факторов влияния, а для промежуточных значений C интерполировать значения функции отклика.

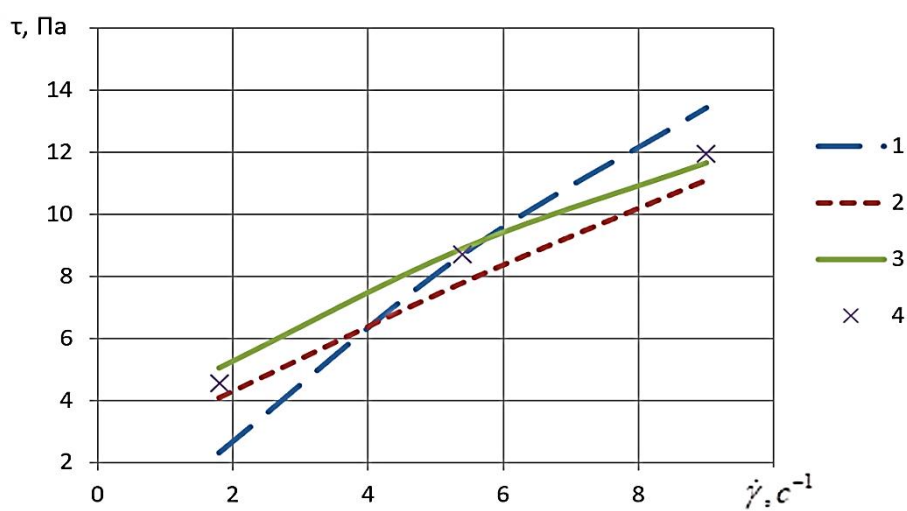
После получения итогового вида уравнений регрессии произведена сравнительная оценка точности расчета напряжения сдвига и эффективной вязкости для различных значений и уровней варьирования факторов рис. 4.10 и 4.11 для участка 1 и 2 соответственно (табл. 4.4, 4.5).

Таблица 4.4 – Значения напряжения сдвига и величина относительного отклонения

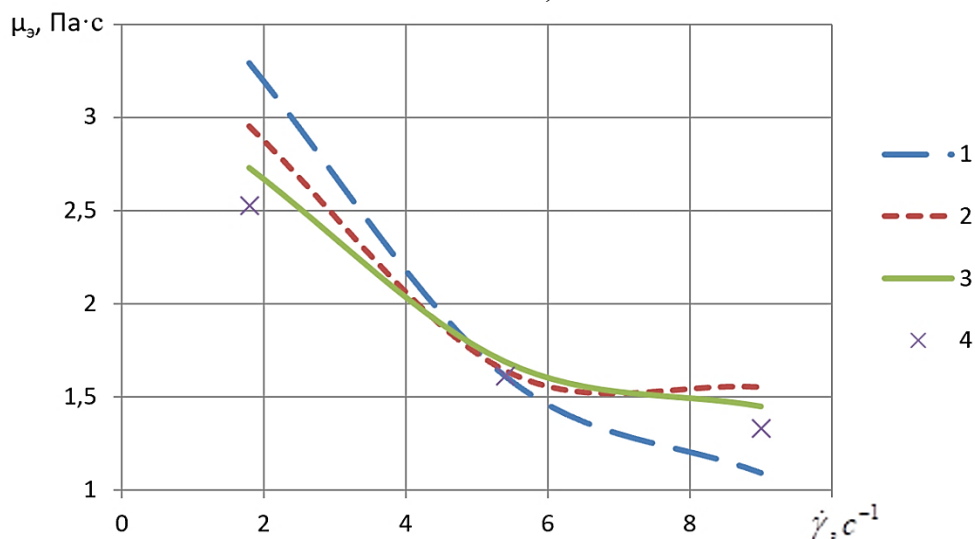
№ п/п	Величина напряжения сдвига τ , Па				Относительное отклонение, %		
	Бокс-Бинке	Дробн. факторн. план	Полн. факторн. план.	Эксперимент	Бокс-Бенкен	Дробн. факторн. план	Полн. факторн. план.
1-й участок							
1	2,3	4,08	5,05	4,55	97,83	11,52	9,90
2	8,7	7,79	8,9	8,70	0,00	11,68	2,25
3	13,43	11,1	11,66	11,96	10,98	7,71	2,53
2-й участок							
1	30,44	30,66	30	28,27	7,14	7,81	5,78
2	39,1	42,05	46,5	50,04	27,97	18,99	7,61
3	47,47	53,43	63,4	67,69	42,60	26,69	6,77

Таблица 4.5 – Значения эффективной вязкости и величина относительного отклонения

№ п/п	Величина эффективной вязкости $\mu_{\text{э}}$, Па·с				Относительное отклонение, %		
	Бокс-Бенкен	Дробн. факторн. план	Полн. факторн. план.	Эксперимент	Бокс-Бенкен	Дробн. факторн. план	Полн. факторн. план.
1-й участок							
1	3,29	2,95	2,73	2,53	23,17	14,31	7,41
2	1,61	1,64	1,69	1,61	0,07	1,76	4,67
3	1,09	1,55	1,45	1,33	21,87	14,30	8,39
2-й участок							
1	1,63	1,42	1,27	1,33	18,50	6,45	4,60
2	1,06	1,04	0,99	0,94	11,16	9,45	4,88
3	0,86	0,95	0,88	0,79	7,58	16,34	9,68



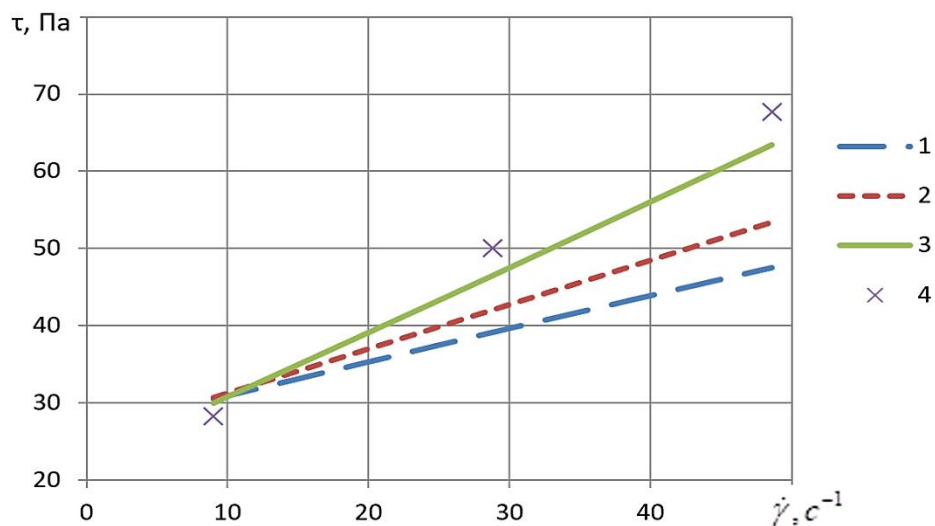
а)



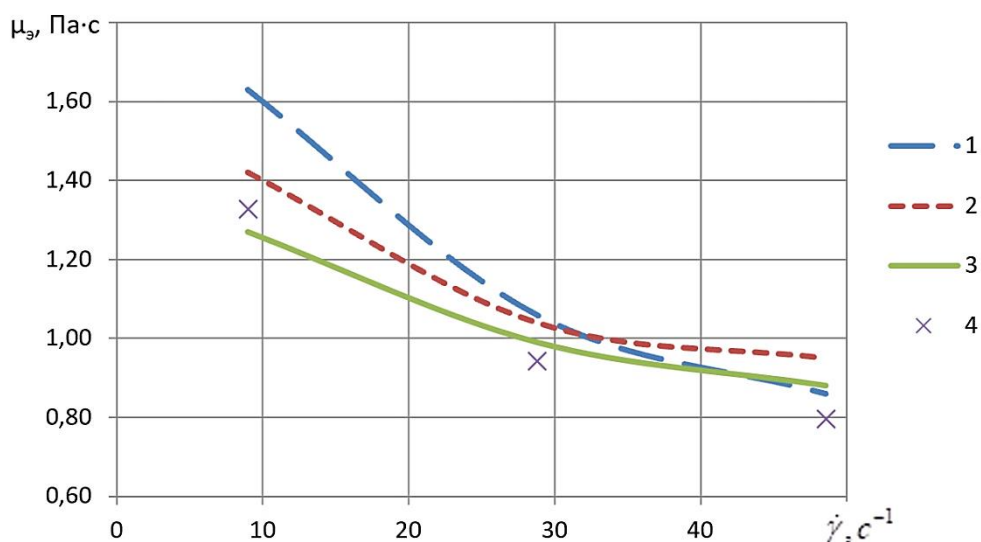
б)

1 – план Бокса-Бенкена; 2 - дробный факторный план; 3 - полный факторный план; 4 – экспериментальные данные

Рисунок 4.10 - Зависимости напряжения (а) и эффективной вязкости (б) от скорости сдвига для 1 участка (концентрация $C=64,5\%$, зольность $A^d=25\%$, выход летучих $V^l=25\%$, критерий бимодальности $\Gamma=2$)



a)



1 – план Бокса-Бенкена; 2 - дробный факторный план; 3 - полный факторный план; 4 – экспериментальные данные

Рисунок 4.11 – Зависимости напряжения (а) и эффективной вязкости (б) от скорости сдвига для 2 участка (концентрация $C=64,5\%$, зольность $A^d=25\%$, выход летучих $V^l=25\%$, критерий бимодальности $\Gamma=2$)

Анализ представленных на рисунках 4.10 и 4.11 кривых, а также таблицы 4.5 показал, что хотя дробные факторные эксперименты показывают более точные значения для точек, представленных в матрицах планирования (план Бокса-Бенкена), в иных случаях, точность расчета в значительной степени снижается. В первую очередь это касается участка 1 и обусловлено сложной

формой зависимости напряжения сдвига и эффективной вязкости от скорости сдвига, концентрации твердой фазы, зольности исходного угля, выхода летучих веществ и критерия бимодальности.

4.4 Определение удельных потерь напора на прямолинейном участке и фасонных элементах

В третьей главе представлены математические модели течения ТВУС по трубопроводу, а также в его фасонных элементах (поворотах на 90° и 180°). Кроме того, проведено численное моделирование процесса движения с учетом изменения реологических показателей от скорости сдвига, концентрации твердой фазы, зольности исходного угля, выхода летучих веществ, критерия бимодальности.

Приведенные математические модели достаточно сложны и их использование для построения напорно-расходной характеристики требует использования численных методов решения. Для проверки адекватности предложенных аналитических зависимостей, а также их адаптации к конкретным задачам, встречающимся в инженерной практике расчета и проектирования технологических трубопроводных систем, проведена серия экспериментальных исследований течения ТВУС из угля марки Г по трубопроводу, включающему прямолинейный участок, а также поворот на 90° и 180° . Опыты выполнены с использованием элементов планирования эксперимента.

Возможно выделить три типичные задачи планирования эксперимента [104, 146, 159, 169].

1. Раскрытие механизма явления, т.е. нахождение такого аналитического выражения $y = f(x_1, x_2, \dots, x_i)$, которое в области возможных значений факторов x_i достаточно точно совпадает с неизвестной зависимостью $\varphi(x)$.

2. Определение экстремума функции в области ее определения.

3. Выбор подходящей модели для описания объекта или определение (уточнение) некоторых параметров известной функциональной зависимости.

Анализ существующих теоретических исследований и экспериментальных данных [6] показывает, что наиболее важными факторами, влияющими на параметры гидротранспортирования ТВУС, являются: скорость течения u , концентрация твердой фазы C , зольность исходного угля A^d и критерия бимодальности Γ .

На гидравлическом стенде [97] определялись потери давления по длине трубопровода в зависимости от значений вышеуказанных факторов. На этапе предварительного расчета установлена невозможность составления единой квадратики для прямолинейного участка и поворотов. Принято решение о составлении отдельных уравнений регрессии для каждого измеряемого участка. Серии экспериментов проводились в соответствии с матрицей планирования, представленной в таблице 4.6.

Для упрощения записи плана эксперимента и обработки опытных данных натуральные значения факторов кодируют с помощью преобразования

$$x_i = \frac{\tilde{x}_i - x_{i0}}{\Delta x_i}, \quad (4.14)$$

где x_i – кодированное значение i -го фактора; \tilde{x}_i – натуральное значение i -го фактора; x_{i0} – основной уровень (натуральный) i -го фактора; Δx_i – интервал варьирования (натуральный) i -го фактора.

Выбранные матрицы планирования эксперимента являются планами Э.Э. Рафалеса-Ламарка [191]. Особенностью плана Ламарка является расчет уравнения квадратики на ортогональном планировании равноотстоящих узлов ± 1 и 0 . При этом, матрица планирования эксперимента содержит дробный четырехфакторный план (табл. 4.7).

Таблица 4.6 – Матрица планирования эксперимента и его результаты

Факторы влияния (независимые параметры)	X_1	X_2	X_3	X_4	Экспериментальная функция отклика, F_n		
	u , м/с	C , %	A^d , %	Γ	Δi , Па/м	Δp_{90} , Па/м	Δp_{180} , Па/м
Нулевой уровень	0,1	64,5	25	2			
Интервал варьирования	0,05	2,5	10	1			
Верхний уровень	0,15	67	35	3			
Нижний уровень	0,05	62	15	1			
№ опыта							
1	+1	+1	+1	+1	6359	3078	9415
2	+1	+1	+1	-1	2889	2720	2764
3	+1	+1	-1	+1	4445	2546	7009
4	+1	+1	-1	-1	1669	2116	2346
5	+1	-1	+1	+1	1935	1107	3028
6	+1	-1	+1	-1	505	942	1492
7	+1	-1	-1	+1	1075	738	1780
8	+1	-1	-1	-1	172	525	1382
9	-1	+1	+1	+1	2708	2251	8616
10	-1	+1	+1	-1	768	1722	2094
11	-1	+1	-1	+1	1649	1728	6183
12	-1	+1	-1	-1	106	1221	1672
13	-1	-1	+1	+1	446	732	1976
14	-1	-1	+1	-1	392	562	923
15	-1	-1	-1	+1	279	510	1143
16	-1	-1	-1	-1	688	288	967
17	0	0	0	0	550	506	1365
18	+1	0	0	0	1630	595	1595
19	-1	0	0	0	109	356	1053
20	0	+1	0	0	2001	1833	3277
21	0	-1	0	0	94	574	477
22	0	0	+1	0	1005	1014	2097
23	0	0	-1	0	239	482	1118
24	0	0	0	+1	1531	1183	3979
25	0	0	0	-1	107	750	1074

Таблица 4.7 - Данные для вычисления коэффициентов квадратики

№ опыта	a ₀	a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	a ₁₁	a ₂₂	a ₃₃	a ₄₄	a ₁₂	a ₁₃	a ₁₄	a ₂₃	a ₂₄	a ₃₄
	<i>c_{ij}</i>														
	59	18	18	18	18	354	354	354	354	16	16	16	16	16	16
	<i>b_{ijn}</i>														
1	-1	+1	+1	+1	+1	7	7	7	7	+1	+1	+1	+1	+1	+1
2	-1	+1	+1	+1	-1	7	7	7	7	+1	+1	-1	+1	-1	-1
3	-1	+1	+1	-1	+1	7	7	7	7	+1	-1	+1	-1	+1	-1
4	-1	+1	+1	-1	-1	7	7	7	7	+1	-1	-1	-1	-1	+1
5	-1	+1	-1	+1	+1	7	7	7	7	-1	+1	+1	-1	-1	+1
6	-1	+1	-1	+1	-1	7	7	7	7	-1	+1	-1	-1	+1	-1
7	-1	+1	-1	-1	+1	7	7	7	7	-1	-1	+1	+1	-1	-1
8	-1	+1	-1	-1	-1	7	7	7	7	-1	-1	-1	+1	+1	+1
9	-1	-1	+1	+1	+1	7	7	7	7	-1	-1	-1	+1	+1	+1
10	-1	-1	+1	+1	-1	7	7	7	7	-1	-1	+1	+1	-1	-1
11	-1	-1	+1	-1	+1	7	7	7	7	-1	+1	-1	-1	+1	-1
12	-1	-1	+1	-1	-1	7	7	7	7	-1	+1	+1	-1	-1	+1
13	-1	-1	-1	+1	+1	7	7	7	7	+1	-1	-1	-1	-1	+1
14	-1	-1	-1	+1	-1	7	7	7	7	+1	-1	+1	-1	+1	-1
15	-1	-1	-1	-1	+1	7	7	7	7	+1	+1	-1	+1	-1	-1
16	-1	-1	-1	-1	-1	7	7	7	7	+1	+1	+1	+1	+1	+1
17	11	0	0	0	0	-18	-18	-18	-18	0	0	0	0	0	0
18	8	+1	0	0	0	121	-56	-56	-56	0	0	0	0	0	0
19	8	-1	0	0	0	121	-56	-56	-56	0	0	0	0	0	0
20	8	0	+1	0	0	-56	121	-56	-56	0	0	0	0	0	0
21	8	0	-1	0	0	-56	121	-56	-56	0	0	0	0	0	0
22	8	0	0	+1	0	-56	-56	121	-56	0	0	0	0	0	0
23	8	0	0	-1	0	-56	-56	121	-56	0	0	0	0	0	0
24	8	0	0	0	+1	-56	-56	-56	121	0	0	0	0	0	0
25	8	0	0	0	-1	-56	-56	-56	121	0	0	0	0	0	0

Уравнение регрессии для плана выбранного типа запишется в виде

$$\hat{y} = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k b_{ij} x_i x_j, \quad (4.15)$$

где b_0 – свободный коэффициент уравнения регрессии; b_j – коэффициент при линейных составляющих уравнения регрессии; b_{ju} – коэффициент при смешанной комбинации факторов эксперимента; b_{jj} – коэффициент при квадратичных значениях факторов.

Исходя из условия ортогональности

$$\sum_{i=1}^N (x_j x_u) = 0, \quad j \neq u,$$

каждый коэффициент определяется независимо от другого из своего уравнения системы [180, 191].

Значения неизвестных коэффициентов квадратики b_{ij} получены по формуле

$$b_{ij} = \frac{\sum_{n=1}^{15} y_n a_{ijn}}{C_{ij}},$$

где значения y_n приведены в таблице 4.6, а a_{ijn} , C_{ij} – в таблице 4.7.

Погрешности результатов экспериментов для каждой из серий опытов согласно матрице планирования оценивались по стандартным формулам. Максимальная погрешность среднего арифметического не превысила 6,5%.

Уравнение регрессии в кодированных параметрах для данного типа плана записывается в следующем виде

$$y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_{11} \cdot x_1^2 + b_{22} \cdot x_2^2 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2. \quad (4.16)$$

Для определения значимости коэффициентов регрессии исходят из условия

$$|b_j| \geq t_\alpha(f_y) \frac{s_y}{\sqrt{N}}, \quad (4.17)$$

где $t_\alpha(f_y)$ – табличное значение коэффициента Стьюдента; f_y – число степеней свободы дисперсии воспроизводимости $f_y = N(n-1)$.

При $N = 25$ и $n = 3$, $t_\alpha(50) = 1,676$

$$|b_j| \geq 0,335 \cdot s_y. \quad (4.18)$$

Дисперсия воспроизводимости s_y^2 определяется как результат усреднения дисперсий во всех опытах матрицы планирования в соответствии с (табл. 4.6)

$$s_y^2 = \frac{\sum_{i=1}^N s_i^2}{N}, \quad (4.19)$$

где s_i^2 – дисперсия параметра оптимизации при i -ой комбинации уровней факторов, определяется по формуле

$$s_i^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{m=1}^n (y_m - \bar{y}_m)^2, \quad (4.20)$$

где n – число параллельных опытов при i -ой комбинации уровней факторов; \bar{y} – среднее арифметическое функции отклика из параллельных опытов, определяемое по формуле

$$\bar{y}_m = \frac{1}{n} \sum_{m=1}^n y_m. \quad (4.21)$$

Адекватность модели оценивается при помощи F -критерия (критерия Фишера)

$$F_{on} = \frac{s_{ad}^2}{s_y^2}, \quad (4.22)$$

где s_{ad}^2 – дисперсия адекватности.

$$s_{ad}^2 = n \sum_{i=1}^N (\bar{y}_i - \hat{y}_i)^2, \quad (4.23)$$

где $f_{ad} = N - k'$, $f_{ad} = 25 - k'$; $k' = 15, 12, 11$ – число коэффициентов уравнения регрессии.

Табличное значение критерия Фишера составило $F_{\alpha} = 2,87$ для всех участков трубопровода.

Для прямолинейного участка расчетное значение критерия Фишера составило $F_{on} = 1,87$; для горизонтального поворота на 180° – $F_{on} = 2,61$; для вертикального поворота на 90° – $F_{on} = 2,45$.

Значения всех расчетных значений критерия меньше табличного $F_{on} < F_{\alpha}$, следовательно, все полученные регрессионные зависимости адекватно описывают происходящие процессы.

После анализа полученных экспериментальных данных [269], представленных в таблице 4.6, и проведения оценки значимости коэффициентов уравнений регрессии было установлено, что значения коэффициентов должны быть не менее чем 55,1; 37,3; 114 – соответственно для прямолинейного участка и поворотов на 90° и 180° . В связи с этим, уравнения регрессии для выбранных матриц планирования запишутся в виде

а). в кодированных параметрах:

– прямолинейный участок

$$y_{np} = 572,84 + 746,51x_1 + 939,34x_2 + 365,86x_3 + 724,05x_4 + \\ + 292,98x_1^2 + 470,82x_2^2 + 242,32x_4^2 + 509,36x_1x_2 + 164,81x_1x_3 + \\ + 334,48x_1x_4 + 230,84x_2x_3 + 478,27x_2x_4 + 123,79x_3x_4;$$

– вертикальный поворот 90°

$$y_{90} = 628 + 278x_1 + 735x_2 + 220,8x_3 + 168x_4 - 173x_1^2 + 554,43x_2^2 + \\ + 99,56x_3^2 + 317,36x_4^2 + 144,9x_1x_2 + 54,86x_2x_3 + 65,87x_2x_4;$$

– горизонтальный поворот на 180°

$$y_{180} = 1349 + 344x_1 + 1678x_2 + 489,2x_3 + 1579x_4 + 530,99x_2^2 + \\ + 261,36x_3^2 + 1180,3x_4^2 + 220,8x_2x_3 + 1199x_2x_4 + 375,9x_3x_4.$$

б). в абсолютных параметрах:

– прямолинейный участок

$$\Delta i = 366871,92 - 264277,04u - 10362,71C - 579,85A^d - \\ - 13562,54\Gamma + 11695u^2 + 75,33C^2 + 242,32\Gamma^2 + 4074,88u \cdot C + \\ + 26,37u \cdot A^d + 6689,6u \cdot \Gamma + 9,23C \cdot A^d + 191,31C \cdot \Gamma + 12,38A^d \cdot \Gamma;$$

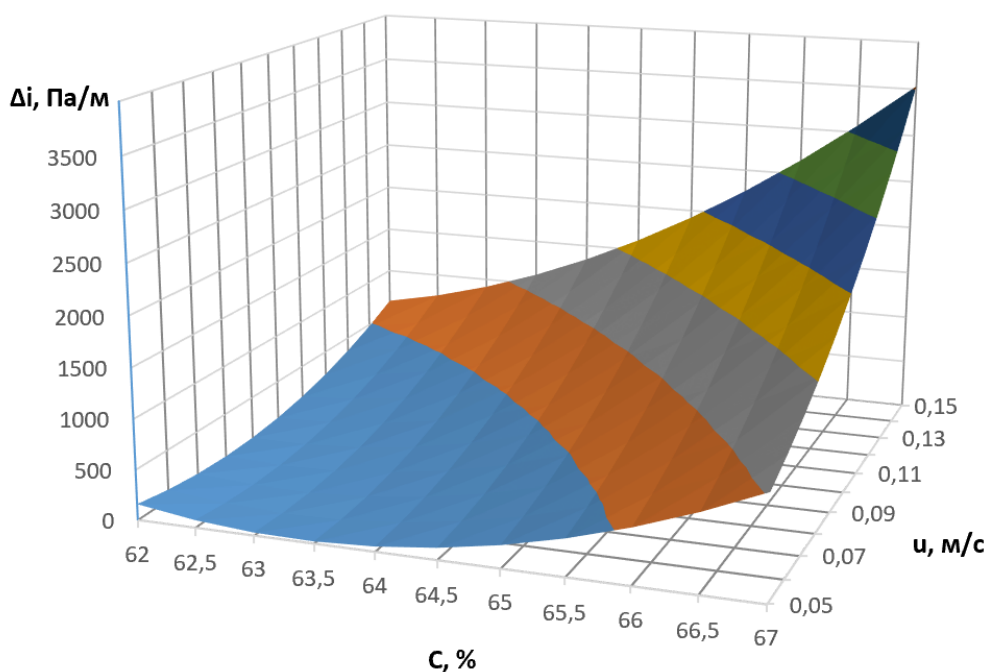
– вертикальный поворот 90°

$$\begin{aligned} \Delta p_{90} = & 365506,89 - 67824,4u - 11372,97C - 168,98A^d - 2801,02\Gamma - \\ & - 6920u^2 + 88,67C^2 + 0,996A^{d2} + 317,33\Gamma^2 + \\ & + 1159,1u \cdot C + 2,19C \cdot A^d + 26,35C \cdot \Gamma; \end{aligned}$$

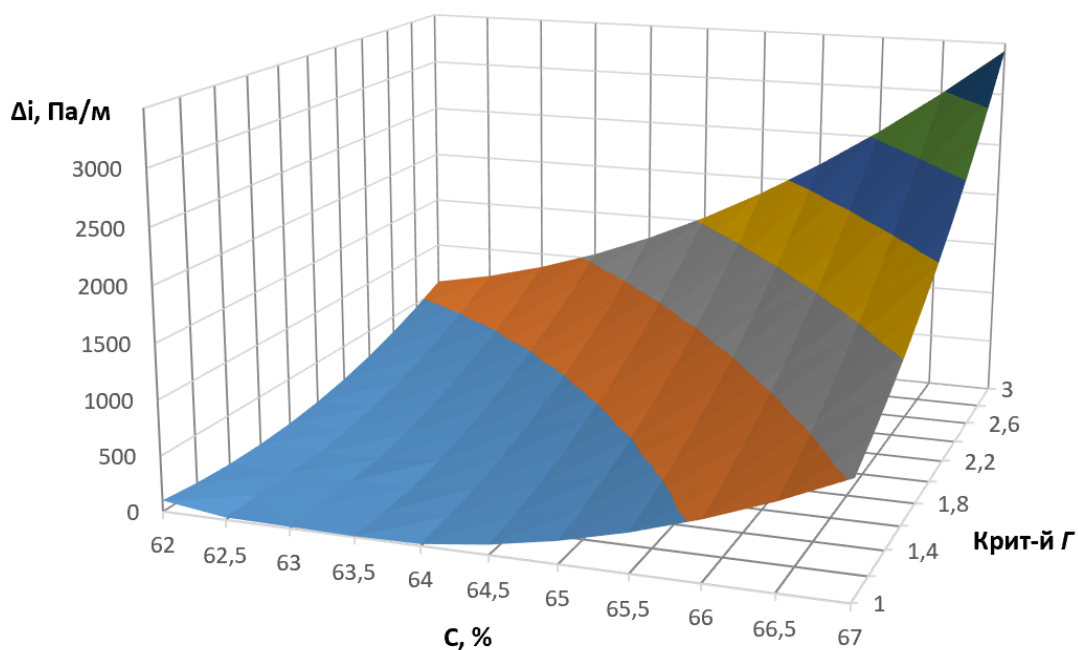
– горизонтальный поворот 180°

$$\begin{aligned} \Delta p_{180} = & 391435,27 + 668u + 11468,8C - 726,32A^d - 35016,4\Gamma + \\ & + 8,85A^d \cdot C + 37,6A^d \Gamma + 479,6C \cdot \Gamma + 84,96C^2 + 1180,3\Gamma^2. \end{aligned}$$

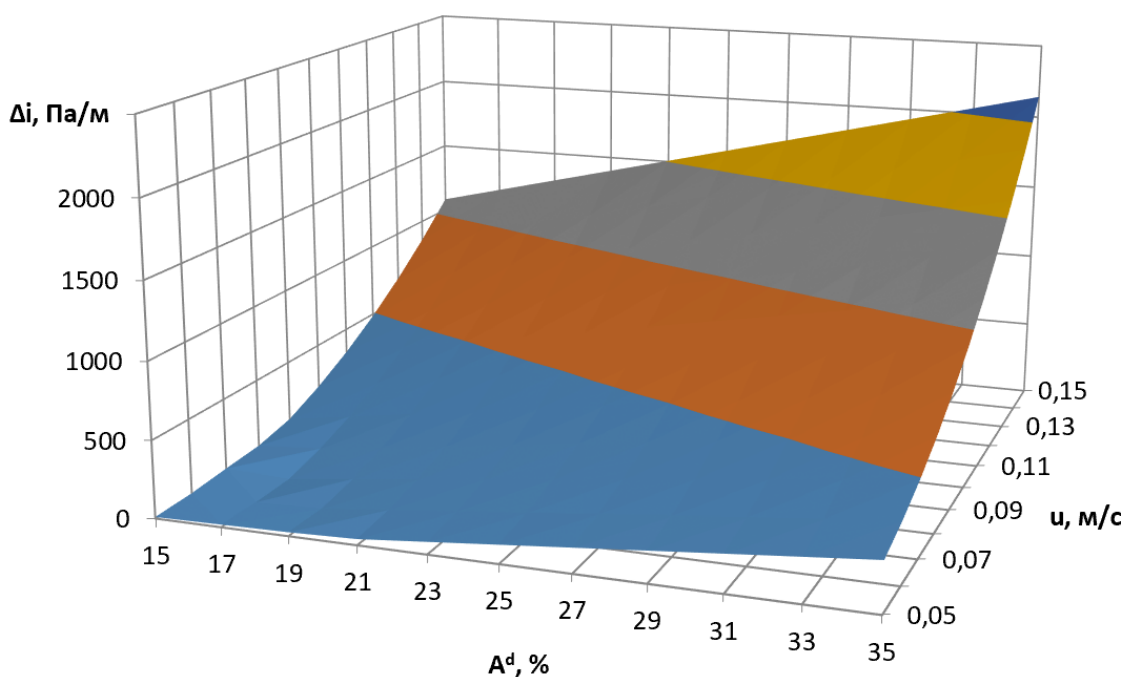
Виды поверхности отклика для различных интервалов варьирования и комбинаций факторов представлены для прямого участка на рисунке 4.12 (а, б, в).



а)



б)



в)

а) зависимость удельных потерь давления от концентрации угля C и скорости течения u (при фиксированных значениях $A^d=25\%$, $\Gamma=2$); б) зависимость удельных потерь давления от концентрации угля C и критерия бимодальности Γ (при фиксированных значениях $A^d=25\%$, $u=0,1$ м/с); в) зависимость удельных потерь давления от зольности угля A^d и скорости течения u (при фиксированных значениях $C=64,5\%$, $\Gamma=2$)

Рисунок 4.12 – Поверхности отклика для прямолинейного участка

Приведение уравнения регрессии к каноническому виду и анализ коэффициентов полученных уравнений с учетом формы поверхности отклика позволяет сделать следующие выводы:

- 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 $C=63-64\%$ ($x_2=-0,6 - -0,2$), в то же время аналогичный характер носит зависимость Δi от скорости, при этом локальный минимум соответствует области $u=0,07 - 0,09$ м/с ($x_1=-0,6 - -0,2$);

- при фиксированных на нулевом уровне значениях зольности и скорости движения, изменение удельных потерь давления в зависимости от концентрации описывается нелинейной зависимостью 2-го порядка с экстремумом при $C=63-64\%$ ($x_3=-0,6 - -0,2$), в то же время, зависимость потерь напора от критерия бимодальности текущей дисперсии также описывается подобной зависимостью, а минимальное значение удельных потерь наблюдается в области $\Gamma=1,4-2,0$ ($x_4=-0,6 - 0$);

- при фиксированных на нулевом уровне значениях концентрации угля и его гранулометрического состава (критерий бимодальности), изменение удельных потерь давления от зольности исходного угля описывается зависимостью близкой к линейному закону с минимальным значением при $A^d=15-15,5\%$ ($x_2= -1 - -0,8$), при этом возрастание Δi от скорости течения носит нелинейный характер и прямо пропорционально увеличению скорости движения.

Таким образом, проанализировав вид поверхностей отклика и обобщив полученные результаты, можно сделать следующие выводы:

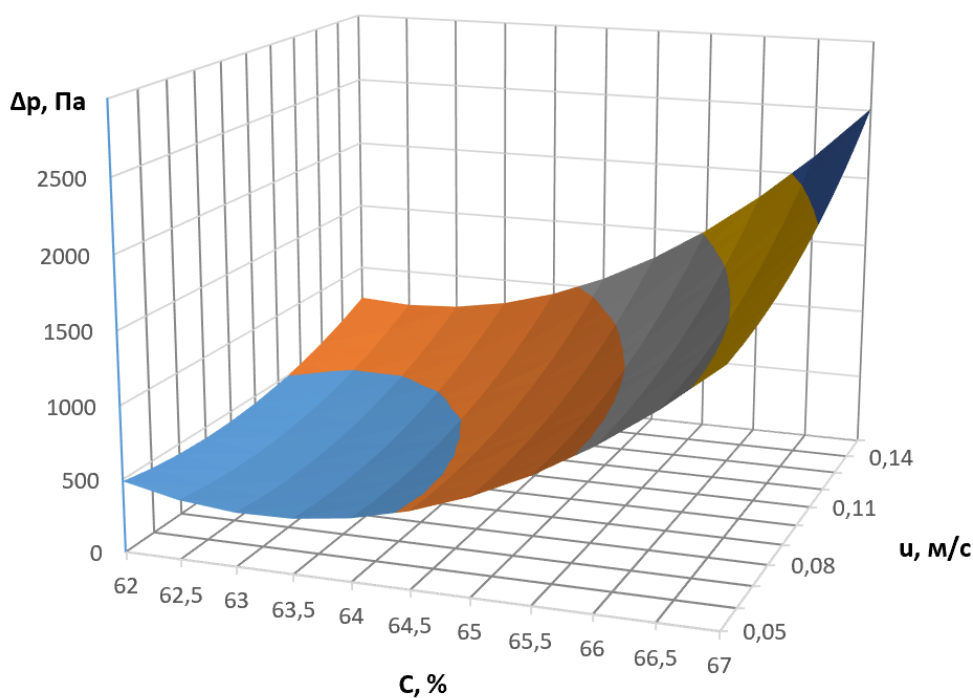
- в зависимости от скорости потока, удельные потери давления изменяются по квадратичному закону и достигают относительной стабилизации при скорости движения менее 0,1 м/с, при этом наблюдается локальный минимум u в диапазоне значений от 0,07 до 0,09 м/с;

– потери давления в трубопроводе увеличиваются по квадратичному закону пропорционально увеличению содержания твердой фазы с экстремумом при $C=63-64\%$;

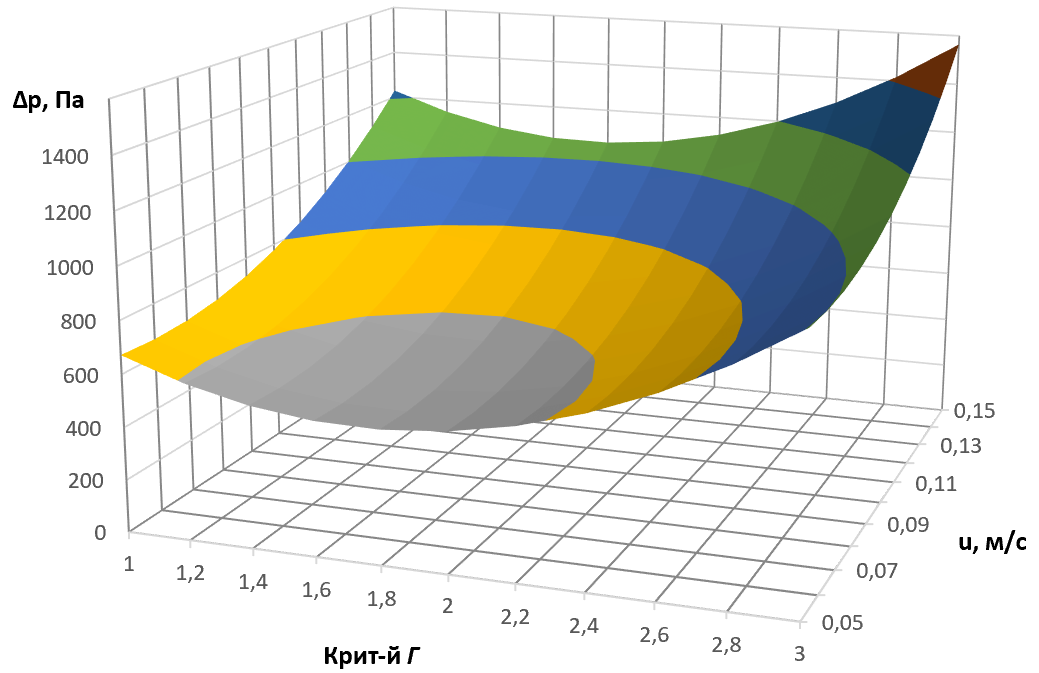
– характер изменения удельных потерь напора от гранулометрического распределения частиц (критерия бимодальности) носит нелинейный характер и достигает минимального значения при $\Gamma=1,4-2,0$;

– изменение удельных потерь давления на прямолинейном участке в зависимости от зольности исходного угля носит линейный характер и достигает минимума при ее значении в 15%;

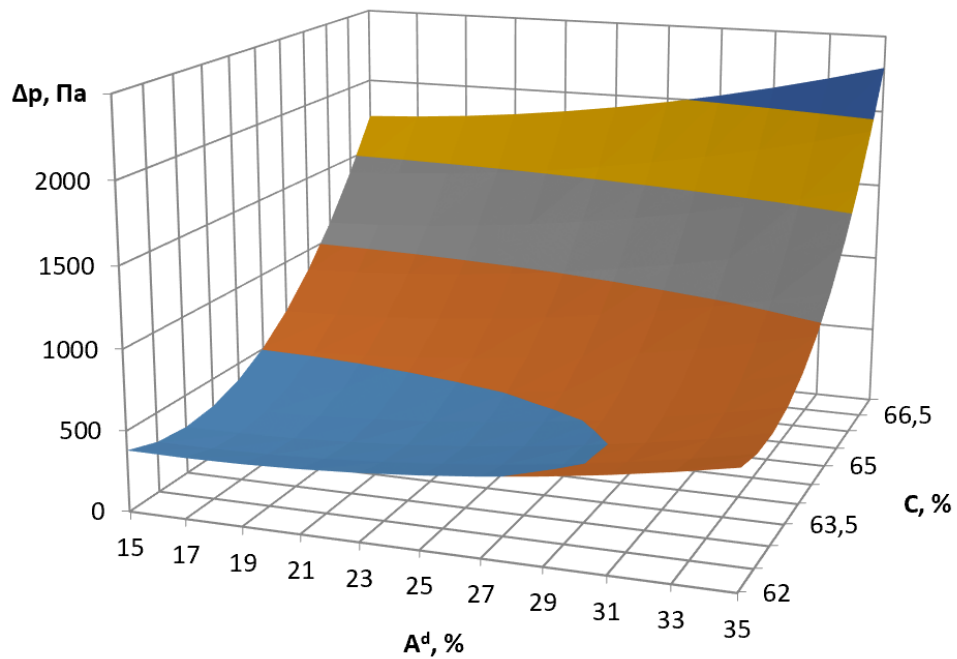
Виды поверхности отклика для различных интервалов варьирования и комбинаций факторов представлены для поворота на 90° на рисунке 4.13 (а, б, в).



а)



б)



в)

а) зависимость потерь давления от концентрации угля C и скорости течения u (при фиксированных значениях $A^d = 25\%$, $\Gamma = 2$); б) зависимость потерь давления от скорости течения u и критерия бимодальности Γ (при фиксированных значениях $A^d = 25\%$, $C = 64,5\%$); в) зависимость удельных потерь напора от зольности угля A^d и концентрации угля C (при фиксированных значениях $u = 0,1$ м/с, $\Gamma = 2$)

Рисунок 4.13 – Поверхности отклика для поворота на 90°

Анализ формы приведенных на рис. 4.13 (а, б, в) поверхностей отклика позволяет сделать следующие выводы:

- при фиксированных на нулевом уровне значениях зольности угля и гранулометрического состава (критерия бимодальности) твердого компонента изменение потерь давления от концентрации носит ярко выраженный квадратичный характер с минимумом при $C=62,5 - 64\%$ ($x_2=-0,8 - -0,2$), в то же время зависимость перепада давления от скорости носит слабо выраженный нелинейный характер, при этом локальный минимум соответствует области $u=0,06 - 0,1$ м/с ($x_1=-0,8 - 0$);

- при фиксированных на нулевом уровне значениях концентрации и зольности угля изменение потерь давления в зависимости от критерия бимодальности описывается нелинейной зависимостью 2-го порядка с экстремумом при $\Gamma=1,4 - 2,0$ ($x_4=-0,6 - 0$), в то же время зависимость потерь напора от скорости перемещения среды также описывается подобной зависимостью, а минимальное значение потерь давления наблюдается в области $u=0,06 - 0,07$ м/с ($x_1=-0,8 - -0,6$);

- при фиксированных на нулевом уровне значениях скорости течения среды и ее гранулометрического распределения изменение перепада давления от зольности угля описывается слабовыраженной нелинейной зависимостью с минимальным значением при $A^d=17\%$ ($x_3=-0,8$), на ряду с этим зависимость Δp от концентрации твердых частиц квадратичная с локальным минимумом при $C=62,5 - 63,5\%$ ($x_2=-0,8 - -0,4$).

Из результата анализа поверхностей отклика и обобщения полученных результатов, можно сделать следующие выводы:

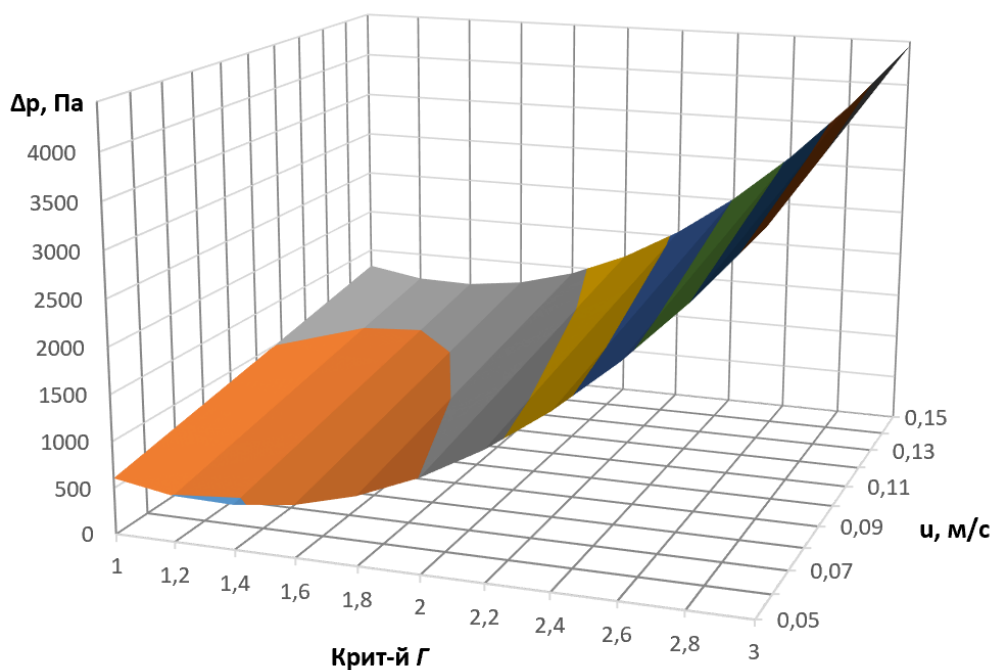
- в зависимости от скорости потока потери давления изменяются по квадратичному закону и достигают относительной стабилизации при скорости движения u от 0,06 до 0,1 м/с;

- перепад давления в колене увеличиваются по нелинейной зависимости 2-го порядка пропорционально увеличению концентрации с минимумом при $C=62,5 - 64\%$;

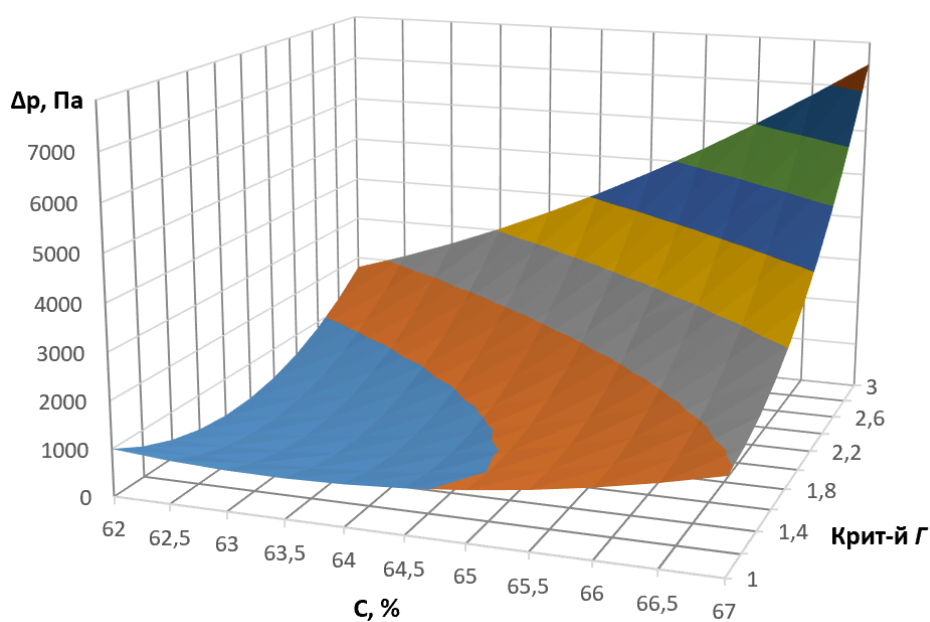
- изменение потерь давления на повороте в 90° от зольности исходного угля носит сложный характер и достигает минимума при ее значении 17%;

- характер изменения потерь давления от гранулометрического распределения частиц носит квадратичный характер и достигает минимального значения в диапазоне значений критерия бимодальности от 1,4 до 2,0;

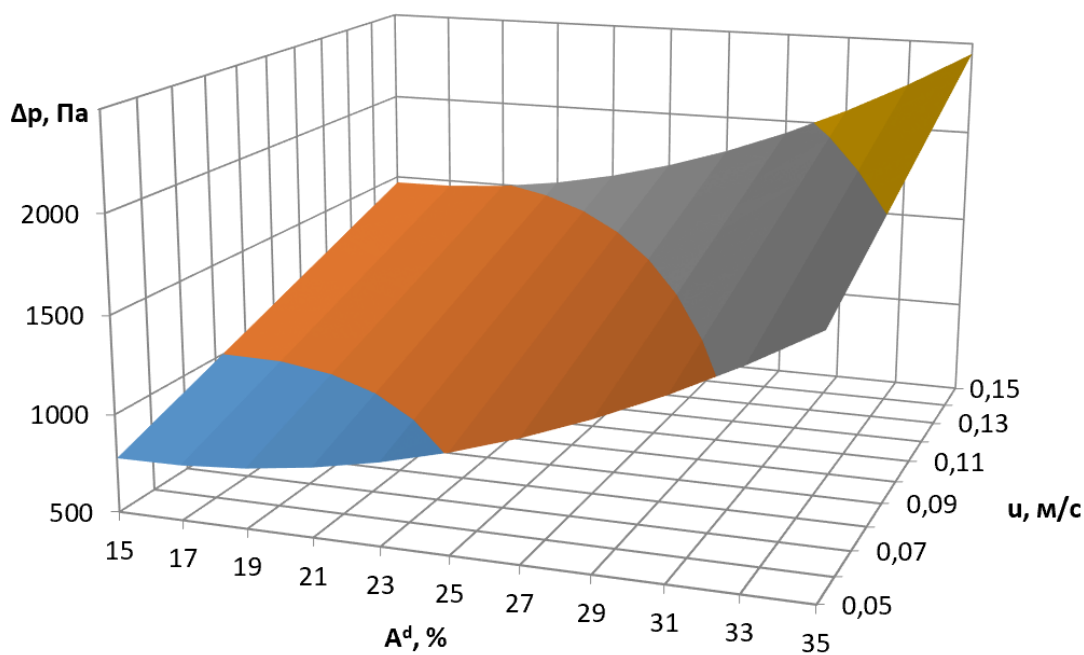
- для поворота на 180° - на рисунке 4.14 (а, б, в).



а)



б)



в)

а) зависимость потерь давления от критерия бимодальности Γ и скорости течения u (при фиксированных значениях $A^d=25\%$, $C=64,5\%$); б) зависимость потерь давления от концентрации угля C и критерия бимодальности Γ (при фиксированных значениях $A^d=25\%$, $u=0,1$ м/с); в) зависимость потерь давления от зольности угля A^d и скорости течения u (при фиксированных значениях $C=64,5\%$, $\Gamma=2$)

Рисунок 4.14 – Поверхности отклика для поворота на 180°

Анализ приведенных на рис. 4.14 (а, б, в) поверхностей отклика позволяет сделать следующие выводы:

- при фиксированных на нулевом уровне значениях зольности угля и концентрации твердого компонента изменение потерь давления от критерия бимодальности носит ярко выраженный квадратичный характер с минимумом при $\Gamma=1,2 - 1,6$ ($x_4=-0,8 - -0,4$), в то же время зависимость перепада давления от скорости носит линейный характер, при этом минимум соответствует значению $u=0,05$ м/с ($x_1=-1$);

- при фиксированных на нулевом уровне значениях скорости течения и зольности угля изменение потерь давления в зависимости от критерия бимодальности описывается нелинейной зависимостью 2-го порядка с экстремумом при $\Gamma=1,4 - 2,2$ ($x_4=-0,6 - 0,2$), в то же время зависимость потерь напора от концентрации твердого компонента также описывается подобной

зависимостью, а минимальное значение потерь давления наблюдается в области $C=63 - 64\%$ ($x_2=-0,6 - -0,2$);

- при фиксированных на нулевом уровне значениях концентрации угля и его гранулометрического распределения изменение перепада давления от зольности угля описывается нелинейной зависимостью с минимальным значением при $A^d=15\%$ ($x_3=-1$), наряду с этим зависимость Δp прямо пропорциональна возрастанию скорости движения водоугольной среды.

Проанализировав вид поверхностей отклика и обобщив полученные результаты, можно сделать следующие выводы:

- в зависимости от скорости потока, потери давления изменяются прямо пропорционально по линейному закону с минимумом при скорости движения u от 0,05 м/с;

- перепад давления в повороте увеличивается по нелинейной зависимости 2-го порядка пропорционально увеличению концентрации с минимумом при C от 63 до 64%;

- изменение потерь давления в повороте на 180° от зольности исходного угля носит слабовыраженный нелинейный характер и достигает минимума при ее значении 15%;

- характер изменения потерь давления от гранулометрического распределения частиц носит квадратичный характер с экстремумом при $\Gamma=1,4-2,2$.

Выводы к разделу 4

В четвертом разделе представлен комплекс экспериментальных исследований по определению реологических показателей водоугольной суспензии, а также параметров ее течения в канале круглого сечения и фасонных частях.

Определены цели, задачи исследований, приведена методика обработки полученных экспериментальных данных, для расширения диапазона изменения

скорости течения сред, улучшен лабораторный стенд по определению потерь давления на линейной части трубопровода и в его фасонных частях.

В результате проведенных исследований установлено, что на величину напряжения сдвига в значительной степени (до 20 и более раз) влияют следующие факторы: концентрация твердого компонента, зольность угля, фракционный состав (критерий бимодальности), выход летучих веществ, а также скорость сдвига.

Подавляющее большинство представленных зависимостей касательного напряжения целесообразно разделить на два участка – криволинейный и прямолинейный, граничным значением для которых является скорость сдвига 9 с^{-1} .

Впервые установлено, что зависимость напряжения сдвига от фракционного состава носит сложный характер, локальный минимум наблюдается при значениях критерия бимодальности 1,5–1,8; при увеличении значения критерия Γ от 0,71 до 1,69 наблюдается снижение напряжения сдвига на 55-65%, затем при увеличении критерия до 3 происходит резкое возрастание величины динамического напряжения в 3,5-4 раза.

Определена зависимость напряжения сдвига от величины выхода летучих веществ, она носит логарифмический характер и возрастает в 2 раза с ростом V^T в девять раз.

С ростом зольности исходного угля A^d с 10 до 35% происходит возрастание напряжения сдвига в 2-2,5 раза, а закономерность подчиняется экспоненциальной зависимости.

Поскольку реологические свойства определяют гидравлические характеристики поведения ТВУС, то полученные зависимости имеют исключительно важное значение для совершенствования расчета внутритрубного течения водоугольных топлив и подбора насосного оборудования.

Выполненные экспериментальные исследования процессов течения водоугольной суспензии с использованием разработанного лабораторного

стенда доказали, что основными факторами влияния на энергетические затраты при движении ТВУС являются: концентрация твердой фазы, гранулометрический состав угля (критерий бимодальности), его зольность и средняя скорость течения.

Экспериментальные исследования показали, что потери давления для различных участков трубопровода по-разному зависят от факторов влияния.

С ростом скорости потока потери давления на прямолинейном участке возрастают по квадратичной зависимости с минимумом при $u=0,07 - 0,09$ м/с, в тоже время, для поворота на 90° минимум приходится на диапазон u от 0,06 до 0,1 м/с, а для поворота на 180° , наблюдается линейная зависимость от скорости течения.

Потери давления возрастают по нелинейной зависимости 2-го порядка с ростом концентрации твердой фазы для всех исследуемых участков, при этом, минимум функции приходится на диапазон $C=62,5 - 64$ %.

Влияние зольности исходного угля на потери давления для прямолинейного участка носит линейный характер, для поворота на 90° зависимость носит сложный характер, а для поворота на 180° – квадратичный, при этом на исследуемом участке экстремумы отсутствуют.

Гранулометрическое распределение частиц (критерий бимодальности) связан с потерями давления ярко выраженной квадратичной зависимостью для всех исследуемых элементов трубопровода, минимальные значения функции приходится на диапазон Γ от 1,4 до 2,0.

Достоверность результатов исследований подтверждается 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.

РАЗДЕЛ 5. РЕКОМЕНДАЦИИ И МЕТОДИКА РАСЧЕТА ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ ТВУС В ТРУБОПРОВОДНЫХ СИСТЕМАХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ. РАСЧЕТ ЭКОНОМИКО-ЭКОЛОГИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА

5.1 Перспективные способы обогащения отходов

В связи с отсутствием ТВУС в природных условиях первоочередной является составление композиций водоугольных топлив, обладающих приемлемыми теплотехническими параметрами и удовлетворяющими требованиям при сжигании.

Предварительный опыт показывает, что этим условиям удовлетворяют водоугольные суспензии, приготовленные для гидротранспортирования и последующего прямого сжигания на электростанциях взамен угля сухого измельчения или мазута, с содержанием не менее 53% угля (при зольности до 12%). Размер частиц угля не должен превышать 250 мкм, а эффективная вязкость суспензии не должна превышать порог, при котором потери напора в прямолинейной трубе диаметром 530 мм превышают 0,1 МПа/км в течение всего времени транспортирования. Первые два требования определены условиями сжигания угля, третье – условиями транспортирования суспензии по трубе на большее расстояние. В горелки электростанций можно подавать суспензии с большей эффективной вязкостью, чем предусмотрено условиями транспортирования в трубе [28, 59, 247].

Следует отметить, что водоугольные суспензии обладают строго определенным гранулометрическим составом, который обеспечивает заданные реологические свойства среды, а также обуславливает ее седиментационную стабильность [227]. При этом, даже тонкодисперсные отходы углеобогащения не удовлетворяют требуемому гранулометрическому распределению, как в части среднего диаметра, так в соотношении крупной и мелкой фракций (табл. 5.1, 5.2).

Таблица 5.1 – Гранулометрический состав антрацитового шлама [123]

№ п/п	Класс, мкм	Диаметр, мм	Содержание, %	S , г/см ²
1	1000-1300	1,15	2,7	
2	500-1000	0,75	4,7	
3	250-500	0,375	5,55	
4	200-250	0,225	3,25	
5	100-200	0,15	4,5	11,25
6	80-100	0,09	3,1	12,9
7	40-80	0,06	2,5	15,6
8	0-40	0,02	73,7	1382
	Всего		100	1432

Таблица 5.2 – Гранулометрический состав шлама из угля марки Г [171]

Сита	Размер, мкм	Количество на сите, г.	Процентное содержание, % мас.	Кол-во, ед.	Удельная поверхность S , см ² /г
>1,0	1000	3,540	1,75	1094	0,656
1,0-0,5	750	72,754	35,70	52889	13,4
0,5-0,25	375	54,203	26,60	315260	26,6
0,25-0,2	225	12,935	6,30	345700	10,5
0,2-0,125	152,5	23,220	11,40	2009000	28,033
0,125-0,063	94	24,544	12,00	9030000	47,9
0,063-0,045	54	11,095	5,80	23021134	40,3
<0,045	30	0,900	0,45	10415000	5,6
Итого:		200,0	100,0		173,3

Приведенные гранулометрические распределения твердых частиц характерны для подавляющего большинства обводненных отходов углеобогащения, что обуславливает необходимость их доизмельчения.

Кроме того, согласно результатов А.В. Папина [171], зольность мелких фракций шлама (менее 5 мкм) превышает критическое значение $A^d=20\%$ (табл. 5.3, рис. 5.1), в связи с чем, необходимо на первом же этапе получения ВУТ из шламов отделить глинистые отложения от остального шламопродукта поскольку для этих фракций зольность может превысить 40%.

Таблица 5.3 – Распределение зольности по классам шлама марки Г

Сита	Диаметр, мкм	W^a , % мас.	A^d , % мас.
>1,0	1000	5,6	11,2
1,0 - 0,5	750	6,3	10,8
0,5-0,25	375	6,4	11,3
0,25-0,2	225	5,8	11,8
0,2-0,125	162,5	5,7	13,2
0,125-0,063	94	5,8	17,5
0,063-0,045	54	5,0	23,7
<0,045	30	4,8	24,6

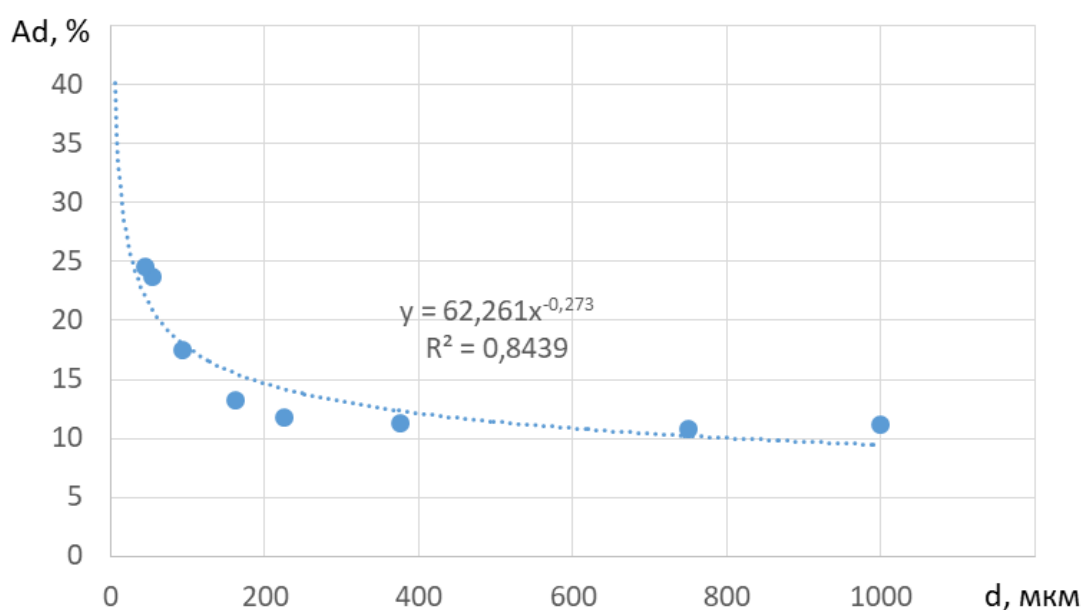


Рисунок 5.1 - Зависимость зольности шлама от диаметра частиц

В ходе анализа приведенной на рисунке 5.1 зависимости величины зольности исходного угольного шлама от диаметра твердых частиц установлено, что с уменьшением размера фракции наблюдается возрастание по степенному закону содержания негорючих веществ, вплоть до 40%, при этом величина A^d при значениях крупности частиц остается практически постоянной.

Согласно данным различных исследователей [5, 73, 102, 183] одним из передовых способов измельчения угольных частиц в потоке, наряду с кавитационными методами, является использование высоковольтного электрического разряда в среде водоугольной суспензии. Указанный способ

целесообразно использовать в рамках существующих схем обогащения отходов угольной промышленности.

Для оценки необходимой мощности электрического разряда использована теория измельчения твердых материалов. Исходя из теоретически и экспериментально установленных фактов о наибольшей распространенности в природе и технике закона нормального распределения, найдем удельную поверхность измельчаемого материала в зависимости от параметров нормального распределения логарифмов диаметров частиц.

Теоретически при форме шаров или кубической формы частиц удельная поверхность полидисперсного измельченного материала может быть определена [133, 163, 194, 217] из выражения

$$S = \frac{6}{\rho_n} \int_0^{\infty} F(x) \frac{dx}{x}, \text{ см}^2 / \text{г}, \quad (5.1)$$

где $F(x)$ – дифференциальная кривая весового распределения частиц по диаметрам (плотность распределения), 1/г; ρ – плотность материала, г/см³.

С учетом закона нормального распределения весовых долей найдем:

$$F(x) = \frac{d}{dx} \Phi \left(\frac{\ln x - \ln x_0}{\ln \beta} \right) = \frac{1}{\sqrt{2\pi \ln \beta}} \frac{1}{x} e^{-\frac{(\ln x - \ln x_0)^2}{2 \ln^2 \beta}}. \quad (5.2)$$

В уравнении (5.1) заменим функцию $F(x)$ ее значением из выражения (5.2), и выполним замену переменных в подынтегральном выражении

$$\frac{dx}{x} = d(\ln x)$$

$$\text{Обозначим } z = \frac{\ln x - \ln x_0}{\ln \beta}, \quad \omega = z + \ln \beta \text{ и } d\omega = dz$$

При этом соответственно изменяются и границы интегрирования:

$$S = \frac{6}{\sqrt{2\pi \ln \beta} \rho_n} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{x} e^{-\frac{(\ln x - \ln x_0)^2}{2 \ln^2 \beta}} d(\ln x) \quad (5.3)$$

и произведя в уравнении (5.3) замену переменных, получим

$$S = \frac{6e^{\frac{\ln^2 \beta}{2}}}{\rho_n x_0} \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{\omega^2}{2}} d\omega.$$

Второй множитель в уравнении есть интеграл нормального распределения, который в пределах от $-\infty$ до $+\infty$ равен 1.

Итак, окончательно удельная поверхность измельченного вещества, распределение логарифмов диаметров частиц которой подлежат закону нормального распределения:

$$S = \frac{6e^{\frac{\ln^2 \beta}{2}}}{\rho_n x_0}. \quad (5.4)$$

Уравнение (5.4) устанавливает связь полной удельной поверхности с параметрами распределения логарифмов диаметров частиц измельченного вещества. По этому уравнению может быть также получена удельная поверхность частиц в диапазоне диаметров от x_1 до x_2 .

По результатам исследования связи параметров нормального распределения: математического ожидания и среднеквадратического отклонения с удельной поверхностью пыли, а также результатам работ Маева-Пономарева - получены следующие значения указанных параметров (таблица 5.4).

Таблица 5.4 – Значения математического ожидания, среднеквадратического отклонения и удельной поверхности пыли

Уд. поверхность	Мат. ожидание	Среднеквадрат. отклонение
$S, \text{ г/см}^2$	$X_0, \text{ мкм}$	β
1500	53	4,72
2890	23,1	4,18
4336	15,6	4,22
5700	11,7	4,18
8680	7,7	4,19
9300	6,8	4,04

С.В. Леничем [133] получено выражение, связывающее энергию A первого разрушающего удара, с соответствующим приращением удельной поверхности ΔS_{m1} исходного угольного сырья:

$$\Delta S_{m1} = -2,86 + 0,2165V_{cm} + 0,06\delta - 1,7875\mu,$$

где V_{cm} – скорость дисперсной смеси, м/с; δ – угол поворота колена трубопровода, град.; μ – массовая концентрация аэросмеси, кг/кг.

$$\Delta S_{m1} = -1,035 + 0,2165 \cdot \sqrt{1,25A}, \quad (5.5)$$

С учётом величины прироста удельной поверхности после 1-го удара – ΔS_{m1} , выражения для прироста от последовательности ударов можно представить в виде одного уравнения [133]:

$$\Delta S_m = (\Delta S_{m1} + 0,2) - 0,2 \cdot S_m$$

$$\Delta S_{mi} = (\Delta S_{m1} + 0,2) - 0,2 \sum \Delta S_{m(2 \leftarrow i-1)}$$

Максимальная удельная поверхность S_{m_max} частиц определяется из уравнения (при этом $\Delta S_m=0$):

$$S_{m_max} = -13,3 + 1,08V_{CM} + 0,3\delta - 8,94\mu \quad [4]$$

$$\Delta S_{m_max} = -1,18 + 1,08 \cdot \sqrt{1,25A}. \quad (5.6)$$

Примем следующие основные показатели, необходимые для оценки ударного способа получения ВУТ из шламоотходов [40, 67, 245]

Механический КПД гидроудара – 0,67.

Удельная поверхность шлама – 18 м²/кг.

Содержание твердой фазы в шламе – 60%.

Содержание углерода, отделяемого от породы (угля для получения ВУТ) – 75%.

Необходимая удельная поверхность ТВУС – 260 м²/кг.

Энерговооруженность разряда при высоте камеры 140 мм, напряжении между электродами 44 кВ и расстоянии между ними 56 мм представлена ниже (табл. 5.5).

Таблица 5.5 – Величина энергии приходящаяся на один удар

Удар	А, МДж
1	2,17
2	1,56
3	1,16
4	0,85
5	0,74
6	0,49
7	0,34

С учетом КПД удара удельная поверхность, соответствующая каждому из ударов представлена в таблице 5.6.

Таблица 5.6 – Удельная поверхность, соответствующая каждому из ударов

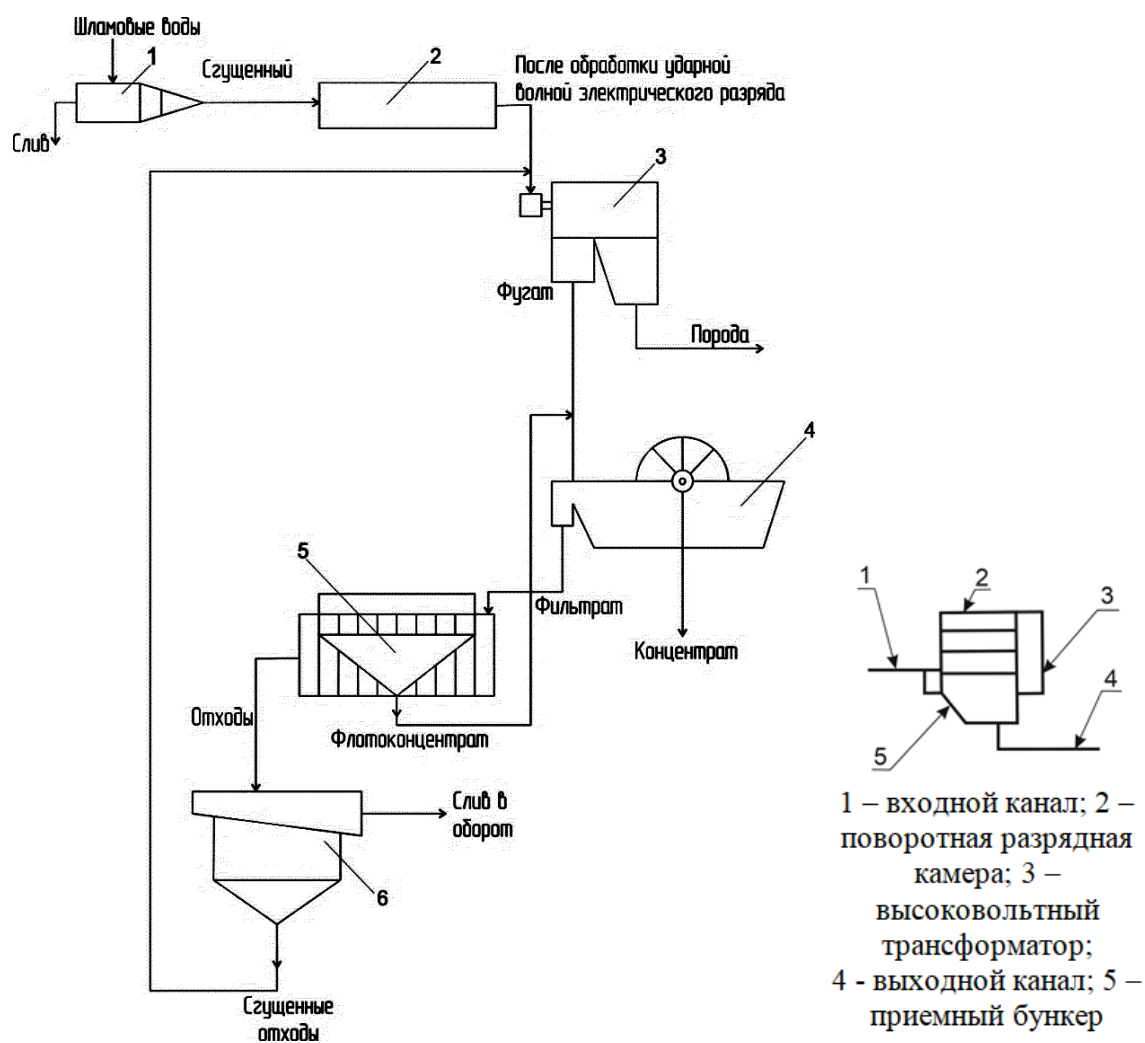
Удар	А, МДж	ΔS_i , м ² /кг	$\sum \Delta S_i$, м ² /кг	$\Delta S_{m \max}$, м ² /кг	$\sum \Delta S_i + S_0$, м ² /кг
1	1,45	291,5	291,5	1450	1258
2	1,05	233,2	524,7		
3	0,777	186,6	711,3		
4	0,57	179,3	890,6		
5	0,50	143,4	1034		
6	0,33	114,7	1148,7		
7	0,23	91,8	1240,5		

Удельная поверхность, полученная в результате первого удара $\Delta S_{m1}=291,5$ м²/кг.

При необходимой удельной поверхности ВУТ $S=260$ м²/кг в результате разряда может быть получено $1258/260=4,8$ килограмма твердой фазы ВУТ. При расчетной производительности разрядника по ТВУС 2,5 кг/с, что соответствует одному разряду в секунду, один разрядник позволяет получить $4,8/0,6=8$ кг/с топлива. При увеличении размеров разрядника вдвое (длины до 300 мм), что потребует обеспечения величины пробойного напряжения до 88 кВ, будет получено 15-16 кг/с ВУТ. Учитывая наличие породы, расход сырья в разряднике составит $16/0,75=21$ кг/с. Поэтому, разрядник целесообразно

выполнить многоствольным (в составе 6-ти параллельных труб-стволов, вращающихся вокруг центральной горизонтальной оси). При этом, расход сырья через 1 ствол составит $21/6=3,5$ кг/с. Соответствующий объемный расход составит $0,0035/1,35=0,0026$ м³/с. Примем диаметр трубопровода разрядника $D=0,250$ м при сечении $0,049$ м², тогда расходную скорость в разряднике получим равной $0,0026/0,049=0,053$ м/с. При времени наполнения 6 с сырье заполнит трубопровод разрядника: $0,053*6=0,318$ м.

Разработана усовершенствованная технологическая схема утилизации отходов углеобогащения, использующая ударное измельчение частиц электрическим разрядом и позволяющая получить водоугольную суспензию с заданными характеристиками (рис.5.2).



1 – камера сгущения; 2 – зона обработки ударной волной; 3 – гидросепаратор; 4 – обезвоживание; 5 – флотация; 6 – повторное сгущение

Рисунок 5.2 – Схема обогащения шламов в рамках системы приготовления ТВУС и узел измельчения

Суть предложенной системы заключается в том, что с целью повышения эффективности обогащения угольных шламов, сгущённые шламы подвергаются воздействию ударной волны высоковольтного электрического разряда, одновременно со снижением доли негорючих веществ осуществляется измельчение крупных частиц шламов.

Принцип действия предложенного способа обогащения угольных шламов представлен на чертеже, на котором изображена схема реализации способа обогащения угольных шламов, который предполагает выполнение следующих операций: сгущение шламовых вод 1, воздействие ударной волны высоковольтного электрического разряда 2, подготовку пульпы гидросепарацией 3, обезвоживание фугата 4, обогащение флотацией фугата 5 и сгущение отходов флотации и возвращение их на гидросепарацию 6.

Способ обогащения угольных шламов осуществляется следующим образом: шламовые воды после операции сгущения 1 попадают под воздействие ударной волны высоковольтного электрического разряда 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 плотностью менее 1400-1800 кг/м создаваемым виброкипящим слоем удерживаются во взвешенном состоянии и выносятся фугатом через сливные окна. Фугат, уже 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.

Предложенная на рис. 5.2 схема обогащения шламов позволяет осуществить доизмельчение угольных частиц (приведение фракционного

состава отходов к заданному) в рамках технологической системы по приготовлению топливных водоугольных суспензий.

5.2 Методика расчета основных показателей работы трубопроводных технологических систем для ТВУС

5.2.1. Методика расчета реологических параметров суспензии.

Гидравлический (напорный) гидротранспорт как элемент технологических систем широко используется для перемещения дисперсных сред: грунтов раскрытия карьеров, отходов обогащения переработки рудных и нерудных материалов, угольных шламов, водоугольных суспензий и т.д. Основой для надежной работы трубопроводных систем является соответствие выбранного насосного оборудования характеристике гидравлической сети.

Если конфигурация трубопровода подобрана правильно, насос работает с максимальным КПД, его напор соответствует характеристике системы, а в случае незначительного изменения параметров рабочая точка также остается в пределах высокого КПД насосной установки.

Для определения рациональной точки работы насосного оборудования необходимо построить в одной системе координат в одном масштабе характеристики насоса и системы, а точка их пересечения будет являться рабочей точкой насоса [179, 210, 220, 258].

В некоторых случаях характеристики пересекаются дважды, это приводит к работе насосного оборудования в режиме помпажа, эксплуатация таких систем не допускается, при этом необходимо изменить конфигурацию сети либо заменить насосное оборудование [204, 264].

Одними из особенностей расчета параметров гидротранспортной системы для твердых материалов (ТВУС), являются определение характеристик перемещаемой среды в процессе движения и пересчет характеристик используемого насосного оборудования для работы на суспензии.

Исходными данными для расчета параметров гидротранспорта являются количество (объем) предназначенного для транспортировки материала, тип угля, гранулометрический состав дисперсной фазы, зольность, выход летучих веществ, концентрация твердой фазы, величина рН несущей среды, тип пластификатора, температура окружающей среды, длина трубопроводной системы, а также информация о местных сопротивлениях [88].

В связи с тем, что в качестве исходных данных может выступать как объем, так и масса водоугольной суспензии необходим расчет недостающих величин по следующим зависимостям [8, 203, 204]:

- фактическая плотность угля

$$\rho_{\text{уг}} = \rho_{\text{уг табл}} + m\rho_{\text{вод}}, \quad (5.7)$$

где $\rho_{\text{вод}}$ – плотность воды, $\rho_{\text{уг табл}}$ – удельная плотность исходного угля по паспортным данным, кг/м³; m – пористость угля или доля его объема, которую занимают поры;

- фактическая концентрация угля

$$C_{\text{уг}} = C_{\text{уг теор}} \frac{\rho_{\text{уг}}}{\rho_{\text{уг табл}}}, \quad (5.8)$$

где $C_{\text{уг теор}}$ – концентрация исходного угля по паспортным данным (заданная);

- фактическая плотность ТВУС

$$\rho_{\text{ВУС}} = \frac{\rho_{\text{уг}}\rho_{\text{вод}}}{\rho_{\text{уг}} + C_{\text{уг}}\rho_{\text{вод}} - C_{\text{уг}}\rho_{\text{уг}}}; \quad (5.9)$$

- объем водоугольной суспензии

$$V_{\text{ВУС}} = \frac{M_{\text{ВУС}}}{\rho_{\text{ВУС}}} = \frac{M_{\text{вод}} + M_{\text{уг}}}{\rho_{\text{ВУС}}}, \quad (5.10)$$

где $M_{\text{ВУС}}$ – масса ТВУС, кг; $V_{\text{ВУС}}$ – объем ТВУС, м³; $M_{\text{вод}}$ – масса воды, кг; $M_{\text{уг}}$ – масса угля, кг.

Расход суспензии определяется исходя из ее объема и времени, за которое этот объем необходимо транспортировать

$$Q_{BVC} = \frac{V_{BVC}}{t}, \quad (5.11)$$

где V_{TBVC} – объем ТВУС (ВУТ), м³; t – время, за которое необходимо переместить расчетное количество водоугольной среды, с.

После определения расхода и плотности транспортируемой среды определяются ее реологические характеристики, в качестве которых выступают напряжение сдвига τ и структурная вязкость μ_{cm} . Расчет указанных величин производится на основании следующих зависимостей (с учетом значения скорости сдвига $\dot{\gamma}$ и концентрации твердой фазы C_{yz}) [96]:

При $\dot{\gamma} \leq 9 \text{ с}^{-1}$:

если $C_{yz}=62\%$, полагаем, что

$$\begin{aligned} \tau = K_{\tau} \cdot K_{\mu} \cdot K_{\mu pH} \cdot (2,89 - 0,492\dot{\gamma} + 0,091\dot{\gamma}^2 - 0,662\Gamma^2 + 0,0133\dot{\gamma} \cdot A^d + \\ + 0,000923\dot{\gamma} \cdot A^{d2} - 0,00415\dot{\gamma}^2 \cdot A^d + 0,0000229\dot{\gamma}^2 \cdot A^{d2} + 0,0281\dot{\gamma} \cdot V^{\Gamma} - \\ - 0,000346\dot{\gamma} \cdot V^{\Gamma2} - 0,738\dot{\gamma} \cdot \Gamma + 0,457\dot{\gamma} \cdot \Gamma^2 - 0,014\dot{\gamma}^2 \cdot \Gamma^2 + \\ + 0,000066A^d \cdot V^{\Gamma2} - 0,00000155A^{d2} \cdot V^{\Gamma2} - 0,00318A^{d2} \cdot \Gamma + \\ + 0,00136A^{d2} \cdot \Gamma^2 - 0,0731V^{\Gamma} \cdot \Gamma + 0,0382V^{\Gamma} \cdot \Gamma^2 - 0,00014V^{\Gamma} \cdot \Gamma^2), \end{aligned} \quad (5.11)$$

$$\begin{aligned} \mu_{cm} = K_{\tau} \cdot K_{\mu} \cdot K_{\mu pH} \cdot (0,492 + 0,182\dot{\gamma} + 0,0133A^d + 0,000923A^{d2} - \\ - 0,008292\dot{\gamma} \cdot A^d + 0,0000458\dot{\gamma} \cdot A^{d2} + 0,0281V^{\Gamma} - 0,000346V^{\Gamma2} - \\ - 0,738\Gamma + 0,457\gamma\Gamma^2 - 0,028\dot{\gamma} \cdot \Gamma^2), \end{aligned} \quad (5.12)$$

если $C_{yz}=64,5\%$, полагаем, что

$$\begin{aligned} \tau = K_{\tau} \cdot K_{\mu} \cdot K_{\mu pH} \cdot (4,304 + 0,693\dot{\gamma} + 0,00419\dot{\gamma}^2 - 0,923\Gamma^2 - 0,0444\dot{\gamma} \cdot A^d + \\ + 0,00234\dot{\gamma} \cdot A^{d2} + 0,00237\dot{\gamma}^2 \cdot A^d - 0,0001\dot{\gamma}^2 \cdot A^{d2} + 0,0308\dot{\gamma} \cdot V^{\Gamma} - \\ - 0,000403\dot{\gamma} \cdot V^{\Gamma2} - 1,09\dot{\gamma} \cdot \Gamma + 0,66\dot{\gamma} \cdot \Gamma^2 - 0,0215\dot{\gamma}^2 \cdot \Gamma^2 + \\ + 0,0001A^d \cdot V^{\Gamma2} - 0,00000141A^{d2} \cdot V^{\Gamma2} - 0,00596A^{d2} \cdot \Gamma + \\ + 0,00235A^{d2} \cdot \Gamma^2 - 0,15V^{\Gamma} \cdot \Gamma + 0,0966V^{\Gamma} \cdot \Gamma^2 - 0,00071V^{\Gamma2} \cdot \Gamma^2), \end{aligned} \quad (5.13)$$

$$\begin{aligned} \mu_{cm} = K_{\tau} \cdot K_{\mu} \cdot K_{\mu pH} \cdot (0,693 + 0,00838\dot{\gamma} - 0,0444A^d + 0,00234A^{d2} + \\ + 0,00474\dot{\gamma} \cdot A^d - 0,0002\dot{\gamma} \cdot A^{d2} + 0,0308V^{\Gamma} - 0,000403V^{\Gamma2} - \\ - 1,09\Gamma + 0,66\Gamma^2 - 0,0430\dot{\gamma} \cdot \Gamma^2), \end{aligned} \quad (5.14)$$

если $C_{y\epsilon}=67\%$, полагаем, что

$$\begin{aligned} \tau = K_{\tau} \cdot K_{\mu} \cdot K_{\mu pH} \cdot (13,123 + 7,5\dot{\gamma} - 0,722\dot{\gamma}^2 - 3,306\Gamma^2 - 0,735\dot{\gamma} \cdot A^d + \\ + 0,0182\dot{\gamma} \cdot A^{d2} + 0,0703\dot{\gamma}^2 \cdot A^d - 0,00151\dot{\gamma}^2 \cdot A^{d2} + 0,115\dot{\gamma} \cdot V^{\Gamma} - \\ - 0,00116\dot{\gamma} \cdot V^{\Gamma2} - 2,261\dot{\gamma} \cdot \Gamma + 1,56\dot{\gamma} \cdot \Gamma^2 - 0,0553\dot{\gamma}^2 \cdot \Gamma^2 + \\ + 0,0004A^d \cdot V^{\Gamma2} - 0,00000856A^{d2} \cdot V^{\Gamma2} - 0,0117A^{d2} \cdot \Gamma + \\ + 0,00593A^{d2} \cdot \Gamma^2 - 0,576V^{\Gamma} \cdot \Gamma + 0,301V^{\Gamma} \cdot \Gamma^2 - 0,00146V^{\Gamma2} \cdot \Gamma^2), \end{aligned} \quad (5.15)$$

$$\begin{aligned} \mu_{cm} = K_{\tau} \cdot K_{\mu} \cdot K_{\mu pH} \cdot (7,5 - 1,444\dot{\gamma} - 0,735A^d + 0,0182A^{d2} + \\ + 0,1406\dot{\gamma} \cdot A^d - 0,00302\dot{\gamma} \cdot A^{d2} + 0,115V^{\Gamma} - 0,00116V^{\Gamma2} - \\ - 2,261\Gamma + 1,56\Gamma^2 - 0,1106\dot{\gamma} \cdot \Gamma^2), \end{aligned} \quad (5.16)$$

При $\dot{\gamma} > 9 \text{ с}^{-1}$:

если $C_{y\epsilon}=62\%$, полагаем, что

$$\begin{aligned} \tau = K_{\tau} \cdot K_{\mu} \cdot K_{\mu pH} \cdot (-14,35 + 0,174\dot{\gamma} + 0,459A^d + 1,327V^{\Gamma} - \\ - 0,0271V^{\Gamma2} + 17,01\Gamma - 3,422\Gamma^2 + 0,00035\dot{\gamma} \cdot A^{d2} + 0,0201\dot{\gamma} \cdot V^{\Gamma} - \\ - 0,00025\dot{\gamma} \cdot V^{\Gamma2} - 0,366\dot{\gamma} \cdot \Gamma + 0,122\dot{\gamma} \cdot \Gamma^2 - 0,0247A^d \cdot V^{\Gamma} + \\ + 0,000865A^d \cdot V^{\Gamma2} - 0,00000851A^{d2} \cdot V^{\Gamma2} - 0,5A^d \cdot \Gamma + 0,0038A^{d2} \cdot \Gamma^2 - \\ - 0,991V^{\Gamma} \cdot \Gamma + 0,301V^{\Gamma} \cdot \Gamma^2 + 0,0148V^{\Gamma2} \cdot \Gamma - 0,0042V^{\Gamma2} \cdot \Gamma^2), \end{aligned} \quad (5.17)$$

$$\begin{aligned} \mu_{cm} = K_{\tau} \cdot K_{\mu} \cdot K_{\mu pH} \cdot (0,174 + 0,00035A^{d2} + 0,0201V^{\Gamma} - \\ - 0,00025V^{\Gamma2} - 0,366\Gamma + 0,122\Gamma^2), \end{aligned} \quad (5.18)$$

если $C_{y\epsilon}=64,5\%$, полагаем, что

$$\begin{aligned} \tau = K_{\tau} \cdot K_{\mu} \cdot K_{\mu pH} \cdot (-5,478 + 0,526\dot{\gamma} + 0,113A^d + 1,1V^{\Gamma} - \\ - 0,0243V^{\Gamma2} + 13,35\Gamma - 2,12\Gamma^2 + 0,00037\dot{\gamma} \cdot A^{d2} + 0,0045\dot{\gamma} \cdot V^{\Gamma} + \\ + 0,000029\dot{\gamma} \cdot V^{\Gamma2} - 0,421\dot{\gamma} \cdot \Gamma + 0,151\dot{\gamma} \cdot \Gamma^2 + 0,00247A^d \cdot V^{\Gamma} + \\ + 0,00044A^d \cdot V^{\Gamma2} - 0,00000681A^{d2} \cdot V^{\Gamma2} - 0,487A^d \cdot \Gamma + 0,00406A^{d2} \cdot \Gamma^2 - \\ - 1,116V^{\Gamma} \cdot \Gamma + 0,328V^{\Gamma} \cdot \Gamma^2 + 0,0151V^{\Gamma2} \cdot \Gamma - 0,00414V^{\Gamma2} \cdot \Gamma^2), \end{aligned} \quad (5.19)$$

$$\mu_{cm} = K_{\tau} \cdot K_{\mu t} \cdot K_{\mu pH} \cdot (0,526 + 0,00037A^{d2} + 0,0045V^{\Gamma} + 0,000029V^{\Gamma2} - 0,421\Gamma + 0,151\Gamma^2), \quad (5.20)$$

если $C_{y2}=67\%$, полагаем, что

$$\begin{aligned} \tau = K_{\tau} \cdot K_{\mu t} \cdot K_{\mu pH} \cdot (-35,07 + 1,215\dot{\gamma} + 1,69A^d + 2,36V^{\Gamma} - \\ - 0,0567V^{\Gamma2} + 36,08\Gamma - 4,75\Gamma^2 + 0,000776\dot{\gamma} \cdot A^{d2} - 0,0487\dot{\gamma} \cdot V^{\Gamma} + \\ + 0,0015\dot{\gamma} \cdot V^{\Gamma2} - 0,834\dot{\gamma} \cdot \Gamma + 0,284\dot{\gamma} \cdot \Gamma^2 - 0,0203A^d \cdot V^{\Gamma} + \\ + 0,0022A^d \cdot V^{\Gamma2} - 0,0000373A^{d2} \cdot V^{\Gamma2} - 1,94A^d \cdot \Gamma + 0,0144A^{d2} \cdot \Gamma^2 - \\ - 1,085V^{\Gamma} \cdot \Gamma + 0,431V^{\Gamma} \cdot \Gamma^2 + 0,0069V^{\Gamma2} \cdot \Gamma - 0,0027V^{\Gamma2} \cdot \Gamma^2), \end{aligned} \quad (5.21)$$

$$\mu_{cm} = K_{\tau} \cdot K_{\mu t} \cdot K_{\mu pH} \cdot (1,215 + 0,000776A^{d2} - 0,0487V^{\Gamma} + 0,0015V^{\Gamma2} - 0,834\Gamma + 0,284\Gamma^2), \quad (5.22)$$

где $\dot{\gamma}$ – градиент скорости сдвига, c^{-1} ; A^d – зольность исходного угля, %; V^{Γ} – выход летучих веществ, %; Γ – критерий бимодальности, ед; K_{τ} – коэффициент учета влияния пластификатора; $K_{\mu t}$ – коэффициент влияния температуры окружающей среды; $K_{\mu pH}$ – коэффициент учета водородного показателя несущей среды.

Коэффициент K_{τ} выбирается из таблицы на основании типа пластификатора с учетом критерия бимодальности Γ и концентрации твердого компонента C [87]. В случае, если значения Γ и C находятся в промежутке между приведенными данными, K_{τ} определяется путем интерполяции.

Расчет коэффициента $K_{\mu t}$ [86]:

от 3 до 20°C

$$K_{\mu t} = 8,30 + 2,00t - 0,84C + 0,0007t^2 + 0,012C^2 - 0,033tC, \quad (5.23)$$

от 20 до 50°C

$$K_{\mu t} = 6,04 + 0,054t - 0,17C + 0,00012t^2 + 0,0014C^2 - 0,0011tC, \quad (5.24)$$

где t – температура ТВУС, °С.

Коэффициент $K_{\mu pH}$ [86]

$$K_{\mu pH} = \left(2,17 - 0,31(\ln pH)^2\right)^{0,5}, \quad (5.25)$$

где pH – значение водородного показателя несущей среды.

Изменение гранулометрического состава (критерия бимодальности) определяется из уравнения [90]

$$G = G_0 e^{0,00136 + 7,66 \cdot 10^{-6} T^2}, \quad (5.26)$$

где G_0 – значение критерия G в начальный момент времени; T – время движения суспензии в технологической системе, ч.

Значение времени транспортирования T определяется как длина трубопровода L_{mp} отнесенная к скорости течения u

$$T = \frac{L_{mp}}{u}. \quad (5.27)$$

Рекомендованная скорость движения водоугольного топлива по трубопроводу u , а также диаметр труб D , принимаются на основании табличных данных, приведенных в [203], с учетом рассчитанной величины расхода ТВУС.

Диаметр трубопровода также может быть рассчитан по следующей формуле

$$D = \sqrt{\frac{4Q_{BVC}}{\pi u}}. \quad (5.28)$$

Значения начального напряжения сдвига τ_0 вычисляются для каждой величины градиента скорости сдвига $\dot{\gamma}_i$ с учетом динамического изменения реологических характеристик на основании следующей зависимости

$$\tau_{0i} = \tau_i - \mu_{cm.i} \cdot \dot{\gamma}_i, \quad (5.29)$$

где τ_i – значение напряжения сдвига при текущей величине $\dot{\gamma}_i$, Па (вычисляется по формулам (5.11, 5.13, 5.15, 5.17, 5.19, 5.21)); $\mu_{cm.i}$ – значение

структурной вязкости при текущей величине $\dot{\gamma}_i$, Па·с (вычисляется по формулам (5.12, 5.14, 5.16, 5.18, 5.20, 5.22)).

5.2.2. Методика расчета потерь давления в трубопроводе.

Для определения рабочей точки и выбора насоса необходимо построить характеристику гидротранспортной системы, задавая разные значения расхода суспензии. Необходимый напор определяется зависимостью

$$H_{\text{нотр}} = H_{\text{ст}} + \frac{iL_{\text{тр}}}{\rho_{\text{вод}} \cdot g} + \frac{\sum \Delta p_{\text{мест}}}{\rho_{\text{вод}} \cdot g}, \quad (5.30)$$

где $H_{\text{ст}}$ – статический напор, м; $iL_{\text{тр}} / \rho_{\text{вод}} \cdot g$ – пьезометрическая высота, м; $\sum \Delta p_{\text{мест}} / \rho_{\text{вод}} \cdot g$ – потери напора на местных сопротивлениях при течении суспензии, м.

Исходными данными для расчета удельных потерь давления i при работе трубопроводной системы технологического процесса являются рассчитанные ранее показатели.

Величина i определяется численными методами с учетом динамического изменения реологических характеристик на основании следующей зависимости

$$Q_{\text{ВУС}} = \pi R_{\text{я}}^2 \sqrt{(k_0 - k) \left(\frac{i}{\mu_{\text{ст.я}}} - \frac{\tau_{0\text{я}}}{\mu_{\text{ст.я}} (R - R_{\text{я}})} \right) [R^2 - R_{\text{я}}^2]} + \sum_{R_{\text{я}}}^R \frac{2\pi}{3} \sqrt{(k_0 - k) \left(\frac{i}{\mu_{\text{ст.и}}} - \frac{\tau_{0\text{и}}}{\mu_{\text{ст.и}} (R - R_{\text{и}})} \right) [R^2 - r_{\text{и}}^2]^3}, \quad (5.31)$$

где R – радиус трубопровода, м; $R_{\text{я}}$ – радиус ядра потока, м; $\tau_{0\text{я}}, \mu_{\text{ст.я}}$ – значения начального напряжения сдвига и структурной вязкости для ядра потока; $r_{\text{и}}$ – текущее значение радиуса трубопровода, м; $\tau_{0\text{и}}, \mu_{\text{ст.и}}$ – текущее значение начального напряжения сдвига и структурной вязкости.

Потери давления на местных сопротивлениях $\sum \Delta p_{\text{мест}}$ складываются из потерь на фасонных частях и запорной арматуре

$$\sum \Delta p_{мест} = \sum \Delta p_{фас} + \sum \Delta p_{арм},$$

где $\sum \Delta p_{фас}$ – потери давления на фасонных элементах трубопровода (повороты и т.д.), Па; $\sum \Delta p_{арм}$ – потери давления на запорной арматуре, Па.

Потери давления для поворота на 90° определяются следующим образом

$$\Delta p_{90} = \rho_{BVC} \cdot g \cdot \exp(a + b \cdot \ln D + c \cdot \ln Q_{BVC}), \quad (5.32)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с²; a, b, c – коэффициенты [89].

Перепад давления для поворота на 180° определяется эмпирическим выражением вида

$$\Delta p_{180} = k_R \cdot \rho_{BVC} \cdot g \cdot \exp(a + b \cdot \ln D + c \cdot \ln Q_{BVC}), \quad (5.33)$$

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 $\mu_{см}$ (Гл.3).

Расчет коэффициента k_R осуществляется по следующей зависимости

$$k_R = (0,86 + 0,43 \ln D - 0,43 \ln R_{изг})^{-1}, \quad (5.34)$$

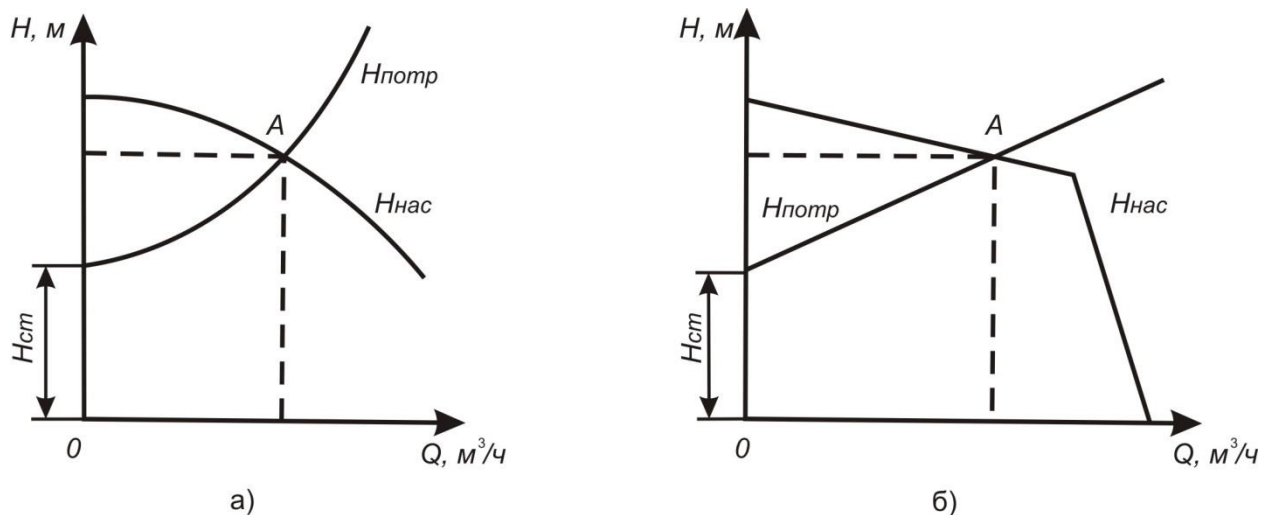
где $R_{изг}$ – радиус изгиба трубопровода, м.

Потери давления на запорной арматуре рассчитывают следующим образом

$$\Delta p_{арм} = \exp \left(2,35 - \frac{0,036}{\sqrt{Q_{BVC}}} + \frac{0,90}{\sqrt{D_y}} \right), \quad (5.35)$$

где D_y – диаметр условного прохода задвижки, м.

Далее, строим характеристику гидротранспортной системы и соединяем ее с характеристикой насоса. Подбор насоса производится таким образом, чтобы рабочая точка находилась в пределах максимального КПД насоса (рис. 5.3).



а) динамический насос, б) объемный насос

Рисунок 5.3 - Определение рабочей точки насоса [36, 221]:

Все характеристики насосов определяются на воде, однако, при переходе на водоугольное топливо значение их изменяется, при этом необходимо производить пересчет параметров насосного оборудования на суспензию [204].

Для пересчета параметров насосного оборудования необходимо определить его новую напорно-расходную характеристику, которая для случая транспортировки дисперсных сред определяется зависимостью (при $\rho = const$)

$$H_{BVC} = b_H - a_H Q_{вод}, \quad (5.36)$$

где a_H , b_H – коэффициенты, зависящие от плотности (концентрации) транспортируемой среды и типа насоса и определяемые экспериментально; $Q_{вод}$ – подача насоса на воде, м³/ч.

Для насосов с ниспадающей характеристикой коэффициенты a_H и b_H могут быть рассчитаны по следующим зависимостям

$$a_H = 0,139 + 3,87 \cdot 10^{-12} \cdot \rho_{BVC}^3, \quad (5.37)$$

$$b_H = 748,5 - \frac{14624,88}{\sqrt{\rho_{BVC}}} \quad (5.38)$$

Подача насоса на ТВУС может быть рассчитана [53]

$$Q_{BVC} = k_Q \cdot Q_{вод}, \quad (5.39)$$

где k_Q – экспериментальный коэффициент.

Решая (5.30) и (5.36) можно совместно определить рабочую точку насоса для данной сети.

Мощность, развиваемая насос на суспензии

$$N_{BVC} = H_{BVC} \cdot Q_{BVC}, \quad (5.40)$$

КПД насоса при перечислении на гидросмесь [66]

$$\eta_{BVC} = k_\eta \cdot \eta_{вод}, \quad (5.41)$$

где k_η – экспериментальный коэффициент, $k_\eta = 1 - 0,2S$.

Вакуумметрическая высота всасывания для водоугольной суспензии

$$H_{вак. BVC} = H_{вак. вод} \cdot (1 + aS) \cdot n + H_a \frac{\rho_{BVC} - \rho_{вод}}{\rho_{вод}}, \quad (5.42)$$

где H_a – атмосферное давление в м. вод. ст.

В случае, если не один из серийно выпускаемых насосов или их комбинация не подходит, необходима регулировка характеристик насосного оборудования [37, 66, 220, 233, 272].

Следует отметить, что основным при выборе насосного оборудования является нахождение рабочей точки в рабочем интервале насосного оборудования.

Для определения рациональных параметров трубопроводной системы для ТВУС необходимо при постоянном расходе твердого компонента изменить массовую концентрацию $C_{уг}$ и повторить расчет.

Процесс расчета параметров трубопроводных систем технологических процессов является трудоемким, особенно в части численного определения текущих потерь давления, в связи с чем, целесообразно использовать автоматизацию вычислений.

Алгоритм определения основных параметров системы перемещения водоугольной суспензии (водоугольного топлива) может быть реализован программным образом, по представленной блок-схеме (рис. 5.4).

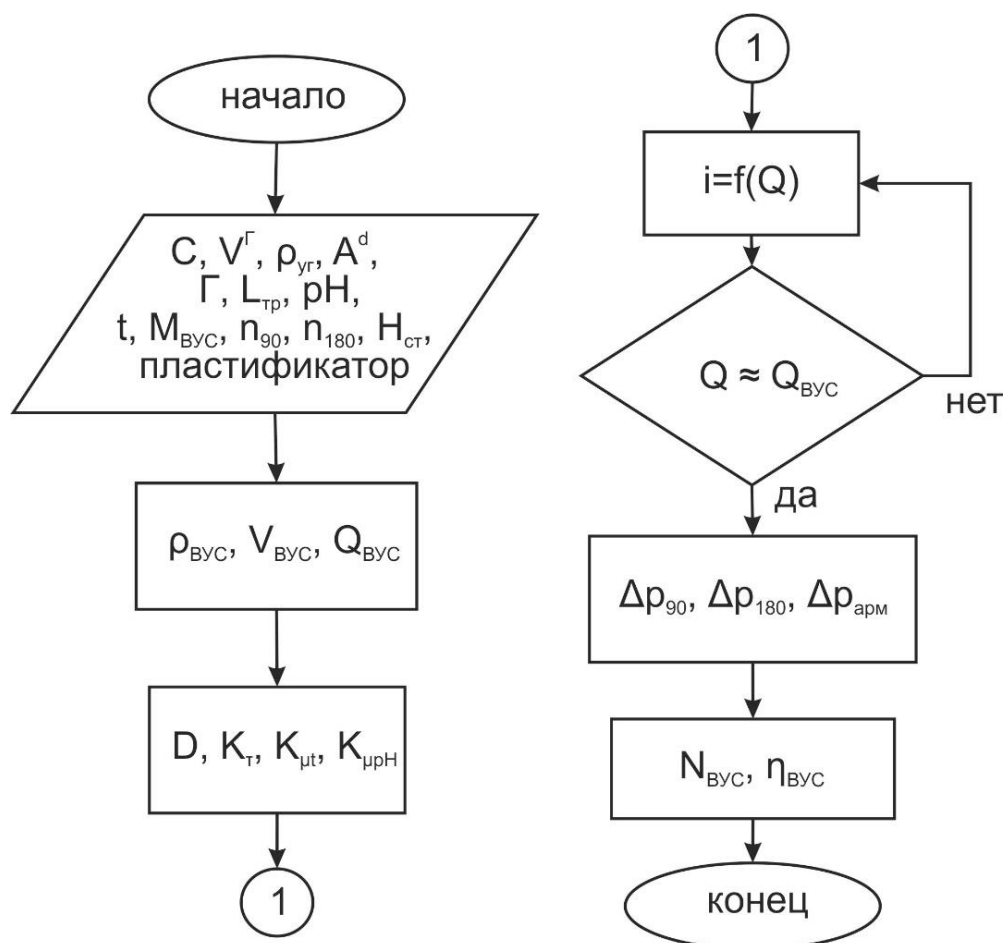


Рисунок 5.4 – Блок-схема определения основных параметров системы перемещения водоугольной суспензии (водоугольного топлива)

Расчет параметров трубопроводных систем технологических процессов связанных с приготовлением, транспортированием и использованием ВУТ (ТВУС) имеет ряд отличий от расчета по обычной методике: учет реологического поведения транспортируемой среды при определении потерь давления; перерасчет напорно-расходной характеристики насосного оборудования и рабочих точек; необходимость расчета нескольких вариантов для различных концентраций твердой фазы с целью определения рационального режима работы гидротранспортной системы.

5.2.3. Корректировка параметров насосного оборудования.

Для гидротранспорта используются различные типы насосов, основными из которых являются центробежные, поршневые (плунжерные), питатели и эрлифты [203, 221].

Изменение параметров насосного оборудования может производиться на короткий период или длительное время (срок службы). Основными способами регулирования характеристик являются изменение частоты вращения или изменение размера рабочего колеса.

Пересчет на новые характеристики основывается на критериях подобия гидромашин [53].

При изменении частоты вращения требует пересчета напорно-расходной характеристики насоса и кривой мощности, пересчет осуществляется по зависимостям

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2} \Rightarrow Q_2 = \frac{n_2}{n_1} Q_1, \quad (5.43)$$

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^2 \Rightarrow H_2 = H_1 \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^2, \quad (5.44)$$

$$\frac{N_1}{N_2} = \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^3 \Rightarrow N_2 = N_1 \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^3, \quad (5.45)$$

где n_1, n_2 – величина оборотов рабочего колеса до и после изменения, об/мин;

Q_1, Q_2 – расход до и после изменения частоты вращения, м³/с;

H_1, H_2 – напор до и после изменения частоты вращения, м;

N_1, N_2 – мощность до и после изменения частоты вращения, кВт.

В случае обрезки рабочего колеса параметры определяются приведенными зависимостями

$$\frac{Q_{об}}{Q_1} = \left(\frac{D_{об}}{D_1} \right)^{1,6} \Rightarrow Q_{об} = Q_1 \left(\frac{D_{об}}{D_1} \right)^{1,6}, \quad (5.46)$$

$$\frac{H_{об}}{H_1} = \left(\frac{D_{об}}{D_1} \right)^{2,5} \Rightarrow H_{об} = H_1 \left(\frac{D_{об}}{D_1} \right)^{2,5}, \quad (5.47)$$

$$\frac{N_{об}}{N_1} = \left(\frac{D_{об}}{D_1} \right)^4 \Rightarrow N_{об} = N_1 \left(\frac{D_{об}}{D_1} \right)^4, \quad (5.48)$$

где $D_1, D_{об}$ – диаметр рабочего колеса до и после обточки, м;

$Q_1, Q_{об}$ – расход до и после изменения размера рабочего колеса, м³/с;

$H_1, H_{об}$ – напор до и после изменения размера рабочего колеса, м;

$N_1, N_{об}$ – мощность до и после изменения размера рабочего колеса, кВт.

Стоит отметить, что основным при выборе насосного оборудования является нахождение рабочей точки в рабочем интервале насосного оборудования.

Для определения рациональных параметров трубопроводной технологической системы, необходимо при постоянном расходе твердого компонента изменить массовую концентрацию C и повторить расчет. После чего сравнить величины затрачиваемых на перемещение суспензии мощностей насосного оборудования (меньшее значение будет соответствовать более экономичному режиму).

5.3 Расчет экономического эффекта

Основной задачей данной работы является определение наиболее энергоэффективного режима работы трубопроводной технологической системы по перемещению водоугольной суспензии и определение экономического эффекта от внедрения разработанных теоретических подходов и методик [264, 297, 299].

Расчет экономического эффекта целесообразно базировать на методиках вычисления эффективности работы систем утилизации отходов промышленных

производств, с учетом особенностей расчета гидротранспортных систем [264, **Ошибка! Источник ссылки не найден.**].

Исходными данными для определения экономической эффективности внедряемой методики являются:

- нормативный срок службы оборудования гидротранспортной системы при работе с низкой концентрацией суспензии $P_{об}$, лет;
- нормативный срок службы оборудования гидротранспортной системы при работе с высокой концентрацией суспензии $P_{об}^H$, лет;
- нормативный коэффициент капитальных вложений – k_n ;
- цена 1 шт. изделия для транспорта с низкой концентрацией суспензии $C_{об}$, руб.;
- цена 1 шт. изделия для транспорта с высокой концентрацией суспензии $C_{об}^H$, руб.;
- объем транспортируемой ТВУС на предприятии с низкой концентрацией угля $Q_{сыр}$, м³/год;
- объем транспортируемой ТВУС на предприятии с высокой концентрацией угля $Q_{сыр}^H$, м³/год;
- цена за транспорт единицы материала $C_{сыр}$, руб./м³;
- продолжительность простоя оборудования из-за незапланированного ремонта (отказа) $t_{обот}$ ч/год;
- стоимость затраченных человеко-часов при отказе $C_{ремот}$, руб.;
- простой оборудования во время запланированных ремонтов $t_{рем}$ ч/год;
- стоимость затраченных человеко-часов при плановом ремонте $C_{рем}$, руб.;
- цена оборудования, вышедшего из строя при отказе $C_{от}$, руб.;
- цена заменяемой детали при плановом ремонте C_p , руб.;
- количество эксплуатируемых изделий одного типа $n_{изд}$, шт.

Расчет годового экономического эффекта при различных соотношениях сроков службы оборудования ГТС, руб.

1. Если $P_{об}^H > P_{об}$,

$$\mathcal{E}_z = (C_{об} - C_{об}^H) \cdot k_n (P_{об}^H - P_{об}) + (Q_{сыр} - Q_{сыр}^H) C_{сыр}. \quad (5.49)$$

2. Если $P_{об}^H < P_{об}$,

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_z = & (Q_{сыр} - Q_{сыр}^H) C_{сыр} + t_{обот} C_{ремонт} - t_{рем} C_{рем} + C_{от} - C_p - \\ & - k_n (C_{об} - C_{об}^H) (P_{об} - P_{об}^H) \end{aligned} \quad (5.50)$$

В состав гидротранспортной системы входит большое количество технологического оборудования. В общем случае экономический эффект определим из выражения

$$\mathcal{E}_{общ} = \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^{n_{изд}} \mathcal{E}_{zijk}, \quad (5.51)$$

где N – количество видов эксплуатируемого оборудования; n – количество наименований отдельного вида оборудования; $n_{изд}$ – количество эксплуатируемых единиц оборудования данного вида и наименования; \mathcal{E}_{zijk} – годовой экономический эффект от прогнозирования срока замены i -ой единицы оборудования j -го вида k -го наименования.

Для обобщения результатов расчета экономического эффекта и повышения применимости его результатов рассмотрим наиболее типичное оборудование ПГТС:

- а) насосно-перекачивающее оборудование;
- б) элементы трубопроводов и др. соединительной арматуры;
- в) запорная и регулирующая арматура.

При этом типоразмеры оборудования, режимы и параметры его функционирования, выбирались наиболее типичными для ГТС.

В данном случае суммарный экономический эффект для отдельного вида оборудования

$$\mathcal{E}_{z(n,m)} = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^{n_{изд(z,n,m)}} \mathcal{E}_{z_{ij}}, \quad (5.52)$$

где $n_{изд(z, n, m)}$ - соответствующее число единиц эксплуатируемого насосно-перекачивающего оборудования, элементов трубопроводов и др., соединительной арматуры, а также запорно-регулирующей арматуры.

Результаты расчетов экономического эффекта от внедрения транспорта золошлака в виде гидросмеси с высокими концентрациями в зависимости от изменения массовой концентрации гидросмеси и приведены в таблице 5.7.

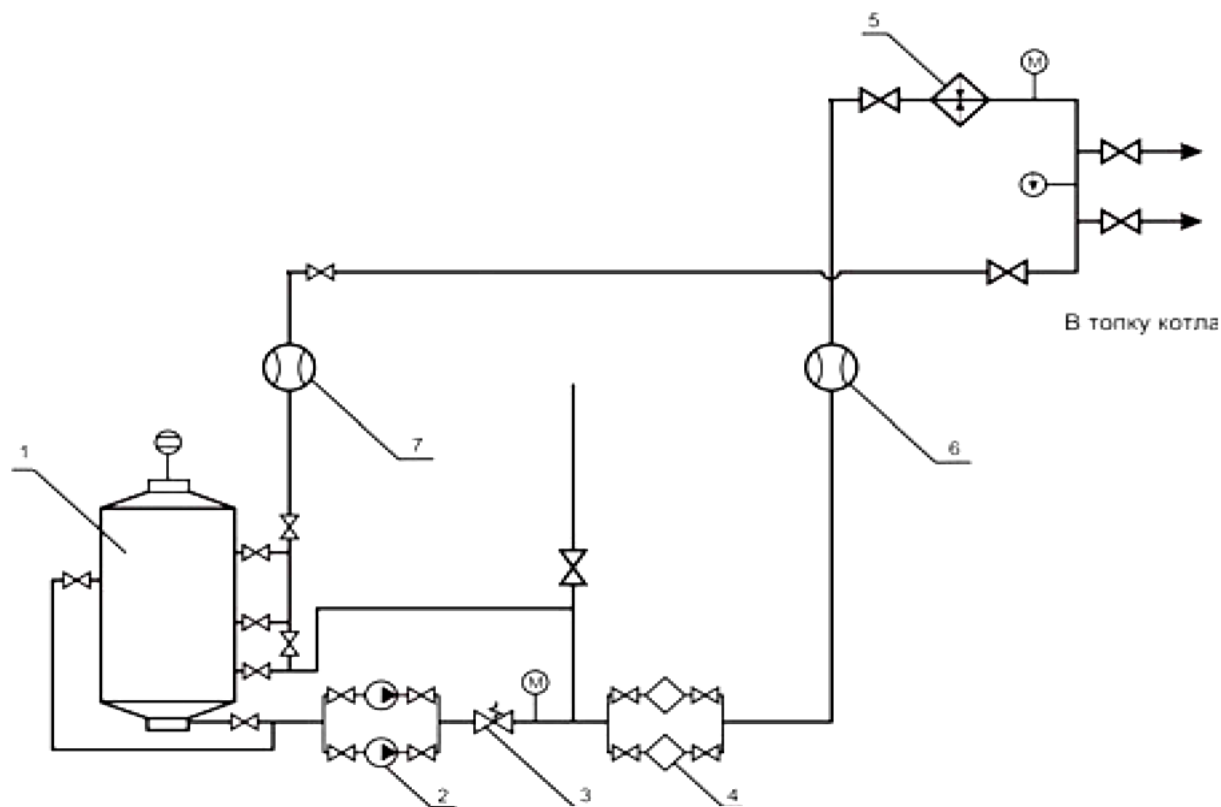
Таблица 5.7 – Результаты расчета экономического эффекта от внедрения транспорта золошлака в виде гидросмеси с высокими концентрациями

Наименование оборудования	Изменение массовой концентрации суспензии	Экономический эффект для данного наименования оборудования
Запорно-регулирующая арматура	с 62 до 67%	$\mathcal{E}_{z3} = \sum_{i=1}^{n_{изд}} (0,09 \div 0,15) \cdot C_{об}$
Насосно-перекачивающее оборудование		$\mathcal{E}_{zn} = \sum_{i=1}^{n_{изд}} (0,1 \div 0,3) \cdot C_{об}$
Элементы трубопроводов и соединительной арматуры		$\mathcal{E}_{zm} = \sum_{i=1}^{n_{изд}} (0,15 \div 0,2) \cdot C_{об}$

Следует отметить, что в случае расчета экономического эффекта непосредственно для трубопроводной технологической системы основной вклад в него формируется за счет сокращения затрат на эксплуатацию оборудования, транспортные расходы, путем оптимизации режимов транспортирования.

С использованием разработанных методов расчета трубопроводной технологической системы для ТВУС произведен расчет технико-экономических показателей замены природного газа водоугольным топливом, для условий котельной шахты «Должанская-Капитальная» ГП «Свердловск-

антрацит», оборудованной котлами ДКВР 10-13. Поставщиком исходного продукта для приготовления ТВУС в этом случае является ЦОФ «Свердловская» того же госпредприятия. На фабрике работают четыре сушилки, где 250 т/ч антрацитового штыба высушивают в кипящем слое. При этом, из циклонов системы дымоочистки удаляют 60 т/ч антрацитовой мелочи зольностью $A^d=20-22\%$, которая может быть использована для приготовления водоугольной дисперсии (рис.5.5).



1 – оперативная емкость; 2 – насосы; 3 – предохранительный клапан; 4 – фильтры; 5 – подогреватель; 6, 7 – расходомеры; 8 – запорная арматура

Рисунок 5.5 – Схема части трубопроводной системы подачи ТВУС

Следует отметить, что подобная технологическая схема расположения пункта производства ВУТ и его потребителей является оптимальной, так как позволяет сократить затраты на перемещение топливной среды.

Исходные данные для расчета приведены в таблице 5.8.

Таблица 5.8 – Исходные данные для расчета

№ п/п	Показатель	Значение	Единицы
1	Общий расход ТВУС	8	т/ч

2	Длина участка диаметр 50 мм ($Q_{ТВУС}=2$ т/ч)	100	м
3	Длина участка 80 мм ($Q_{ТВУС}=4$ т/ч)	100	м
4	Длина участка 125 мм ($Q_{ТВУС}=8$ т/ч)	500	м
5	Зольность угля, A^d	22	%
6	Влажность угля, W_A	12	%
7	Концентрация ТВУС	62-67	%
8	Низшая удельная теплота сгорания угля, $Q_{H_A}^p$ (уголь А)	30114	кДж/кг

На основании предложенной методики расчета параметров трубопроводных технологических систем [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**], а также рекомендаций по выбору скоростей течения и диаметров трубопровода [204], произведены вычисления энергетических затрат на транспортирование водоугольной суспензии (рис. 5.6).

Анализ приведенных зависимостей позволил установить, что затраты энергии на перемещение угольной дисперсной среды, рассчитанные по предложенной методике до 2-х раз ниже рассчитанных согласно классического уравнения Букингема.

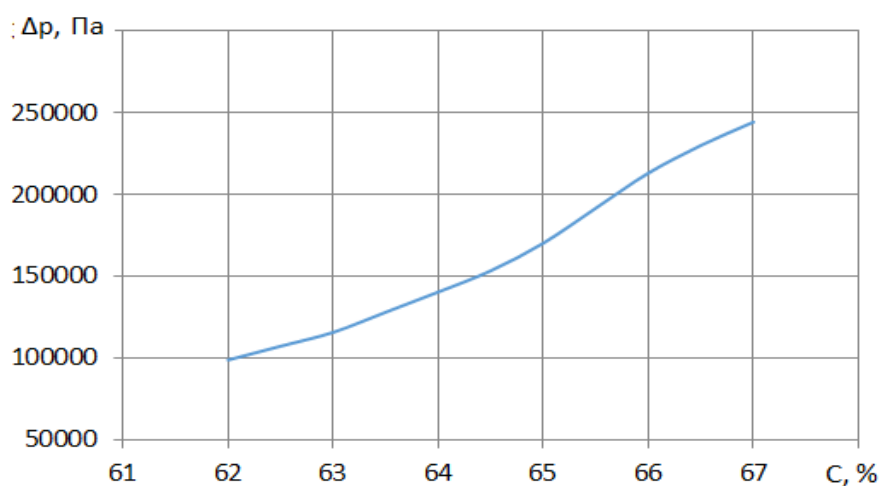


Рисунок 5.6 – Потери давления при течении ТВУС из угля марки А различных концентраций (критерий $\Gamma=2$, $A^d=22\%$)

Экономический эффект от использования предложенного подхода, с учетом цены на электроэнергию C_{ε} для предприятий, составит ($C=67\%$)

$$P_{\text{экл}} = (N_B - N_M) C_{\varepsilon} \cdot n_{\text{ч}} = (N_B - N_M) C_{\varepsilon} \cdot n_{\text{ч}}, \quad (5.53)$$

где N_B , N_M – мощности затрачиваемые на перемещение суспензии по уравнению Букингема и предложенной методике, кВт; C_{ε} – цена киловатта электроэнергии для предприятий, рублей; $n_{\text{ч}}$ – количество рабочих часов в год, ч.

$$P_{\text{экл}} = 100 \text{ тыс. руб. в год}$$

Полученная величина составляет порядка 35–40% от всех эксплуатационных затрат на перемещение водоугольной дисперсии по трубопроводам в рамках технологической системы.

Для определения экономического эффекта от перехода на другой тип топлива, а также рациональных параметров течения ВУТ, которые обеспечивают минимизацию затрат на получение единицы тепла, необходимо произвести расчет теплоты сгорания получаемого топлива.

Теплотворная способность получаемого топлива рассчитывается по следующей методике:

– теплота сгорания ВУТ

$$Q_{H_{\text{ВУТ}}}^p = (Q_{H_1}^p - 24,42W_1^p) \frac{100 - (W_{\text{ВУТ}}^p + A_{\text{ВУТ}}^p)}{100 - (W_1^p + A_1^p)} - 24,42 \cdot W_{\text{ВУТ}}^p, \text{ кДж/кг} \quad (5.54)$$

где $Q_{H_1}^p$ – низшая удельная теплота сгорания угля, кДж/кг; W_1^p – рабочая влажность исходного угля (равна влажности угля), %; A_1^p – рабочая зольность угля, %; $W_{\text{ВУТ}}^p$ – влажность ВУТ (содержание воды в ТВУС), %; $A_{\text{ВУТ}}^p$ – рабочая зольность ВУТ, %.

– рабочая зольность угля

$$A^p = A^d \frac{100 - W_1^p}{100}, \quad (5.55)$$

где A^d – зольность угля, %.

Результаты расчетов приведены в таблице 5.9.

Таблица 5.9 – Результаты расчета теплоты сгорания ТВУС

№ п/п	Концентрация угля С, %	Низшая теплота сгорания ТВУС, кДж/кг
1	62	17099
2	62,5	17257
3	63	17415
4	63,5	17573
5	64	17731
6	64,5	17890
7	65	18048
8	65,5	18206
9	66	18364
10	66,5	18522
11	67	18680

При условии использования ТВУС с концентрацией 62% и теплотой сгорания $Q_{H_{ВУТ}}^p = 17099$ кДж/кг, себестоимостью – 1200 руб./т, экономический эффект за год в сравнении с мазутом ($Q_{H_{маз}}^p = 40000$ кДж/кг, цена – 25000 руб./т) составит:

$$\mathcal{E} = Z_{маз} - Z_{ВУТ},$$

где $Z_{маз}$, $Z_{ВУТ}$ – затраты на мазут и ВУТ соответственно, руб.

$$Z_{тон} = Q_{тон} \cdot C_{тон} \cdot n_{ч},$$

где $Q_{тон}$ – количество расходуемого топлива, т/ч; $C_{тон}$ – цена тонны условного топлива, руб.

$$Z_{маз} = 219 \text{ млн руб.};$$

$$Z_{ВУТ} = 24,6 \text{ млн руб.};$$

$$\mathcal{E} = 194,4 \text{ млн руб.}$$

Энергоэффективность режима транспортирования определяется из количества полученной тепловой энергии приходящейся на 1 кВт затрачиваемой мощности (рис.5.7).

Следует отметить, что величина тепловой энергии, приходящаяся на киловатт затрачиваемой мощности, монотонно снижается с ростом концентрации твердой фазы как для расчетов по уравнению Букингема, так и для предложенной методики. При этом, абсолютная ее величина до 2-х раз больше при расчетах согласно разработанного подхода.

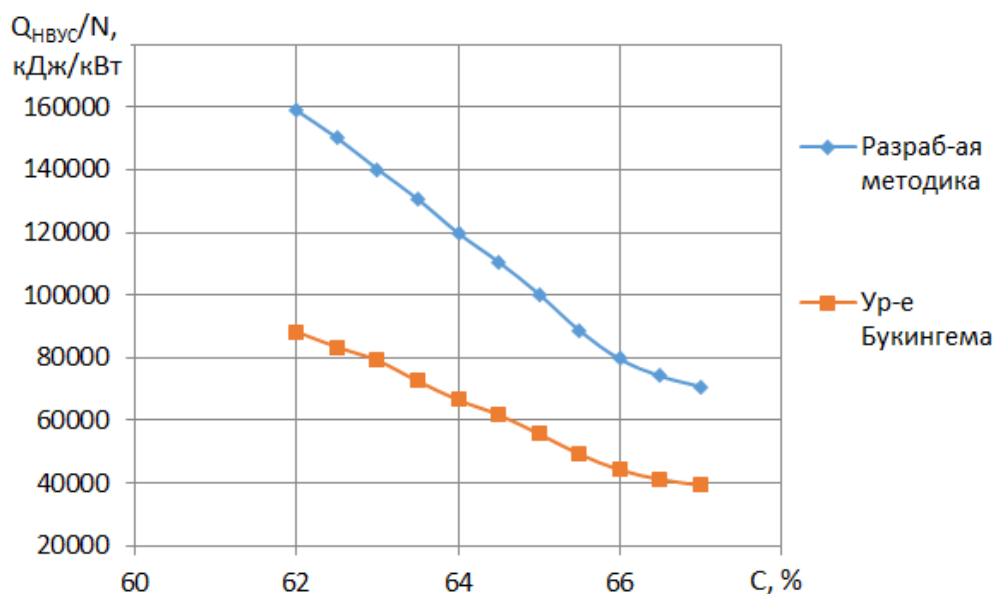


Рисунок 5.7 – Количество тепла, приходящееся на киловатт затраченной энергии по уравнению Букингема и предложенной методике (п. 5.2)

Однако, для обеспечения наибольшей теплоты сгорания ВУТ, а также стабильности технологических процессов (горения, газификации и т.д.), необходимо обеспечивать максимально возможную (обеспечение течения) концентрацию твердой фазы.

5.4 Рекомендации по эксплуатации систем транспортирования ТВУС

Кардинальная политико-экономическая проблема водоугольного топлива (ВУТ) базируется на том факте, что промышленные запасы угля значительно шире и равномернее распространены по земному шару, чем совокупные запасы нефти и газа, а в энергетическом эквиваленте многократно их превосходят. Огромные залежи угля сосредоточены в России, Китае, США, Австралии,

Канаде, ЮАР и во многих других странах. Добыча и транспортирование угля на любые, особенно дальние, расстояния механизированы и четко организованы.

Тематика ВУТ стала особенно популярной начиная с 70-х годов прошлого века. Задача состоит в разработке технологий приготовления ВУТ (ТВУС) такого качества, чтобы с наименьшими издержками можно было заменить им мазут в энергетических агрегатах. Проектировали также трубопроводное транспортирование водоугольного топлива на дальнее расстояние, разрабатывали технологию применения ТВУС в двигателях внутреннего сгорания (ДВС) и вместо угля в газогенераторах. Также выполнен значительный объем работ по замене угля на ВУТ в тепловых котельных.

Неправильный подбор параметров и режимов работы трубопроводов технологических систем и режимов течения топливных водоугольных суспензий, обеспечивающих необходимую производительность, может привести к выходу из строя насосного оборудования и к остановке всей системы в целом.

Для обеспечения стабильной и безотказной работы трубопроводной технологической системы для ТВУС по итогам проведенной научно-исследовательской работы рекомендуется:

- обеспечивать значения вязкостных характеристик в следующих диапазонах τ до 10,8 – 20 Па, μ_s до 1,2 – 2,0 Па·с при скорости сдвига 9 с^{-1} ;

- скорость течения водоугольной суспензии необходимо обеспечивать в рамках рекомендуемых значений, которые соотносятся с диаметром используемых трубопроводов;

- значения зольности дисперсной фаз не должно превышать 35% для обеспечения достаточной теплотворной способности получаемой топливной смеси;

- гранулометрический состав твердой фазы (срединный диаметр и критерий бимодальности) рекомендуется обеспечивать в следующих диапазонах $d_{cp}=32 - 40 \text{ мкм}$, $\Gamma=1,4 - 2,1$;

– невозможно однозначно рекомендовать тот или иной пластификатор, так как точка оптимума вязкости изменяется в зависимости от концентрации твердого компонента; для содержания твердой фазы до 64 % достаточно использования пластифицирующих добавок ЛСТ и УЦР, а при ее возрастании более 65% следует применять НФУ (Дофен), для получения регламентируемых значений реологических характеристик;

– одним из путей получения ВУТ с заданными вязкостными характеристиками является изменение водородного показателя рН жидкой фазы рекомендуемый диапазон его изменения составляет от 7 до 9;

– температурный режим работы таких систем следует обеспечивать в условиях отсутствия замерзания транспортируемой среды. В связи с чем, для внутрицеховых и промышленных гидросистем прокладку трубопроводов в пределах промплощадок следует производить над землей: на опорах или в каналах со свободным доступом; на открытых участках необходимо обеспечить подогрев (прокладка паровых спутников) либо теплоизоляцию; за пределами промышленных площадок трубопроводы для ТВУС следует располагать под землей, при условии обеспечения температуры в верхней части трубопровода не ниже $+1^{\circ}\text{C}$ (в зимний период); в случае длительных остановок в зимнее время рекомендуется обеспечить слив водоугольной суспензии из трубопроводной системы для предотвращения аварийных ситуаций при последующем пуске;

– следует отметить, что для технологических систем целесообразно принимать максимально рекомендуемые значения скоростей течения по трубопроводу, что обуславливает сокращение времени транспортирования;

– для фасонных элементов трубопроводов, представленных поворотами на 90° и 180° , следует принимать значения радиуса изгиба не менее $3R$;

– в качестве запорной арматуры для технологических систем, связанных с перемещением водоугольных суспензий, следует рекомендовать специализированную запорную арматуру – шибберные задвижки или шаровые краны, которые обеспечивают минимальное сопротивление течению в

открытом состоянии; при незначительном их количестве в технологической системе потерями напора на данных элементах можно пренебречь;

– регулировку производительности технологической системы целесообразно производить за счет изменения подачи насосного оборудования (изменением частоты вращения, перепуском части нагнетаемой среды, обрезкой рабочих колес и т.д.);

– для обеспечения наибольшей теплоты сгорания ТВУС, а также стабильности технологических процессов (горения и т.д.), необходимо обеспечивать максимально возможную (обеспечение течения) концентрацию твердой фазы, для углей марок Г, Д – порядка 63-65%, ОС – порядка 64-66%, А – порядка 66% и более;

– для обеспечения заданных характеристик топливной суспензии, полученной при переработке обводненных угольных отходов целесообразно использование современных способов потокового измельчения (кавитация, ударная волна электрического разряда и т.д.) и обогащения, которые обеспечивают получение заданных параметров при общей высокой производительности системы.

Выводы к разделу 5

В данном разделе представлена усовершенствованная за счет использования ударной волны высоковольтного электрического разряда схема обогащения отходов переработки угля, методики расчета основных параметров трубопроводной системы и насосного оборудования по перемещению водоугольных суспензий и расчеты экономических показателей.

В результате проведенных исследований установлено, что практически все обводненные отходы углеобогащения требуют дополнительного измельчения в процессе приготовления ТВУС.

Одним из перспективных способов измельчения частиц угля в жидкой среде, наряду с кавитацией, является использование высоковольтного

электрического разряда. При этом, данный способ целесообразно использовать в рамках существующих систем обогащения тонкодисперсных материалов.

При разрушении частиц твердого материала следует учитывать энергию первых семи ударных волн, так как только они обладают достаточной долей энергии для осуществления процесса измельчения. Наибольшее значение получаемой удельной поверхности приходится на 1-й удар, дальнейшее увеличение поверхности частиц материала снижается по степенному закону.

Современные подходы и способы измельчения шламовых отходов дополняют и совершенствуют существующие схемы обогащения отходов, а также системы приготовления водоугольных суспензий из побочных продуктов угольной промышленности.

Электрогидроудар с силой тока 41 кА и напряжением 93 кВ для разрядной камеры длиной 300 мм и диаметром 250 мм обеспечивает ударную волну с давлением на фронте от 55 до 15 МПа при длительности воздействия 1300 мкс, что позволяет повысить качество обогащения шламовых отходов за счет их поточного дробления до заданного гранулометрического состава.

Расчет параметров трубопроводных систем технологических процессов связанных с приготовлением, транспортированием и использованием ТВУС имеет ряд отличий от расчета по классической методике: учет реологического поведения транспортируемой среды при определении потерь давления; перерасчет напорно-расходной характеристики насосного оборудования и рабочих точек; необходимость расчета нескольких вариантов для различных концентраций твердой фазы с целью определения рационального режима работы гидротранспортной системы.

Экономическую эффективность от использования технологических трубопроводных систем в сфере водоугольных технологий следует разделять на эксплуатационную и связанную с переходом на другой тип топлива.

В рамках предложенного проекта перевода котлов ДКВР котельной шахты «Должанская Капитальная» на водоугольную суспензию в качестве основного топлива, расчетный экономический эффект от сокращения

эксплуатационных затрат составил 100 тыс. рублей, от перехода на ТВУС – 194,4 млн. рублей.

Решающую роль при выборе концентрации твердой фазы в ТВУС играют необходимость обеспечения процесса горения (или иного технологического процесса), а также конфигурация технологической системы.

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 (гидроударное) 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 с⁻¹ и 9 - 48,6 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 ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров, В. И. Методы снижения энергоемкости при гидротранспортировании смесей высокой концентрации / В. И. Александров. – СПб. : СПГГИ(ТУ), 2000. – 117 с.
2. Александрова, И. А. Математика на Python. Ч. I / И.А. Александрова. – М. : Прометей, 2018. – 347 с.
3. Альтшуль, А. Д. Гидравлика и аэродинамика. Основы механики жидкости : [для вузов по специальности "Теплогазоснабжение и вентиляция"] / А. Д. Альтшуль, П. Г. Киселев. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Стройиздат, 1975. – 327 с. : черт.
4. Анализ состава поставляемых на комплекс приготовления угля и воды, результатов работы технологического оборудования и рекомендации по режимам работы оборудования в зависимости от характеристик угля и воды : отчет о НИР ; № 90.240.25 (ВНИИПИГидротрубопровод) ; рук. Делягин Г. Н. – М., 1990. – 92 с.
5. Антипенко, Л. А. Перспектива внедрения новой технологии и обогащения шламов отстойников углеобогажительных фабрик / Л.А. Антипенко // Энергетическая безопасность России. Новые подходы к развитию угольной промышленности : тр. Междунар. конф. – Кемерово, 1999. – С. 82–83.
6. Асатур, К. Г. Гидромеханика : учеб. для студентов вузов, обучающихся по направлению "Гор. дело" / К. Г. Асатур, Б. С. Маховиков ; М-во образования Рос. Федерации, С.-Петербург. гос. гор. ин-т им. Г. В. Плеханова (техн. ун-т). – СПб. : С.-Петербург. гор. ин-т им. Г. В. Плеханова, 2001. – 253 с.
7. Байченко А. А. Интенсивная технология обогащения угольных шламов / А. А. Байченко // Уголь. – 1990. – № 10. – С. 49–51.
8. Баранов, И. О. Повышение эффективности транспортировки высококонцентрированного водоугольного топлива в гидротранспортных системах промышленных предприятий : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.12 / Баранов Игорь Олегович. – Днепропетровск, 2019. – 217 с.

9. Баранова, М. П. Влияние пластифицирующих добавок на реологические характеристики водоугольных суспензий из углей разной степени метаморфизма / М. П. Баранова // Тр. Кемер. гос. техн. ун-т. – 2006. – № 2–3. – С. 143–147.

10. Баранова, М. П. Возможность использования вторичных ресурсов в технологии получения топливных водоугольных суспензий / М. П. Баранова, В.М. Екатеринчев // Ползуновский вестник. – 2011. – № 2/1. – С. 235–238.

11. Баранова, М. П. Гидравлические режимы трубопровода для транспорта водоугольных суспензий / М. П. Баранова // Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири : тр. IX Междунар. науч.-практ. конф. – Кемерово, 2012. – С. 185–187.

12. Баранова, М. П. Перспективы развития технологии получения водоугольных топливных суспензий / М. П. Баранова, В. А. Кулагин // Энергоэффективность систем жизнеобеспечения города : материалы XI Всерос. науч.-практ. конф. – Красноярск, 2010. – С. 136–139.

13. Баранова, М. П. Получение топливных водоугольных суспензий из бурых углей с использованием отходов производств / М. П. Баранова // Энергетическая безопасность России. Новые подходы к развитию угольной промышленности : материалы VIII Междунар. науч.-практ. конф. – Кемерово, 2006. – С. 123–125.

14. Баранова, М. П. Приготовление высококонцентрированных водоугольных суспензий из смесей углей различной степени метаморфизма / М. П. Баранова, Т. А. Кулагина // Вестн. Междунар. акад. наук экологии и безопасности жизнедеятельности (МАНЭБ). – 2009. – Т. 14, № 6. – С. 165–169.

15. Баранова, М. П. Природа стабилизации водоугольных топливных суспензий / М. П. Баранова, В. А. Кулагин, В. Е. Тарабанько // Журн. приклад. химии. – 2011. – Т. 84, вып. 6. – С. 916–921.

16. Баранова, М. П. Стабильность нанодисперсных бинарных топливных систем / М. П. Баранова, В. И. Мурко // Наноматериалы и технологии. Наноструктурированные системы в физике конденсированного

состояния. Техника и технология наноматериалов : тр. IV Междунар. науч.-практ. конф. – Улан-удэ, 2012. – С. 4–9.

17. Баранова, М. П. Теоретические и технологические основы получения водоугольных топливных суспензий из низкометаморфизованных углей / М. П. Баранова // Энергетика в глобальном мире : сб. докл. I Междунар. науч.-техн. конгр. – Красноярск, 2010. – С. 361–368.

18. Баранова, М. П. Технологии получения и использования топливных водоугольных суспензий из углей различной степени метаморфизма : дис. ... д-ра техн. наук : 05.14.01 / Баранова Марина Петровна ; [Нац. исслед. ун-т МЭИ]. – М., 2014. – 275 с.

19. Баранова, М. П. Технологические аспекты процессов получения и применения водоугольного топлива / М. П. Баранова // Энергоэффективность систем жизнеобеспечения города : материалы VII Всерос. науч.-практ. конф. – Красноярск, 2006. – С. 246–252.

20. Баранова, М. П. Физико-химические основы получения топливных водоугольных суспензий / М. П. Баранова, В. А. Кулагин. – Красноярск : ИПК СФУ, 2011. – 160 с.

21. Баранова, М. П. Экологически чистая технология получения водотопливных суспензий из низкометаморфизованных углей / М. П. Баранова, Т. А. Кулагина // Безопасность жизнедеятельности. – 2010. – № 12. – С. 32–35.

22. Баранова, М. П. Энергетические и экологические аспекты утилизации водоугольных топливных дисперсных систем / М. П. Баранова, В.А. Кулагин, С. В. Лебедев // Наноматериалы и нанотехнологии. Наноразмерные структуры в физике конденсированного состояния. Технологии наноразмерных структур : II-я Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. – Улан-Удэ, 2009. – С. 154–159.

23. Белецкий, В. С. Исследование характеристик водоугольного топлива в зависимости от свойств исходного угля / В. С. Белецкий, А. А. Круть, Ю. Ф. Власов // Науч. вестн. Нац. горного ун-та. – Днепропетровск, 2006. – № 6. – С. 46–49.

24. Белецкий, В. С. К вопросу регулирования электрокинетических свойств углей в суспензиях / В. С. Белецкий, П. В. Сергеев, М. К. Борейко // Химия твердого топлива. – 1990. – № 5. – С. 73–75.
25. Белецкий, В. С. Особенности гидравлической транспортировки водоугольного топлива / В. С. Белецкий, А. А. Круть, Ю. Г. Свитлый // Форум горняков. – Днепропетровск, 2008. – Т. 3. – С. 272–278.
26. Белецкий, В. С. Перспективы внедрения технологии водоугольного топлива в малой теплоэнергетике Украины / В. С. Белецкий, А. А. Круть, Ю. Г. Свитлый // Форум горняков : материалы междунар. конф. – Днепропетровск, 2007. – С. 177–180.
27. Белецкий, В. С. Разработка научных основ и способов селективной масляной агрегации угля и углесодержащих продуктов : дис. ... д-ра техн. наук : 05.15.08 / Белецкий Владимир Стефанович. – Донецк, 1994. – 452 с.
28. Белецкий, В. С. Рациональное измельчение угля в технологии приготовления водоугольного топлива / В. С. Белецкий, А. А. Круть, Ю. Г. Свитлый // Сб. науч. работ Донецк. науч.-техн. ун-та. Сер. Электротехника и энергетика. – 2008. – Вып. 45 (131). – С. 27–39.
29. Белецкий, В. С. Реологические характеристики водоугольных суспензий в зависимости от качества исходного угля / В. С. Белецкий, А. А. Круть, Ю. Ф. Власов // Вестн. Криворож. техн. ун-та. – Кривой Рог, 2006. – Вып. 11. – С. 49–55.
30. Белецкий, В. С. Утилизация угольных шламов путем изготовления водоугольного топлива / В. С. Белецкий, А. А. Круть, Ю. Г. Свитлый // Обогащение полезных ископаемых. – Днепропетровск, 2005. – Вып. 24 (65). – С. 111–118.
31. Беляев, А. А. Опыт сжигания отходов флотации углей в кипящем слое / А. А. Беляев. – М. : НЦ НТГО, 1989. – 54 с.
32. Беляев, А. А. Сжигание высокозольного топлива и возможности его использования на ТЭС / А. А. Беляев // Химия твердого топлива. – 2005. – № 1. – С. 44–53.

33. Берестовой, А. М. Стратегия логистики транспорта затвердевающих жидкостей / А. М. Берестовой, А. Д. Омельченко, А. Н. Гавва // Упаковка. – Киев, 2005. – № 1. – С. 52–65.

34. Бойко, Е. Е. Разработка методических основ сжигания тонкодисперсных водоугольных суспензий при плазменном сопровождении в котлоагрегатах ТЭС : дис. ... канд. техн. наук : 05.14.14 / Бойко Екатерина Евгеньевна ; [Новосиб. гос. техн. ун-т]. – Новосибирск, 2018. – 162 с. : ил.

35. Борзов, А. И. Влияние температуры на эксплуатационные параметры водоугольных суспензий из бурых углей / А. И. Борзов, М.П. Баранова // Химия – XXI век: Новые технологии, новые продукты : тр. IX Междунар. науч.-практ. конф. – Кемерово, 2006. – С. 297–299.

36. Брагин, Б. Ф. Трубопроводный гидротранспорт твёрдых материалов / Б. Ф. Брагин, Г. Н. Делягин, Ф. Д. Маркунтович. – К. : ИСИО, 1993. – 327 с.

37. Брагін, Б. Ф. Пульпи та суспензії (технології, устаткування, розрахунки) : [навч. посіб.] / Б. Ф. Брагін, О. С. Коломієць. – К. : ІСДО, 1995. – 464 с.

38. Бруер, Г. Г. Исследование процесса получения высококонцентрированной водоугольной суспензии из смеси кузнецкого каменного и канско-ачинского бурого угля / Г. Г. Бруер, С. М. Колесников, Л. В. Лазарева // Химия твердого топлива. – 1995. – № 5. – С. 18–22.

39. Варакута, Є. О. Підвищення терміну служби запірної арматури промислового трубопроводного гідротранспорту удосконаленням характеристик робочого процесу : дис. ... канд. техн. наук. : 05.22.12 / Варакута Євген Олександрович ; Східноукр. Нац. ун-т ім. Володимира Даля. – Луганськ, 2007. – 209 с.

40. Вершинин, Ю. Н. Электронно-тепловые и детонационные процессы при электрическом пробое твердых диэлектриков / Ю. Н. Вершинин. – Екатеринбург : УрОРАН, 2000. – 258 с.

41. Вершинина, К. Ю. Низкотемпературное зажигание отходов переработки угля в виде органоводоугольных топливных композиций : дис. ...

канд. физ.-мат. наук : 01.04.17 / Вершинина Ксения Юрьевна. – Томск, 2016. – 191 с.

42. Влияние компонентов минеральной части угля на реологические свойства водоугольных суспензий / В. Г. Трофимова [и др.] // Вопросы определения технологических параметров линейной части гидротранспортных систем : сб. науч. тр. НПО "Гидротрубопровод". – М., 1989. – С. 20–26.

43. Влияние состава твердой фазы на свойства водоугольных топливных суспензий / М. П. Баранова // Энергетическая безопасность России. Новые подходы к развитию угольной промышленности : тр. XI Междунар. науч.-практ. конф. – Кемерово, 2009. – С. 76–78.

44. Водные дисперсные системы на основе бурых углей как энергетическое и технологическое топливо / Г. Н. Делягин, А. П. Петраков, Г.С. Головин, Е. Г. Горлов // Рос. хим. журн. – 1997. – № 6. – С. 72–77.

45. Водоугольные суспензии в теплоэнергетике / А. П. Бурдуков, В.И. Попов, В. Д. Федосенко, В. Г. Томилов // Труды семинара вузов Сибири и Дальнего Востока по теплофизике и теплоэнергетике : сб. науч. тр. – Новосибирск, 2000. – С. 111–123.

46. ВУТ – это просто и практично / В. И. Мурко, В. И. Федяев, А.П. Стариков и др. // Сибир. уголь. – 2008. – № 1. – С. 231–243.

47. Высококонцентрированные водоугольные суспензии – новый вид композиционного экологически чистого жидкого топлива / Е. В. Титов, С.Л. Хилько, Ю. Г. Свитлый [и др.] // Технологические исследования: состояние и перспективы : сб. науч. работ народ. науч.-практ. конф. – Иваново-Франковск, 1995. – С. 125–127.

48. Гаврилова, Н. Н. Микроскопические методы определения размеров частиц дисперсных материалов : учеб. пособие / Н. Н. Гаврилова, В.В. Назаров, О. В. Яровая. – М. : РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2012. – 52 с.

49. Газогенераторные технологии в энергетике / под ред. А.Ф. Рыжкова. – Екатеринбург : Сократ, 2010. – 610 с.

50. Галькеева, А. А. Анализ применения углей различных марок для

производства энергии и химических продуктов / А. А. Галькеева, Г.Р. Мингалеева // Изв. высш. учеб. заведений. Проблемы энергетики. – 2015. – № 11–12. – С. 69–79.

51. Галькеева, А. А. Термодинамические характеристики термического разложения коксового остатка при газификации / А. А. Галькеева, Г.Р. Мингалеева // Химия в интересах устойчивого развития. – 2015. – № 24. – С. 1–6.

52. Гетманова, Е. А. Visual Python – язык для моделирования физических явлений / Е. А. Гетманова // Компьютерные инструменты в образовании. – 2005. – № 5. – С. 43–47.

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

54. Глушков, Д. О. Органоводоугольное топливо: проблемы и достижения : (обзор) / Д. О. Глушков, П. А. Стрижак, М. Ю. Чернецкий // Теплоэнергетика. – 2016. – № 10. – С. 31–41.

55. Гориславец, В. М. Исследование реологических свойств концентрированных суспензий при наличии пристенного эффекта / В.М. Гориславец, А. К. Дунец // Инженерно-физический журн. – 1975. – Т. 29, № 2. – С. 46–58.

56. Гречаный, А. Н. О развитии и применении водоугольных технологий в топливно-энергетическом комплексе Украины / А. Н. Гречаный, В. В. Литовкин, Ю. Г. Свитлый // Энергетика и электрификация. – 1996. – № 4. – С. 9–12.

57. Губин, В. Е. Трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов / В. Е. Губин, В. В. Губин. – М. : Недра, 1982. – 296 с.

58. Гутько, Ю. И. Выбор рациональных диапазонов изменения параметров высококонцентрированной водоугольной суспензии при моделировании ее поведения / Ю. И. Гутько, Д. А. Капустин, А. В. Кущенко // Вестн. Луган. гос. ун-та им. Владимира Даля. – Луганск, 2021. – № 1 (41). –

С. 58–63.

59. Гутько, Ю. И. Современные тенденции совершенствования технологии водоугольного топлива (суспензий) / Ю. И. Гутько, Д. А. Капустин, А. В. Кущенко // Вестн. Луган. гос. ун-та им. Владимира Даля. – Луганск, 2022. – № 12 (41). – С. 58–63.

60. Делягин Г. Н. Разработка метода оптимизации теплотехнических характеристик водоугольного топлива «ЭКОВУТ» на основе управления гранулометрическим составом твердой фазы / Г. Н. Делягин, С. Ф. Ерохин // Химия на рубеже тысячелетий : сб. тр. междунар. науч. конф. и шк. семинара ЮНЕСКО, Клязьма 2000. – М., 2000. – Ч.1. – С. 118–119.

61. Делягин, Г. Н. Использование обводненных твердых топлив в виде ТВУС / Г. Н. Делягин, Б. В. Канторович // Теория и технология процессов переработки топлив. – М., 1966. – С. 124–151.

62. Делягин, Г. Н. Теплогенерирующие установки : учеб. для вузов / Г.Н. Делягин, В. И. Лебедев, Б. А. Пермяков. – М. : Стройиздат, 1986. – 559 с.

63. Делягин, Г. Н. Эковут – новое экологически чистое топливо нового поколения / Г. Н. Делягин, А. П. Петраков, С. Ф. Ерохин // Новые технологии сжигания твердого топлива: их текущее состояние и использование в будущем : Всерос. науч.-техн. семинар. – М., 2001. – С. 99–100.

64. Демонстрационная установка приготовления и сжигания водоугольного топлива / В. И. Мурко, В. И. Федяев, С. А. Бровченко, Д.А. Дзюба // Уголь. – 2003. – № 6. – С. 53–54.

65. Дерягин, Б. В. Теория устойчивости коллоидов и тонких пленок / Б.В. Дерягин. – М. : Наука, 1986. – 206 с.

66. Джваршеишвили, А. Г. Системы трубопроводного транспорта горно-обогажительных компаний / А. Г. Джваршеишвили. – М. : Недра, 1981. – 384 с.

67. Дмитриева, Л. А. Исследование процесса измельчения хрупких материалов : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.13 / Дмитриева Любовь Анатольевна ; Гос. образоват. учреждение высш. проф. образования

«Ивановский государственный архитектурно-строительный университет». – Иваново, 2006. – 165 с.

68. Довгялло, А. И. Исследование и оценка энергетической эффективности производственного оборудования : учеб. пособие / А.И. Довгялло, Д. А. Угланов. – Самара : Изд- во Самар. гос. аэрокосм, ун-та, 2008. – 56 с.

69. Долгих, Т. Ф. Язык Python 3 для научных исследований (для направлений подготовки 01.03.01 «Математика», 01.03.02 «Прикладная математика и информатика», 01.03.03 «Механика и математическое моделирование», 02.03.02 «Фундаментальная информатика и информационные технологии») / Т. Ф. Долгих, Е. В. Ширяева. – Ростов н/Д : б. и., 2017. – 90 с.

70. Должников, П. Н. Физика движения вязкопластичных тампонажных растворов : монография / П. Н. Должников, А. Э. Кипко. – Донецк : Вебер (Донец. отд-ние), 2007. – 237 с.

71. Дроздник, И. Д. Новые направления использования углей / И.Д. Дроздник, Ю. С. Кафтан, Ю. Б. Должанская // Кокс и химия. – 1999. – № 1. – С. 4–16.

72. Дунаевская, Н. И. Отходы угля Обзор ресурсов и возможности использования / Н. И. Дунаевская, А. И. Росколупа, Н. В. Чернявский // Member State Technologies dedicated to Help the Energy Self Sufficiency Process optimising the local Resources such as Coal : Seminar. – К, 1997. – Р. 9.

73. Елишевич, А. Т. Новые методы обогащения и обезвоживания низкосортных углей / А. Т. Елишевич, В. С. Белецкий, П. В. Сергеев // Пути переработки углей Украины : сб. науч. тр. – Киев, 1988. – С. 125–140.

74. Ефремов, И. Ф. Периодические коллоидные структуры / И.Ф. Ефремов. – Л. : Химия, 1971. – 192 с.

75. Зайденварг, В. Е. Водугольное топливо, трубопроводное транспортирование и сжигание на теплоэлектростанциях / В. Е. Зайденварг, А.С. Кондратьев, В. И. Мурко // Уголь. – М., 2019. – № 8. – С. 76–80.

76. Идельчик, И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям /

И. Е. Идельчик. – М. : Рипол Классик, 2013. – 468 с.

77. Измалков, А. В. Экологически чистые технологии использования угля / А. В. Измалков // Уголь. – 2004. – № 9. – С. 46–53.

78. Изменение реологических свойств в зависимости от добавок ПАВ различной природы / В. Беденко, Б. Чистяков, В. Миньков [и др.] // Методы регулирования структурно-реологических свойств и коррозионной активности высококонцентрированных дисперсных систем : сб. науч. тр. НПО «Гидротрубопровод». – М., 1987. – С. 15–22.

79. Изменение реологических свойств водоугольной суспензии в зависимости от добавок ПАВ различной природы / В. Г. Беденко, Б.Е. Чистяков, В. А. Миньков, Т. С. Губанова // Методы регулирования структурно-реологических свойств и коррозионной активности высококонцентрированных дисперсных систем : тр. ин-та «ВНИИПИГидротрубопровод». – М., 1987. – С. 15–22.

80. Интенсификация процесса горения ТВУС с помощью присадок / В.И. Бабий, Н. И. Кузина, В. С. Вдовченко и др. // Электрические станции. – 1991. – № 11. – С. 6–8.

81. Использование бурого угля в теплоэнергетике. Стабилизационный потенциал использования угля в электроэнергетике Украины / Ф. А. Папаяни, В. Г. Самойлик, Ю. Г. Свитлый [и др.] // Тр. науч.-метод. семинара. – К., 1997. – С. 15–19.

82. Использование водоугольного топлива в тепловых процессах АПК / В. Н. Делягин, Н. М. Иванов, В. Я. Батищев и др. // Ползуновский вестн. – 2011. – № 2–1. – С. 239–242.

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

84. Исследование реодинамики и горения композиционных водоугольных суспензий / А. П. Бурдуков, А. А. Емельянов, В. И. Попов,

С.Н. Тарасенко // Теплоэнергетика. – 1997. – Вып. 6. – С. 62–64.

85. Капустин, В. И. Стандартизация радиографического метода контроля / В. И. Капустин // Стандарты и качество. – 2002. – № 2. – С. 27–29.

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

87. Капустин, Д. А. Исследование влияния пластификаторов на реологические свойства ТВУС (ВУТ) / Д. А. Капустин // Вестн. Луган. гос. ун-та им. Владимира Даля. – Луганск, 2021. – № 11 (53). – С. 58–63.

88. Капустин, Д. А. Методика расчета основных показателей работы трубопроводных технологических систем для ВУТ (ТВУС) / Д. А. Капустин, М. А. Сосновский, А. А. Тивоненко // Вестн. Луган. гос. пед. ун-та. Сер. 5, Гуманитарные науки. Технические науки. – Луганск, 2022. – № 9 (41). – С. 58–63.

89. Капустин, Д. А. Моделирование течения высококонцентрированных водоугольных суспензий в фасонных элементах трубопроводов / Д. А. Капустин // Вестн. Луган. гос. ун-та им. Владимира Даля. – Луганск, 2021. – № 9 (51). – С. 123–133.

90. Капустин, Д. А. Оценка степени измельчения угольных частиц ВУТ в процессе транспортирования по трубопроводу / Д. А. Капустин // Вестн. Луган. гос. ун-та им. Владимира Даля. – Луганск, 2022. – № 4 (58). – С. 195–199.

91. Капустин, Д. А. Повышение эффективности работы форсунок совершенствованием их проточной части / Д. А. Капустин, П. Н. Гавриленко // Вестн. Луган. гос. пед. ун-та. Сер. 5, Гуманитарные науки. Технические науки. – Луганск, 2022. – № 4 (69). – С. 85–92.

92. Капустин, Д. А. Полуэмпирическая модель течения неньютоновских дисперсных жидкостей / Д. А. Капустин, Ю. И. Гутько, А.В. Кущенко // Вестн. Луган. гос. ун-та им. Владимира Даля. – Луганск, 2021. – № 7 (49). – С. 28–32.

93. Капустин, Д. А. Развитие теоретических основ движения высококонцентрированной суспензии / Д. А. Капустин, Ю. И. Гутько, А.В. Кущенко // Вестн. Луган. гос. ун-та им. Владимира Даля. – Луганск, 2022. – № 8 (62). – С. 145–151.

94. 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 Книга, 2022. – №4 (95). – С. 58-63.

95. Капустин, Д. А. Результаты планированного эксперимента по определению реологических характеристик высококонцентрированной водоугольной суспензии / Д. А. Капустин, А. В. Кущенко // Вестн. Донец. нац. техн. ун-та. – Донецк, 2021. – № 4 (26). – С. 55–62.

96. Капустин, Д. А. Реологические исследования водоугольных суспензий на основе каменных углей / Д. А. Капустин, А. В. Кущенко // Вестн. Донбас. гос. техн. ин-та. – Алчевск, 2021. – № 24 (67). – С. 33–39.

97. Капустин, Д. А. Совершенствование стенда для исследования характеристик движения водоугольных суспензий высокой концентрации / Д.А. Капустин, Ю. И. Гутько, А. В. Кущенко // Вестн. Луган. гос. ун-та им. Владимира Даля. – Луганск, 2020. – № 8 (38). – С. 215–220.

98. Капустин, Д. А. Современный метод расчета внутритрубного течения концентрированных водоугольных суспензий / Д. А. Капустин, Ю.И. Гутько, А. В. Кущенко // Вестн. Луган. гос. ун-та им. Владимира Даля. – Луганск, 2021. – № 3 (45). – С. 104–108.

99. Карпенюк, В. И. Совершенствование технологии сжигания водоугольного топлива в теплогенераторах малой и средней мощности : дис. ... канд. техн. наук : 05.14.04 / Карпенюк Виктор Иванович ; Сибир. федер. ун-та. – Красноярск, 2022. – 166 с.

100. Карпов, Е. В. Водоугольное топливо – технология будущего [Электронный ресурс] / Е. В. Карпов // Энергетика и промышленность России.

– 2007. – № 5 (81). – Режим доступа: <https://www.eprussia.ru/epr/81/5751.htm>. –

Загл. с экрана. – Дата обращения: 16.11.21

101. Кейко, А. В. Перспективные режимы газификации низкосортного твердого топлива / А. В. Кейко, И. А. Ширкалин, Д. А. Свищев // Изв. РАН. Энергетика. – 2006. – № 3. – С. 55–63.

102. Клейн, М. С. Эффективная технология извлечения мелкого угля из техногенных вод углеобогатительных фабрик / М. С. Клейн // Вест. Кузбас. гос. техн. ун-та. – Кемерово, 2005. – № 2. – С. 117–119.

103. Клейн, М. С. Эффективное природопользование и природоохранные технологии углепереработки / М. С. Клейн, Т. Е. Алешкина // Энергетика: экология, надежность, безопасность : материалы XI Всерос. науч.-практ. конф., 7–9 дек. 2005 г. – Томск, 2005. – С. 302–304.

104. Коваленко, А. А. Основы научных исследований (планирование экспериментов) : монография / А. А. Коваленко, А. С. Роговой, Д. А. Сёмин. – Луганск : изд-во ВНУ им. В. Даля, 2010. – 210 с.

105. Козыряцкий, Л. Н. Добыча твёрдого топлива из шламонакопителей Донбасса / Л. Н. Козыряцкий, Ю. Г. Свитлый, А. П. Кононенко // Сб. науч. работ Восточноукр. гос. ун-та. – Луганск, 1999. – Вып. 16. – С. 155–160.

106. Колесниченко, В. И. Введение в механику несжимаемой жидкости : учеб. пособие / В. И. Колесниченко, А. Н. Шарифулин. – Пермь : Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2019. – 127 с.

107. Колодежнов, В. Н. Результаты моделирования диссипативного разогрева в цилиндрическом канале для жидкости с эффектом «отвердевания» при реализации третьей схемы течения / В. Н. Колодежнов, А. С. Веретенников // Фундамент. исслед. – 2014. – № 9. – С. 1446–1451.

108. Кондратьев, А. С. Об одной феноменологической модели эффективной вязкости гидросмесей / А. С. Кондратьев, Т. А. Седова // Вопросы определения технологических параметров линейной части гидротранспортных систем : тр. НПО «Гидротрубопровод». – М., 1989. – С. 114–122.

109. Кондратьев, А. С. Рациональное водоугольное топливо и

возможные технологические схемы его получения / А. С. Кондратьев // Проблемы аксиоматики в гидрогазодинамике : сб. ст. – М., 1996. – № 3. – С. 63–78.

110. Корочкин, Г. К. Физико-химические основы интенсификации технологии приготовления высококонцентрированных водоугольных суспензий из углей Кузбасса : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.17.07 / Корочкин Геннадий Капитонович ; М-во топлива и энергетики Рос. Федерации ; Ин-т горючих ископаемых. – М., 1998. – 23 с.

111. Костовецкий, С. П. Некоторые результаты исследований процессов приготовления, транспортирования и прямого сжигания водоугольной суспензии / С. П. Костовецкий, В. И. Мурко, Е. П. Олофинский // Вопросы определения технологических параметров линейной части гидротранспортных систем : сб. науч. тр. НПО "Гидротрубопровод". – М., 1989. – С. 4–10.

112. Крапчин, И. П. Перспективы производства синтетического жидкого топлива из углей / И. П. Крапчин, Е. Ю. Потапенко // Химия твердого топлива. – 2004. – № 5. – С. 59–65.

113. Крапчин, И. П. Экономическая эффективность приготовления и использования водоугольных суспензий-экологически чистого топлива для электростанций / И. П. Крапчин, И. О. Потапенко // Уголь. – 2003. – № 11. – С. 50–52.

114. Криль, С. И. Напорные взвесенесущие потоки / С. И. Криль ; АН УССР, Ин-т гидромеханики. – Киев : Наук. думка, 1990. – 158,[2] с. : ил.

115. Круть А. А. Высокосольные угольные шламы – дополнительный источник энергоносителей / А. А. Круть // Сб. науч. работ Донецк. науч.-техн. ун-та. Сер. Электротехника и энергетика. – 2001. – № 21. – С. 34–37.

116. Круть, А. А. Водоугольное топливо – альтернатива природному газу и жидким нефтепродуктам / А. А. Круть // Геотехническая механика : сб. науч. тр. – Днепропетровск, 2009. – С. 269–274.

117. Круть, А. А. Водоугольное топливо на основе низкорреакционных углей / А. А. Круть, Ф. А. Папаяни, Ю. Ф. Власов // Проблемы и пути

совершенствования угольной теплоэнергетики : сборник. – К., 2001. – С. 50–57.

118. Круть, А. А. Водоугольное топливо на основе угольных шламов / А. А. Круть, Л. Н. Козыряцкий // Сб. тр. Донец. нац. техн. ун-та. Сер. Горно-электромеханическая. – 2009. – Вып. 17 (157). – С. 185–194.

119. Круть, А. А. Водоугольное топливо с угольной пылью – заменитель мазута и природного газа / А. А. Круть, Ф. А. Папаяни, Л. Н. Козыряцкий // Сб. тр. Донец. нац. техн. ун-та. Сер. горно-электромеханическая. – Донецк, 2011. – Вып. 21 (189). – С. 96–104.

120. Круть, А. А. Особенности и пути использования водоугольного топлива на основе антрацитов / А. А. Круть // Новое в технологии, технике и переработке минерального сырья. – Кривой Рог, 2006. – С. 147–155.

121. Круть, А. А. Повышение концентрации водоугольного топлива при уменьшении энергоемкости изготовления / А. А. Круть, Ф. А. Папаяни, Л.Н. Козыряцкий // Сб. науч. работ Донецк. науч.-техн. ун-та. Сер. Горно-электромеханическая. – 2005. – Вып. 101. – С. 154–161.

122. Круть, А. А. Повышение энергетического потенциала водоугольного топлива за счет рационального выбора пластифицирующих химических добавок / А. А. Круть, Ф. А. Папаяни // Вестн. Восточноукр. нац. ун-та. – Луганск, 2000. – С. 113–125.

123. Круть, А. А. Развитие физико-технических основ технологий приготовления и гидротранспортирования водоугольных суспензий высокой концентрации : дис. ... д-ра техн. наук : 05.15.09 / Круть Александр Анатольевич. – Днепропетровск, 2011. – 279 с.

124. Круть, А. А. Современное состояние исследования проблемы создания и использования водоугольного топлива / А. А. Круть, Ю.Г. Свитлый, В. С. Белецкий // Форум горняков : материалы междунар. конф. – Днепропетровск, 2010. – Т. 2. – С. 173–177.

125. Круть, А. А. Технология приготовления высококонцентрированной водоугольной суспензии / А. А. Круть // Уголь Украины. – 2001. – № 4. – С. 59–63.

126. Круть, А. А. Экологические преимущества водоугольного топлива / А. А. Круть // Геотехническая механика : сб. науч. тр. – Днепропетровск, 2008. – С. 155–162.

127. Кузнецов, Б. Н. Влияние температуры на реологические характеристики водоугольных суспензий из бурых углей / М. Л. Щипко, Б.Н. Кузнецов, М. П. Баранова // Вестн. Красноярск. гос. ун-та. – Красноярск, 2005. – Вып. 2. – С. 100–103.

128. Кулагин, В. А. Методы и средства технологической обработки многокомпонентных сред с использованием эффектов кавитации : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 01.04.14 ; 01.02.05 / Кулагин Владимир Алексеевич ; Краснояр. гос. техн. ун-т. – Красноярск, 2004. – 47 с.

129. Курашев, В. Д. Актуальные проблемы научно-технического развития топливно-энергетического комплекса / В. Д. Курашев // Рос. хим. журн. – 1997. – № 6. – С. 12–14.

130. Кухаренко, Т. А. Окисленные в пластах бурые и каменные угли / Т.А. Кухаренко. – М. : Недра, 1972. – 320 с.

131. Лебедев, С. В. Численное моделирование процесса сжигания водоугольного топлива на основе угольных шламов / С. В. Лебедев, М.П. Баранова, В. А. Кулагин // Современная наука: идеи, исследования, результаты, технологии. – Киев, 2012. – № 1 (6). – С. 24–27.

132. Левич, В. Г. Физико-химическая гидродинамика / В. Г. Левич. – М. : Гос. изд-во физико-матем. лит., 1959. – 700 с.

133. Ленич, С. В. Совершенствование транспортной системы пылеприготовления путем измельчения угля при пневмотранспортировании : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.01 / Ленич Сергей Васильевич ; Гос. образоват. учреждение высш. образования ЛНР "Луганский государственный университет имени Владимира Даля". – Луганск, 2021. – 153 с.

134. Листратов, И. В. Опыт создания и эксплуатации промышленной установки по приготовлению водоугольного топлива и его сжиганию в топке кипящего слоя / И. В. Листратов, Ю. А. Ильин // Горение твердого топлива :

сб. докл. VI Всерос. конф. – Томск, 2006. – С. 107–114.

135. Лобов, Н. И. Численные методы решения задач теории гидродинамической устойчивости : учеб. пособие / Н. И. Лобов, Д.В. Любимов, Т. П. Любимова. – Пермь : Изд-во Перм. ун-та, 2004. – 101 с.

136. Лойцянский, Л. Г. Механика жидкости и газа : учеб. для вузов / Л.Г. Лойцянский. – 7-е изд., испр. – М. : Дрофа, 2003. – 840 с.

137. Луговицкая, Т. Н. Водные растворы лигносульфонатов, додецилсульфата натрия и их бинарные смеси: коллоидно-химические аспекты / Т. Н. Луговицкая // Актуальные проблемы науки и образования в области естественных и сельскохозяйственных наук : материалы VI междунар. научно-практ. конф. – Петропавловск, 2018. – С. 183–189.

138. Лужковой, Д. С. Перспективы применения парогазовых установок на базе газификации угля / Д. С. Лужковой // Ресурсоэффективным технологиям – энергию и энтузиазм молодых : сб. науч. тр. VI Всерос. конф. – Томск, 2015. – С. 108–119.

139. Львовский, Е. Н. Статистические методы построения эмпирических формул / Е. Н. Львовский. – М. : Высш. шк., 1988. – 239 с.

140. Мазо, А. Б. Гидродинамика : учеб. пособие для студентов немет. факультетов / А. Б. Мазо, К. А. Поташев. – 2-е изд. – Казань : Казан. ун-т, 2013. – 128 с.

141. Майстренко, О. Ю. Розроблення методів спалювання та газифікації низькоякісного вугілля з урахуванням сучасних екологічних вимог / О.Ю. Майстренко // Энергетика и электрификация. – 1997. – № 5. – С. 21–25.

142. Малкин, А. Я. Реология: концепции, методы, приложения : пер. с англ. / А. Я. Малкин, А. И. Исаев. – СПб. : Профессия, 2007. – 560 с.

143. Мастепанов, А. М. Ситуация на мировом нефтяном рынке: некоторые оценки и прогнозы / А. М. Мастепанов // Энергетическая политика. – 2016. – № 2. – С. 7–20.

144. Матвеевко, В. Н. Вязкоупругость и структура дисперсных систем / В. Н. Матвеевко, Е. А. Кирсанов // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 2, Химия. – 2011. –

Т. 52, № 4. – С. 243–276.

145. Матвеевко, В. Н. Структурное обоснование неньютоновского течения / В. Н. Матвеевко, Е. А. Кирсанов // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 2, Химия. – 2017. – Т. 58, № 2. – С. 59–82.

146. Монтгомери, Д. К. Планирование эксперимента и анализ данных : [пер с англ.] / Д. К. Монтгомери. – Л. : Судостроение, 1980. – 384 с.

147. Морозов, А. Г. ВУТ в теплоэнергетике / А. Г. Морозов, С.И. Мосин, В. И. Мурко // Энергия: экономика, техника, экология. – 2007. – № 4. – С. 10–12.

148. Морозов, А. Г. Российский опыт внедрения промышленной технологии производства водоугольного топлива / А. Г. Морозов, С. И. Мосин, Г. Н. Делягин // Новости Теплоснабжения. – 2008. – № 9. – С. 5–8.

149. Мурко, В. И. Влияние реагентов-пластификаторов на реологические свойства водоугольного топлива / В. И. Мурко // Химия твердого топлива. – 2001. – № 2. – С. 62–72.

150. Мурко, В. И. Водоугольное топливо / В. И. Мурко, В. И. Федяев, Д.А. Дзюба // Уголь. – 2002. – № 6. – С. 58–59.

151. Мурко, В. И. Выбор углей для приготовления водоугольных суспензий и закономерности формирования их структурно-реологических характеристик / В. И. Мурко, А. Н. Заостровский // Вестн. Кузбас. гос. техн. ун-та. – Кемерово, 2001. – № 5. – С. 49–57.

152. Мурко, В. И. Научные основы процессов получения и эффективного применения водоугольных суспензий : дис. ... д-ра техн. наук : 05.17.07 / Мурко Василий Иванович. – Новокузнецк, 1999. – 289 с. : ил.

153. Мурко, В. И. Результаты исследований по приготовлению и сжиганию суспензионного угольного топлива из антрацитовых углей Вьетнама / В. И. Мурко, В. И. Федяев, Фунг Мань Дак // Уголь. – 2007. – № 10. – С. 59–60.

154. Мурко, В. И. Технологические решения процессов получения и сжигания топливных водоугольных суспензий / В. И. Мурко, М. П. Баранова //

Инновационные технологии в науке и образовании : тр. III Междунар. науч.-практ. конф. – Улан-удэ, 2013. – С. 99–102.

155. Мурко, В. И. Технология получения и сжигания топливных водоугольных суспензий из низкометаморфизованных монгольских углей / В.И. Мурко, И. М. Засыпкин, М. П. Баранова // Взаимодействие высококонцентрированных потоков энергии с материалами в перспективных технологиях и медицине : материалы IV Всерос. науч.-практ. конф. – Новосибирск, 2011. – С. 215–219.

156. Мурко, В. И. Физико-технические основы водоугольного топлива / В. И. Мурко, В. И. Федяев, В. А. Хямяляйнен ; Рос. акад. естеств. наук ; Кузбас. гос. техн. ун-т. – Кемерово : Кузбассвуиздат, 2009. – 195 с.

157. Некоторые особенности реологии высококонцентрированных водоугольных суспензий / И. Н. Башкатова, Ю. Ф. Власов, В. В. Филатов, Н. Б. Чернецкая // Вісн. Східноукр. Держ. ун-ту. – Луганськ, 2001. – № 1 (23). – С. 139–144.

158. Ницкевич, Е. А. Сжигание отходов обогащения в котельных установках / Е. А. Ницкевич, Н. В. Мишин. – М. : Углетехиздат, 1973. – 154 с.

159. Новик, Ф. С. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов / Ф. С. Новик, Я. Б. Арсов. – М. : Машиностроение : София : Техника, 1980. – 304 с.

160. О корреляции реологических характеристик суспензий, определяемых на трубчатом и ротационном вискозиметрах / С. Ф. Ерохин, И.В. Ипатова, Е. Л. Кулинич, И. А. Чиненков // Сб. науч. тр. ВНИИПИ гидротрубопровод. – М., 1985. – С. 35–42.

161. Обоснование параметров и режимов работы гидротранспортных систем горных предприятий / Ю. Д. Баранов, Б. А. Блюсс, Е. В. Семенов, В.Д. Шурыгин. – Днепропетровск : Новая идеология, 2006. – 416 с.

162. Овчинников, Ю. В. Технология получения и исследования тонкодисперсных водоугольных суспензий : монография / Ю. Б. Овчинников, Е. Е. Бойко. – Новосибирск : НГТУ, 2017. – 308 с.

163. Огурцов, А. В. Применение однородных цепей Маркова для моделирования истирания частиц в кипящем слое / А. В. Огурцов // *Фундаментальные науки – специалисту нового века : тез. докл. V Регион. конф.*, 27–29 апр. 2004 г. – Иваново, 2004. – С. 124–125.

164. Олофинский, Е. П. Вопросы использования водоугольного топлива на тепловых электростанциях / Е. П. Олофинский // *Теплоэнергетика*. – 1989. – № 12. – С. 64–66.

165. Определение факторов транспортируемой среды (водоугольного топлива) влияющих на точность показаний измерительных устройств / Д.А. Капустин, А. В. Кущенко, В. В. Швыров, Р. Н. Сентяй // *Вестн. Луган. гос. ун-та им. Владимира Даля*. – Луганск, 2018. – № 11 (17). – С. 62–69.

166. Опыт создания экологически чистых угольных технологий // *Менеджмент в области экологически чистых угольных технологий / под общ. ред. М. Г. Беренгартена и А. Г. Евстафьева : материалы 1 и 2 Междунар. летних школ*. – М., 1998. – С. 17-22.

167. Опыт создания экологически чистых угольных технологий: по материалам 1-ой и 2-ой международных летних школ «Менеджмент в области экологически чистых угольных технологий» / под общ. ред. М. Г. Беренгартена и А. Т. Евстафьева. – М. : Кафедра ЮНЕСКО МГУИЭ, 1998. – 170 с.

168. Осинцев, К. В. Исследование факельного сжигания водоугольных суспензий в топках энергетических котлов / К. В. Осинцев // *Теплоэнергетика*. – 2012. – № 6. – С. 21–27.

169. Основы научных исследований / И. М. Глущенко, А. Е. Пинскер, О.И. Полянчиков, А. И. Трикило. – К. : Высш. шк., 1983. – 158 с.

170. Оценка объема отходов обогащения угля, требующих утилизации / Д. А. Капустин, Ю. И. Гутько, М. В. Орешкин, Р. Н. Сентяй // *Вестн. Луган. гос. ун-та им. Владимира Даля*. – Луганск, 2020. – № 7 (37). – С. 202–207.

171. Папин, А. В. Разработка технологического процесса утилизации угольных шламов Кузнецкого бассейна в виде высококонцентрированных водоугольных суспензий : дис. ... канд. техн. наук : 05.17.08 / Папин Андрей

Владимирович ; Томск. политехн. ун-т. – Кемерово, 2004. – 167 с.

172. 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.

173. 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.

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

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

176. 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., Кущенко О.В., Коваленко А.О., Шворнікова Г.М., Капустін Д.О., Баранов І.О. ; заявник Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля. – 5 с.

177. 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., Капустін Д.О., Баранов І.О., Крайнюк А.О. ; заявник Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля. – 3 с.

178. Перепелиця, В. Г. Екологічний аспект технології водовугільного палива / В. Г. Перепелиця, О. А. Круть // Геотехническая механика : сб. науч. тр. – Днепропетровск, 2007. – Вып. 73. – С. 124–131.

179. Пілавов, М. В. Підвищення ефективності промислових гідротранспортних систем на основі розвитку методів розрахунку їх характеристик : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.22.12 / Пілавов Маноліс Васильович ; Східноукр. нац. ун-т ім. Володимира Даля. – Луганськ, 2013. – 22 с.

180. Повх, И. Л. Аэродинамический эксперимент в машиностроении / Повх И. Л. – [Изд-е 3-е доп. и исправл.]. – Л. : Машиностроение, 1974. – 480 с.

181. Поздняков, С. С. Обогащительный комплекс с применением струйной противоточной мельницы для сухого обогащения / С. С. Поздняков, В. А. Уваров, Д. В. Карпачев // IV Конгресс обогатителей стран СНГ : материалы конгр. – М., 2003. – Т. II. – С. 36-41.

182. Покровская В. Н. Трубопроводный транспорт в горной промышленности / В. Н. Покровская. – М. : Недра, 1985. – 192 с.

183. Получение наноразмерных металлов электрическим разрядом в жидкости / А. В. Артёмов, В. А. Жильцов, Ю. А. Крутяков и др. // Вопр. атомной науки и техники. Сер. Плазменная электроника и новые методы ускорения. – Курчатов, 2008. – № 4. – С. 150–154.

184. Поспелова, К. А. Конспект общего курса коллоидной химии по лекциям академика П. А. Ребиндера / К. А. Поспелова. – М. : МГУ, 1949. – 36 с.

185. Проблемы внедрения водоугольного топлива в России / К.Трубецкой, В. Моисеев, В. Дегтярев и др. // Промышленные ведомости. – 2004. – № 11–12 (88–89). – С. 24-33.

186. Производство и использование водоугольного топлива / В. Е. Зайденварг, К. Н. Трубецкой, В. И. Мурко, И. Х. Нехороший. – М. : Изд-во Акад. гор. наук, 2001. – 176 с.

187. Пространственное распределение диспергированной фазы в полости факела распыла механической форсунки / Ю. Г. Звездин, Н.Н. Симаков, Б. Н. Басаргин и др. // Известия вузов. Химия и хим.

технология. – 1987. – Т. 30, № 5. – С. 110–113.

188. Рабинович, Е. З. Гидравлика : учеб. пособие для вузов / Е.З. Рабинович. – М. : Недра, 1990. – 278 с.

189. Разработка технологии комплексного использования побочных продуктов обогащения угля / В. И. Мурко, В. И. Карпенко, Т. П. Белогурова, И. А. Миханошина // Уголь. – 2017. – № 4 (1093). – 54–59.

190. Расчет вязкости водоугольного топлива / А. А. Коваленко, Л.И. Рисухин, А. М. Шворникова, Е. С. Гусенцова // Вісн. Східноукр. нац. ун-ту ім. В. Даля. – 2009. – № 3. – С. 157-165.

191. Рафалес-Ламарка, Э. Э. Инструкция по планированию эксперимента / Э. Э. Рафалес-Ламарка. – Луганск : УКРНИИУглеобогащение, 1969. – 120 с.

192. Рациональный выбор оборудования и проектирование промышленных гидротранспортных систем : монография / Л. И. Рисухин, Н.Б. Чернецкая, А. А. Коваленко, А. М. Шворникова, Д. А. Капустин. – Луганск : Изд-во ВНУ им. В. Даля, 2010. – 92 с.

193. Ребиндер, П. А. Избранные труды / П. А. Ребиндер. – М. : Наука, 1979. – 579 с.

194. Ребиндер, П. А. Физико-химическая механика дисперсных структур / П. А. Ребиндер. – М. : Наука, 1966. – С. 3–46.

195. Рего, К. Г. Метрологическая обработка результатов технических измерений : справ. пособие / К. Г. Рего. – К. : Техника, 1987. – 128 с.

196. Результаты испытаний топливной присадки на котле со слоевым сжиганием угля / Мурко В. И., Карпенко В. И., Федяев В. И. и др. // Журн. Сибир. федер. ун-та. Техника и технологии. – 2017. – 10 (8). – С. 993–999.

197. Реологические характеристики высококонцентрированных водоугольных суспензий в условиях нестационарного потока / Н. Б. Урьев, В.И. Тараканов, И. А. Богонин [и др.] // Методы регулирования структурно-реологических свойств и коррозионной активности высококонцентрированных дисперсных систем : сб. науч. тр. НПО «Гидротрубопровод». – М., 1987. – С. 3–7.

198. Решетняк, А. А. Структурные сдвиги и прогнозная оценка топливной базы ТЭС Минэнерго Украины. Стабилизационный потенциал использования угля в электроэнергетике Украины / А. А. Решетняк // Тр. научно-технического семинара. – Днепропетровск. – С. 4–10.

199. Русчев, Д. Д. Изготовление, стабилизация и применение топливных суспензий / Д. Д. Русчев // Кокс и химия. – 1996. – № 10. – С. 9–12.

200. Савицкий, Д. П. Поверхностно-активные свойства водных растворов лигносульфоната натрия / Д. П. Савицкий, К. В. Макарова, А.С. Макаров // Химия растительного сырья. – 2012. – № 2. – С. 41–45.

201. Самойлик, В. Г. Влияние состава минеральных примесей на реологические свойства водоугольных суспензий / В. Г. Самойлик, А.Т. Елишевич, А. С. Макаров // Химия твердого топлива. – 1990. – № 5. – С. 76–81.

202. Самойлик, В. Г. Разработка технологии получения твердой фазы водоугольного топлива с целесообразным уровнем зольности : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.17.07 / Самойлик Виталий Григорьевич. – Днепропетровск, 1992. – 16 с.

203. Свитлый, Ю. Г. Гидравлический транспорт : монография / Ю.Г. Свитлый, В. С. Белецкий. – Донецк : Восточ. издат. Дом ; Донецк. отд-ние НОШ ; Ред. гор. энцикл., 2009. – 436 с.

204. Свитлый, Ю. Г. Гидравлический транспорт твердых материалов / Ю. Г. Свитлый, А. А. Круть. – Донецк : Восточ. издат. дом, 2010. – 268 с.

205. Свитлый, Ю. Г. Деминерализация угля в процессе гидравлического транспортирования / Ю. Г. Свитлый, Ю. Ф. Власов, А. А. Круть // Методы регулирования структурно-реологических свойств и коррозионной активности концентрированных дисперсных систем : сб. науч. тр. – М., 1987. – С. 83–90.

206. Свитлый, Ю. Г. Переработка шламонакопителей / Ю. Г. Свитлый, Л. Н. Козыряцкий, Н. Б. Чернецкая // Зб. наук. пр. Східноукр. держ. ун-ту. – Луганськ, 1999. – С. 56–60.

207. Світлий, Ю. Г. Гідравлічний транспорт / Ю. Г. Світлий,

В.С. Білецький. – Донецьк : Схід. вид. дім, 2009. – 436 с.

208. Світлий, Ю. Г. Гідравлічний транспорт твердих матеріалів / Ю.Г. Світлий, О. А. Круть. – Донецьк : Схід. вид. дім, 2010. – 268 с.

209. Селезнев, В. Е. Математическое моделирование трубопроводных сетей и систем каналов: методы, модели и алгоритмы / В. Е. Селезнев, В.В. Алешин, С. Н. Прялов // Directmedia. – 2015. – 6 февр. – С. 178–192.

210. Семененко, Е. В. Обоснование методики расчета гидравлического уклона при течении пульпы с концентрацией пасты / Е. В. Семененко, С.Н. Кириченко // Геотехнічна механіка : межвед. сб. науч. тр. – Днепропетровск, 2013. – Вып. 110. – Библиогр.: 10 назв.

211. Семененко, Е. В. Обоснование параметров бимодального гранулометрического состава твердой фазы структурированных суспензий / Е.В. Семененко, В. Д. Рубан, К. К. Подоляк // Геотехническая механика : межвед. сб. науч. тр. – Днепропетровск, 2017. – № 134. – С. 124–133.

212. Семененко, Е. В. Предельная концентрация водоугольных структурированных суспензий / Е. В. Семененко, В. Д. Рубан, К.К. Подоляк // Обогащение полезных ископаемых : науч.-техн. сб. – Днепропетровск, 2015. – Вып. 60 (101). – С. 35–47.

213. Семененко, Е. В. Предельная концентрация водоугольных структурированных суспензий / Е. В. Семененко, В. Д. Рубан, К. К. Подоляк // Обогащение полезных ископаемых : науч.-техн. сб. – Днепропетровск, 2015. – Вып. 60 (101). – С. 35-41.

214. Семененко, Е. В. Факторы, определяющие оптимальный гранулометрический состав твердой фазы структурированных суспензий / Е.В. Семененко, В. Д. Рубан, К. К. Подоляк // Форум горняков 2014 : материалы междунар. конф., 1–4 окт. 2014 г. – Днепропетровск, 2014. – С. 162–168.

215. Сенчурова, Ю. А. Обзор методов сжигания водоугольного топлива в котлах малой мощности и на демонстрационных установках / Ю.А. Сенчурова // Наука и образование : материалы VII Междунар. науч.

конф., (14–15 марта 2008 г.) : в 3 ч. / Кемеров. гос. ун-т. ; Беловский ин-т (филиал). – Белово, 2008. – Ч. 3. – С. 252–256.

216. Сенчулова, Ю. А. Совершенствование технологии сжигания водоугольного топлива в вихревых топках : дис. . канд. техн. наук : 05.14.04 / Сенчулова Юлия Анатольевна. – Кемерово, 2008. – 117 с.

217. Серебряник, И. А. Моделирование процесса гравитационной классификации с применением аппарата Марковских цепей / И. А. Серебряник // Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та. – Иркутск, 2006. – № 4. – С. 20–25.

218. Сжигание водоугольных суспензий из донецких тощих углей в топке промышленного парового котла / Г. Н. Делягин, В. И. Кирсанов, А.Г. Онищенко, А. И. Гладкий // Новые методы сжигания топлива и вопросы теории горения. – М. : Наука, 1969. – С. 40–51.

219. Симаков, Н. Н. Численное моделирование двухфазного потока в факеле распыла форсунки / Н. Н. Симаков // Изв. вузов. Химия и хим. технология. – 2002, – Т. 45, вып. 7. – С. 125–129.

220. Смолдырев, А. Е. Гидро- и пневмотранспорт / А. Е. Смолдырев. – М. : Металлургия, 1975. – 384 с.

221. Смолдырев, А. Е. Трубопроводный транспорт концентрированных гидросмесей / А. Е. Смолдырев, Ю. К. Сафонов. – М. : Машиностроение, 1989. – 256 с.

222. Снижение вредных выбросов в атмосферу при сжигании водоугольного топлива / Е. В. Титов, С. Л. Хилько, Ю. Г. Свитлый [и др.] // Технологические исследования: состояние и перспективы : сб. науч. работ народ. науч.-практ. конф. – Ивано-Франковск, 1995. – С. 127–130.

223. Совершенствование водоугольного топлива и перспективы его применения / Г. Н. Делягин, В. В. Корнилов, Ю. Д. Кузнецов, Ю. А. Чернегов. – М. : ВНИИОЭНГ, 1993. – 32 с.

224. Солодов, В. Г. Моделирование турбулентных течений. Расчет больших вихрей / В. Г. Солодов. – Харьков : ХНАДУ, 2011. – 167 с.

225. Сорока, С. И. Реология жидкости / С. И. Сорока. – Луганск : Изд-во

ВНУ им. В Даля, 2001. – 48 с.

226. Способ переработки угля с легкоразмокаемой породой для приготовления деминерализованного суспензионного угольного топлива : пат. № 2378324 РФ / В. И. Мурко, В. И. Федяев, М. П. Баранова и др. – 2010, Бюл. 1. – С. 2.

227. Справочник по обогащению углей / [З. Ш. Беринберг, И. С. Благоев, М. А. Борц и др.] ; под ред. И. С. Благоева и др. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Недра, 1984. – 614 с. : ил.

228. Стариков, А. П. Перспективы глубокой переработки углей России газификацией с получением продуктов высокой добавленной стоимости / А.П. Стариков, В. Г. Харитонов, А. И. Гордиенко // Уголь. – 2012. – № 3. – С. 52–54.

229. Стенд для досліджень характеристик руху концентрованих відходів паливної енергетики / Н. Б. Чернецка-Білецька, О. В. Кущенко, Є.О. Варакута, Г. М. Шворнікова, Д. О. Капустін // Вісн. Східноукр. нац. ун-ту ім. В. Даля. – Луганськ, 2011. – № 1 (155), ч. 2. – С. 252–256.

230. Сырьевая база для приготовления высококонцентрированных водоугольных суспензий применительно к углепроводу Белово-Новосибирск / Г. К. Корочкин, В. И. Мурко, В. А. Своров и др. // Химия твердого топлива. – 2000. – № 3. – С. 83–89.

231. Тарабанько, В. Е. Механизм стабилизации водоугольных топливных суспензий / В. Е. Тарабанько, М. П. Баранова // Химия-XXI век: новые технологии, новые продукты : материалы Всерос. науч.-практ. конф. – Кемерово, 2009. – С. 152–154.

232. Тарабанько, В. Е. Стабилизация водоугольных суспензий / В.Е. Тарабанько, М. П. Баранова // Лесной и химический комплексы – проблемы и решения : материалы Всерос. науч.-практ. конф. – Красноярск, 2008. – Т. 2. – С. 179–182.

233. Теория и прикладные аспекты гидротранспортирования твердых материалов / И. А. Асауленко, Ю. К. Вытошкин, В. М. Карасик и др. – К. :

Науч. мнение, 1981. – 364 с. ; ил. 110. ; табл. 16. – Список лит.: с. 353 – 362 – (210 назв.).

234. Технологии утилизации отходов обогащения / Д. А. Капустин, Ю.И. Гутько, М. В. Орешкин, В. В. Швыров // Вестн. Луган. гос. ун-та им. Владимира Даля. – Луганск, 2020. – № 6 (36). – С. 43–49.

235. Технологические возможности приготовления суспензий из обогащенного угля / Ю. Г. Свитлый [и др.] // Сб. методы регулирования структурно-реологических свойств и коррозионной активности высококонцентрированных дисперсных систем. – М., 1987. – С. 78–82.

236. Технология приготовления и физико-химические свойства водоугольной суспензии : сб. науч. тр. НПО «Гидротрубопровод» / под общ. ред. Г. С. Ходакова. – М., 1991. – 136 с.

237. Трайнис, В. В. Параметры и режимы гидравлического транспортирования угля по трубопроводам / В. В. Трайнис. – М. : Наука, 1970. – 191 с.

238. Транспортирование водоугольных суспензий. Гидродинамика и температурный режим / А. С. Кондратьев, В. И. Овсянников, Е. П. Олофинский [и др.]. – М. : Недра, 1988. – 213 с.

239. Трубецкой К. Н. Развитие работ по использованию высококонцентрированной водоугольной суспензии в энергетике России / К.Н. Трубецкой, И. Х. Нехороший // Теплоэнергетика. – 1994. – № 11. – С. 26–29.

240. Урьев Н. Б. Закономерности структурообразования высококонцентрированных водоугольных суспензий / Н. Б. Урьев // Исследование гидромеханики суспензий в трубопроводном транспорте : сб. науч. тр. НПО «Гидротрубопровод». – М., 1985. – С. 8–27.

241. Урьев, Н. Б. Влияние высокоскоростной активации водоугольных суспензий на их структурно-реологические свойства / Н. Б. Урьев, Э. И. Рукин // Исследование технологии и оборудования терминальных комплексов магистрального гидротранспорта : сб. науч. тр. НПО «Гидротрубопровод». – М., 1985. – С. 19–24.

242. Урьев, Н. Б. Высококцентрированные дисперсные системы : [монография] / Н. Б. Урьев . – М. : Химия, 1980. – 319 с.

243. Урьев, Н. Б. Физико-химическая механика и интенсификация образования пищевых масс / Н. Б. Урьев, М. А. Талейник. – М. : Пищевая пром-сть, 1976. – 239 с.

244. Утилизация угольных шламов Кузбасса в виде высокоцентрированных водоугольных суспензий / Г. Л. Солодов, А.Н. Заостровский, А. В. Папин и др. // Вестн. Кузбас. гос. техн. ун-та. – Кемерово, 2003. – № 6. – С. 71–74.

245. Ушаков, В. Я. Импульсный электрический пробой жидкостей / В.Я. Ушаков. – Томск : Изд-во Томск. гос. ун-та, 1975. – 256 с.

246. Факторы влияющие на надежность работы гидротранспортной системы / Д. А. Капустин, Р. Н. Сентяй, В. В. Швыров и др. // Вестн. Луган. гос. ун-та им. Владимира Даля. – Луганск, 2019. – № 11 (29). – С. 67–71.

247. Федорова, С. В. Развитие технологии и конструкции струйных мельниц / С. В. Федорова, И. А. Серебряник // Интеллектуальные и материальные ресурсы Сибири : сб. науч. тр. – Иркутск, 2004. – С. 216–220.

248. Финни, Д. Введение в теорию планирования экспериментов : [перев с англ.] / Финни Д. – М. : Наука, 1970. – 121 с.

249. Фролов, Ю. Г. Курс коллоидной химии. Поверхностные и дисперсные системы / Ю. Г. Фролов. – М. : Химия, 1988. – 464 с.

250. Халафян, А. А. Промышленная статистика: контроль качества, анализ процессов, планирование экспериментов в пакете STATISTICA : учеб. пособие / А. А. Халафян. – М. : ЛИБРОКОМ, 2013. – 384 с.

251. Характер течения водоугольных суспензий в кольцевой области потока / Д. А. Капустин, А. В. Кущенко, В. В. Швыров, Р. Н. Сентяй // Вестн. Луган. гос. ун-та им. Владимира Даля. – Луганск, 2020. – № 11 (41). – С. 58–63.

252. Хахаев, И. А. Практикум по алгоритмизации и программированию на Python / И. А. Хахаев. – 2-е изд., испр. – М. : ИНТУИТ, 2016. – 179 с.

253. Ходаков, Г. С. Некоторые особенности приготовления

высококонтцентрированных водоугольных суспензий, предназначенных для гидротранспортирования / Г. С. Ходаков // Исследования технологии и оборудования терминальных комплексов магистрального гидротранспорта : тр. ин-та ВНИИПИгидротрубопровод. – М., 1985. – С. 24–31.

254. Ходаков, Г. С. Суспензионное угольное топливо / Г. С. Ходаков, Е.Г. Горлов, Г. С. Головин // Химия твердого топлива. – 2005. – № 6. – С.15–31.

255. Чернецкая, Н. Б. Исследование закономерностей воздействия свойств исходного угля на реологические характеристики водоугольного топлива / Н. Б. Чернецкая, Г. М. Шворникова, А. В. Кущенко // Вестн. Восточноукр. нац. ун-та им. В. Даля. – Луганск, 2009. – № 2 (132). – С. 447–451.

256. Чернецкая, Н. Б. Исследование седиментационной стабильности водоугольных суспензий / Н. Б. Чернецкая, А. М. Шворникова, А. В. Кущенко // Вісн. Інженер. Акад. України. – Київ, 2007. – Вип. 2–3. – С. 101–104.

257. Чернецкая-Белецкая, Н. Б. Использование низкосортного твердого топлива в энергетике страны / Н. Б. Чернецкая-Белецкая, И. О. Баранов // Укр. железные дороги. – 2014. – № 5 (11). – С. 58–61.

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

259. Чернецька, Н. Б. Дослідження закономірностей впливу властивостей вихідного вугілля на реологічні характеристики водовугільного палива / Н. Б. Чернецька, Г. М. Шворнікова, О. В. Кущенко // Вісн. Східноукр. нац. ун-ту ім. В. Даля. – Луганськ, 2009. – № 2 (132). – С. 447–451.

260. Чесноков, П. С. Снижение энергозатрат в системах приготовления и гидравлического транспортирования водоугольной суспензии на горных предприятиях : дис. ... канд. техн. наук : 05.05.06 / Чесноков Павел Сергеевич. – СПб., 2006. – 170 с.

261. Чижиумов, С. Д. Основы гидродинамики : учеб. пособие / С.Д. Чижиумов. – Комсомольск-на-Амуре : ГОУВПО «КнАГТУ», 2007. – 106 с.

262. Численное и экспериментальное исследование газочапельного течения в сопле с большими концентрациями дисперсной фазы / И.А. Лепешинский, Ю. В. Зуев, А. А. Яковлев и др. // Математическое моделирование. – 2002. – Т.14, №7. – С. 58–73.

263. Численные методы исследования течений вязкой жидкости / А.Д. Госмен, В. М. Пан, А. К. Ранчел и др. ; под. ред. Г. А. Тирского ; [пер. с англ. Хохрякова В. А.]. – М. : Мир, 1972. – 326 с.

264. Шворникова А. М. Снижение энергозатрат на транспортировку водоугольного топлива совершенствованием процессов и режимов работы гидротранспортных систем : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.12 / Шворникова Анна Михайловна. – Луганск, 2010. – 191 с.

265. Экологические аспекты вихревой технологии сжигания суспензионного угольного топлива / Н. В. Журавлева, В. И. Мурко, В.И. Федяев, и др. // Экология и промышленность России. – 2009. – № 1. – С. 6–9.

266. Экологические аспекты ресурсобеспечения энергетической безопасности // Деловой вестн. – 1998. – № 9. – С. 4–10.

267. Экологические проблемы производства водоугольных суспензий из бурых углей Канско-Ачинского бассейна / Е. Г. Горлов, В. Б. Быковский, А.А. Вартанова и др. // Химия твердого топлива. – 1998. – № 2. – С. 64–74.

268. Экспериментальные исследования параметров гидротранспорта водоугольного топлива / Ю. Ф. Власов, Ю. Г. Свитлый, А. Ю. Макаревич [и др.] // Вестн. Восточноукр. гос. ун-та. – Луганск, 2001. – № 1 (23). – С. 135–139.

269. Экспериментальные исследования течения высококонцентрированных водоугольных суспензий / Ю. И. Гутько, Д.А. Капустин, М. В. Орешкин, А. В. Кущенко // Науч. вестн. ГОУ ЛНР «ЛНАУ». – Луганск, 2022. – № 1 (10). – С. 394–401.

270. Энерготехнологические проблемы сжигания твердого топлива в котельных установках / В. В. Осинцев, А. К. Джундубаев и др. – Челябинск : Изд-во ЧГТУ, 1995. – 191 с.

271. Юдин, Б. В. Разработка геомеханической модели высококонцентрированных водоугольных дисперсных систем : дис. ... канд. техн. наук : 25.00.20 / Юдин Борис Викторович. – Кемерово, 2001. – 167с.

272. Юфин, А. П. Гидромеханизация : учеб. [для студ. гидротехн. спец. вузов] / А. П. Юфин. – М. : Госстройиздат, 1966. – 496 с.

273. Яхно, О. М. Гідравліка не ньютонівських рідин : навч. посіб. / О.М. Яхно, І. В. Желяк. – К. : Вища шк., 1995. – 199 с.

274. Adsorption Behavior of Polyanion Additives and Coal-Water Mixture Properties / Akira Ohki [et al.] // The Proceeding of the 20-th International Conference on Coal Utilization & Fuel Systems, March 1995. – Clearwater, Florida, USA, 1995. – P. 75–85.

275. An investigation on the rheological and sulfur-retention characteristics of desulfurizing coal water slurry with calcium-based additives / Jianzhong Liu, Weidong Zhao, Junhu Zhou et al. // Fuel Processing Technology. – 2009. – № 7 (231). – P. 91–98.

276. Application of swirl combustion technique on reduction of toxic substance in coal water mixture combustion products / V. Murko, V. Fedyaev, V. Karpenok et al. // J. Clean coal technology. – China, 2012. – № 5. – С. 73–75.

277. Ashworth, R. A. Coal Water Slurry Reburning «Low Cost NO_x Compliance System for Cyclone-Fired Boilers» / A. Ashworth Robert [et al.] // The Proceedings of the 21st International Technical Conference on Coal Utilization & Fuel Systems, March 1996. – Clearwater, Florida, USA, 1996. – P. 511–522.

278. Ashworth, R. A. CWS Co-firing on Two Cyclone-Fired Electric Utility Boilers / A. Ashworth Robert, De Solar Richard, A. BrownRichard // The Proceedings of the 22-nd International Technical Conference on Coal Utilization & Fuel Systems, March 1997. – Clearwater, Florida, USA, 1997. – P.159–172.

279. Ashworth, R. A. Results of CWS Reburn Tests on a 10 x 10⁶ Btu/hr Tower Furnace and Its Impact on CWS Reburn Economics / A. Ashworth Robert, M. Maly Peter // The Proceedings of the 22-nd International Technical Conference on Coal Utilization & Fuel Systems, March 1997. – Clearwater, Florida, USA, 1997.

– P. 789–800.

280. Baranova, M. P. Energy and Ecological Aspects of Coal-water Slurry Utilization / M. P. Baranova, V. A. Kulagin // The 7th IsCc. – Harbin, 2011. – P. 124-135.

281. Basta, N. Coal Slurries: an environmental Bonus / Nicholas Basta, Stephen Moore, Ondrey Gerald // Chemical Engineering. – 1994. – P. 475–486.

282. Battista, J. J. Formulation of Low Solids Coal Water Slurry From Advanced Coal Cleaning Waste Fines / Joseph J. Battista [et al.] // The Proceedings of the 22-nd International Technical Conference on Coal Utilization & Fuel Systems, March 1997. – Clearwater, Florida, USA, 1997. – P. 567–570.

283. Biletskiy, V. Promising coal technologies / V. Biletskiy, A. Krut, F. Papayani // Mining over Centiries : Int. Conference (MIOCEN-2005), Podebrady, 27.09–02.10.2005 : Biblioteka Szkoły Eksploatacji. – Krakow, 2005. – S. 17–25.

284. Bruce, G. Introduction to coal utilization technologies / G. Bruce // Clean coal engineering technology. – 2011. – № 5. – P. 133–217.

285. Buckingham E. On plastic flow through capillary tubes / E. Buckingham // Proc. Amer. Soc. Testing Materials, 1921. – P.11-54.

286. Burning Properties of Slurry Based on Coal and Oil Processing Waste / D. O. Glushkov, S. Y. Lyrshchikov, S. A. Shevyrev, P. A. Strizhak // Energy & Fuels. – 2016. – Vol. 30, № 4. – P. 3441–3450.

287. Carniani, E. Coal Water Mixture Preparation and Transport / E. Carniani // Member State Technologies dedicated to Help the Energy Self Sufficiency Process optimizing the local Resources such as Coal : Seminar. – K., 1997. – P. 2–17.

288. Carniani, E. Production and Pipeline Transport of Oil-Water Dispersions / E. Carniani [et al.] // The Proceedings of the 22nd International Technical Conference on Coal Utilization & Fuel Systems, March 1997. –Clearwater, Florida, USA, 1997. – P. 299–310.

289. Carson, R. W. Co-Firing Coal-Water Slurry in Cyclone Boilers: Some Combustion Issues and Considerations / Richard W. Carson, David Tillman // The Proceedings of the 22-nd International Technical Conference on Coal Utilization &

Fuel Systems, March 1997. – Clearwater, Florida, USA, 1997. – P. 627–638.

290. Cherneckaya, N. Ecological aspects of transportation and application of water coal fuel / Natalia Cherneckaya, Anna Shvornikova, Inna Ovsepyan // *Современные достижения в науке и образовании : III междунар. науч. конф.*, 16–23 сент. 2009 г. : тез. докл. – Тель-Авив (Израиль), 2009. – С. 75–78.

291. Cherneckaya, N. Mixing of water-coal fuel compositions with rational rheological and energy performances on a basis of Donbass coal-field / Natalia Cherneckaya, Anna Shvornikova // *Motrol. Motorization and power industry in agriculture.* – Lublin, 2008. – V. 10A. – P. 18–24.

292. Chernetskaya, N. Choice of technology and the equipment for preparation water-coal fuel in laboratory conditions [Electronic resource] / Natalia Chernetskaya, Anna Shvornikova, Aleksandr Kuschenko // *ТЕКА. Kom Mot. Energ. Roln.* – OL PAN 2010. – №10. – P. 33–38. – Access mode: <http://old-panol.ipan.lublin.pl/wydawnictwa/TMot10/Chernetskaya.pdf>. – Screen title. – Date of the application: 16.03.2020.

293. Chernetskaya-Beletskaya, N. Technology of breakage of coal for the coal-water fuel production. / N. Chernetskaya-Beletskaya, I. Baranov, Miroshnykova // *ТЕКА. Commission of motorization and energetics in agriculture.* – 2015. – Vol. 15, № 2. – P. 63–68.

294. *Coal Information 2012.* – Luxembourg : International Energy Agency [Electronic resource], 2012. – 566 p. – Access mode: <http://www.iea.org>. – Screen title. – Date of the application: 14.04.2021

295. Combustion of sludge coal water slurry and emission property of contaminants / J.-H. Zhu, Q.-H. Hu, J.-F. Chen, H. Zhang, K.-F. Cen // [Journal of Fuel Chemistry and Technology.](#) – 2012. – Vol. 40, Issue 2. – P. 252–256.

296. Comparison Between Fuel and Dry Micronized Coal in an Oil-Designed Industrial Watertube Boiler / Bruce G. Miller, Roger L. Bartley, Alan W. Scaroni [et al.] // *The Proceedings of the 20-th International Technical Conference on Coal Utilization & Fuel Systems*, March 1995. – Clearwater, Florida, USA, 1995. – P. 267–278.

297. Delano, M. R. Performance and Economics of Co-Firing a Coal: Waste Slurry in Advanced Fluidized- Bed Combustion / Michael R. Delano, Roman Zaharchuk // The Proceedings of the 21-st International Technical Conference on Coal Utilization & Fuel Systems, March 1996. – Clearwater, Florida, USA, 1996. – P. 183–192.

298. Dependence of the rheological behaviour and static stability of coal water slurry fuels on the structural characteristics of dispersant / Chenggong Sun, Yaxiong Xie, Baoqing Li, Yongxin Li // Proceedings ICCS. – 1997. – P. 495–498.

299. Dmitrienko, M. A. Environmentally and economically efficient utilization of coal processing waste / M. A. Dmitrienko, P. A. Strizhak // Science of the Total Environment. – Berlin, 2017. – Vol. 598. – P. 21–27.

300. Economics of Coal Fines Utilization / V. Hathi, E. McNale, M. Ramesan [et al.] // The Proceedings of the 20-th International Technical Conference on Coal Utilization & Fuel Systems, March 1995. – Clearwater, Florida, USA, 1995. – P. 571–582.

301. Economics of Waste Coal Utilization in Indiana / Howard E. Lebowitz , David Akers , William Simmons, Evan Hughes // The Proceedings of the 23-rd International Technical Conference on Coal Utilization & Fuel Systems, March 1998. – Clearwater, Florida, USA, 1998. – P. 757–760.

302. Effects of chemicals and blending petroleum coke on the properties of low-rank Indonesian coal water mixtures/ Renfu Xua, Qihui Hea, Jun Caia et al. // Fuel Processing Tecnology. – 2008. – № 29. – P. 249–253.

303. Enviromentally clean techology of fine waste coal utilization / V.I. Murko, V. I. Fedyaev, H. L. Aynetdinov, M. P. Baranova // The 8th International Symposium on Coal Combustion (The 8th ISCC). – Turkey, 2013. – P. 679–682.

304. Felices F. A. Clean Coal Technologies and Environment / F. A. Felices // Member State Technologies dedicated to Help the Energy Self Sufficiency Process optimizing the local Resources such as Coal : Seminar. – K.,1997. – P. 2–24.

305. Fjodorov, E. Metody izmerenija urovnja i granic razdela mnogofaznyh zhidkih sred / E. Fjodorov // Materialy VI nauchno-prakticheskoy konferencii, 27–30

maja 2015 g. – Tomsk, 2015. – P. 65-68.

306. Fu Xiao-an. A New Kind of Light Fuel Composed of Water/-Coal /Hydrocarbon / Xiao-an Fu [et al.] // The Proceedings of the 21st International Technical Conference on Coal Utilization & Fuel Systems, March 1996. – Clearwater, Florida, USA, 1996. – P. 259–266.

307. Gaved A. Cashing in Coal's Liquid Assets / A. Gaved // World Coal. – 1995. – February. – P. 19–28.

308. Goldman, Y. Coal: Clean and Efficient Energy / Y. Goldman, Y.M. Timnat // The Proceedings of the 21-st International Technical Conference on Coal Utilization & Fuel Systems, March 1996. – Clearwater, Florida, USA, 1996. – P. 365–376.

309. Grinzi, F. Coal Water Mixture Combustion and Boiler Retrofit / F. Grinzi // Member State Technologies dedicated to Help the Energy Self Sufficiency Process optimising the local Resources such as Coal : Seminar. – K.,1997. – P. 1–20.

310. Harrison, C. D. Alternative Fuels from Slurry Ponds / Clark D. Harrison, David J. Akers, Richard W. Carson // The Proceedings of the 22-nd International Technical Conference on Coal Utilization & Fuel Systems, March 1997. – Clearwater, Florida, USA, 1997. – P. 141–148.

311. Heat transfer under ignition of droplet of composite liquid fuel made of coal, water and oil in an oxidant flow / D.O. Glushkov, N. E. Schlegel, P.A. Strizhak, K. Yu. Vershinina // Advances and Applications in Fluid Mechanics. – 2016. – Vol. 19, № 1. – P. 157–168.

312. Henry, C. D. Current Techniques in the Reclamation and Treatment of Fine Coal Reject Reserves / C. D. Henry [et al.] // The Proceeding of the 20-th International Technical Conference on Coal Utilization & Fuel Systems, March 1995. – Clearwater, Florida, USA, 1995 – P. 583–594.

313. Hervé, C. The basics of plant hydraulics // The Journal of plant hydraulics. – 2014. – № 1. – P. 178–188.

314. Highly concentrated water-coal suspensions – a new form of

ecologically-clean fuel / G. N. Deayagin, Y. V. Demidov, S. P. Kostovetsky, J.K. Nekhoroshy // Symposium on New Coal Utilization Technologies. – Helsinki (Finland), 1993. – P. 10–13.

315. Huettenhain, H. Premium Coal-Water Fuel (CWF) / Horst Huettenhain, M. V. Chari // The Proceedings of the 23rd International Technical Conference on Coal Utilization & Fuel Systems, March 1998. – Clearwater, Florida, USA, 1998. – P. 1099–1108.

316. Improving industrial pipeline transport using research regularities of flow of mixtures in material pipeline / N. Chernetskaya-Beletskaya, O. Guschin, A. Shvornikova, I. Baranov, M. Miroshnikova // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – Vol. 4/7, Iss. 88. – P. 38–44.

317. Investigation Of The Spraying Mechanism And Combustion Of The Suspended Coal Fuel / V. I. Murko, V. I. Fedyaev, V. I. Karpenok et al. // Thermal Science. – 2015. – T. 19, № 1. – P. 243–251.

318. Jha Mahesh C. Properties of Premium Coal Water Slurry Prepared by Advanced Fine Coal Cleaning / C. Jha Mahesh [et al.] // The Proceedings of the 22nd International Technical Conference on Coal Utilization & Fuel Systems, March 1997. – Clearwater, Florida, USA, 1997. – P. 853–864.

319. Lin Yu. Determination of Pressure Loss and Optimum Concentration in Tailings Slurry Pipeline / Yu Lin // The Proceedings of the 23-rd International Technical Conference on Coal Utilization & Fuel Systems, March 1998. – Clearwater, Florida, USA, 1998. – P. 1139–1145.

320. Mantripragada, H. C. Techno-economic evaluation of coal-to-liquids (CTL) plants with carbon capture and sequestration / H. C. Mantripragada, E.S. Rubin // Energy Policy. – 2011. – № 39. – P. 2808–2816.

321. Mathiesen, M. M. Full Utilization of Mined Coal / Mihkel M. Mathiesen // The Proceeding of the 20th International Technical Conference on Coal Utilisation & Fuel Systems, March 1995. – Clearwater, Florida, USA, 1995. – P. 177–188.

322. Mechanical activation of micronized coal: Prospects for new combustion applications / A. P. Burdukov, V. I. Popov, M. Yu. Chernetskiy et al. // Applied

Thermal Engineering. – 2014. – Vol. 74. – P. 174–181.

323. Mingaleeva, G. R. Physico-chemical foundations of produced syngas during gasification process of various hydrocarbon fuels / G. R. Mingaleeva, D.V. Ermolaev, A. A. Galkeeva // Clean Technologies and Environmental Policy. – 2016. – Vol. 18. – P. 297–304.

324. Mochalov, S. P. Mechanism and mathematical modeling of coal- water slurry combustion in swirl adiabatic combustion chamber / S. P. Mochalov, I.A. Rybenko, L. A. Ermakova [Electronic resource] // World Applied Sciences Journal. – 2012. – № 19 (1). – P. 20–25. – Access mode: [http://idosi.org/wasj/wasj19\(1\)12/3.pdf](http://idosi.org/wasj/wasj19(1)12/3.pdf). – Screen title. – Date of the application: 02.03.2020

325. Morrison, J. L. Recovery of Ultrafine Bituminous Coal from Screen Boul Centrifuge Effluent: A Possible Feedstock for Coal-Water Slurry Fuel / Joel L. Morrison, Bruce G. Miller // The Proceedings of the 23-rd International Technical Conference on Coal Utilization & Fuel Systems, March 1998. – Clearwater, Florida, USA, 1998. – P. 707–718.

326. Murell, F. J. Using Low Cost Staged Combustion to Fire Coal Fines Co-fire Coal/Waste “A Low Cost Fuel and Technology Strategy” / Frederick J. Murell, Robert A. Ashworth // The Proceedings of the 22-nd International Technical Conference on Coal Utilization & Fuel Systems, March 1997. – Clearwater, Florida, USA, 1997. – P. 617–626.

327. Murko, V. I. Technology of Production and Combustion of Fuel Water-Coal Suspensions from low-Metamorphized Mongolian Coals (in Russian) / V.I. Murko, M. P. Baranova, I. M. Zasytkin // Interaction of High-Concentrated Energy Fluxes with Materials in the Promising Technologies and Medicine : Proceeding, 4th All-Rus- sian Conference. – Novosibirsk, Russia, 2011. – P. 215–218.

328. Narasimhan, K. S. Utility of Water-Slurry Technology in India / Kotur S. Narasimhan // The Proceeding of the 22-nd International Technical Conference Utilization & Fuel Systems, March 1997.– Clearwater, Florida, USA, 1997. – P. 843–852.

329. Nikolaichuk, L. A. Prospects of ecological technologies development in the Russian oil industry / L. A. Nikolaichuk, P. S. Tsvetkov // *International Journal of Applied Engineering Research*. – 2016. – Vol. 11, № 7. – P. 5271–5276.

330. Novelli, G. Feasibility Study on Complete System of Production, Transportation and Utilization of About 7MTA of CWS from Shemu Area and Yellow Sea (China) / Giovanni Novelli , Wang Zuna // *The Proceedings of the 21-st International Technical Conference on Coal Utilization & Fuel Systems*, March 1996. – Clearwater, Florida, USA, 1996. – P. 679–690.

331. Pan, F. Full process control strategy of fuel based on water-coal ratio of ultra supercritical units / F. Pan, Y. Zhu, X. Zhang // *International Conference on Electronics, Communications and Control (ICECC)*, September 2011. – P. 3750–3753.

332. Papayani F. A. Projects of Introduction of Coal-Water Fuel Technology in Ukraine / F. A. Papayani, Y. G. Switly, Y. F. Vlasov // *The Proceedings of 21-st International Technical Conference on Coal Utilization & Fuel Systems*. – Clearwater, Florida, USA, 1996. – P. 301–303.

333. Possibilities of coal water slurry combustion prepared from rejects in small and medium thermoelectric units / V. I. Murko, V. I. Fedyaef, V. I. Carpenok et al. // *Clean Coal Technology*. – 2011. – V. 6. – P. 111–113.

334. Preparation of High Concentration Slurry Fuel by Singl-Step Wet Grinding / M. Prasad, B. K. Mall, S. K. Basu [et al.] // *The Proceedings of the 22-nd International Technical Conference on Coal Utilization & Fuel Systems*, March 1997. – Clearwater, Florida, USA, 1997. – P. 865–876.

335. Prospective Utilization of Coals and Coal Cleaning Wastes in Heat Power Industry of Ukraine / V. Kassianov , F. Papayani, Y. Switly [et al.] // *The Proceedings of the 23-rd International Technical Conference on Coal Utilization & Fuel Systems*. – Clearwater, Florida, USA, 1998. – P. 207–217.

336. Results Of Study Of Sulfur Oxide Reduction During Combustion Of Coal-Water Slurry Fuel Through Use Of Sulfur Capturing Agents [Electronic resource] / V. I. Murko, V. I. Karpenok, Y. A. Senchurova et al. // *MATEC Web of*

Conferences. Vol. 72 : Heat and Mass Transfer in the System of Thermal Modes of Energy – Technical and Technological Equipment (HMTTSC–2016). – Tomsk, Russia, 2016. – Access mode: file:///C:/Users/%D0%91%D0%B0%D0%B1%D1%83%D1%88%D0%BA%D0%B0/Downloads/Results_of_Study_of_Sulfur_Oxide_Reduction_During_.pdf– Screen title. – Date of the application: 03.11.2020

337. Savitskii, D. P. Rheological properties of water-coal slurries based on brown coal in the presence of sodium lignosulfonates and alkali / D. P. Savitskii, A.S. Makarov, V. A. Zavgorodnii // Solid Fuel Chemistry. – 2009. – Vol. 43. – № 5. – P. 328–332.

338. Shibata Kazuhiro. CWM Production by Low Rank Coals Upgrading / Kazuhiro Shibata // The Proceedings of the 21-st International Technical Conference on Coal Utilization & Fuel Systems, March 1996. – Clearwater, Florida, USA, 1996. – P. 233–244.

339. Shuquan, Z. The Influence of Wetting Heat in Water to Coal's Slurryability / Zhu Shuquan [et al.] // The Proceedings of the 22-nd International Technical Conference on Coal Utilization & Fuel Systems, March, 1997. – Clearwater, Florida, USA, 1997. – P. 923–928.

340. Shuquan, Z. The PSD Characteristics for Different Rank Coals and their Effects on Slurryability / Zhu Shuquan, Wang Zuna, Zhang Wenfu // The Proceedings of the 21-st International Technical Conference on Coal Utilization & Fuel Systems, March 1995. – Clearwater, Florida, USA, 1995. – P. 245–250.

341. Some aspects improvement of industrial pipeline transport / N. Chernetskaya-Beletskaya, I. Baranov, M. Miroshnykova et al. // TEKA. Commission of motorization and energetics in agriculture. – 2017. – Vol. 17, № 1. – P. 33–40.

342. Study on preparation of coal water mixture from rejects / V. I. Fedyaef, V. I. Murko, H. L. Inetdinof, M. P. Baranova // Clean Coal Technology. – 2011. – Vol. 6. – P. 43–46.

343. Study on the coal-water fuel pipeline transportation taking into account

the granulometric composition parameters / N. Chernetskaya-Beletskaya, A. Rogovyi, A. Shvornikova et al. // International Journal of Engineering & Technology. – 2018. – Vol. 7, Iss. 4–3. – P. 240–245.

344. Sunggyu, L. Handbook of alternative fuel technologies / Sunggyu Lee, James G. Speight, Sudarshan K. Loyalka // CKC Press. – 2007. – P. 48–56.

345. Swanson, M. L. Preesurized Fluid-Bed Combustion of Dry and Coal-Water Fuels / Michael L. Swanson [et al.] // The Proceedings of the 20-th International Technical Conference on Coal Utilization & Fuel Systems, March 1995. – Clearwater, Florida, USA, 1995. – P. 235–244.

346. Systems of ignition and combustion stabilization for water- coal fuel / I. Zasyplin, V. Murko, V. Fedyayev, M. Baranova // Thermal Science. – 2012. – Vol. 16, № 4. – P. 1329–1338.

347. Tadros, T. F. Use of surfactants and polymers for the preparation and stabilization of coal suspensions / T. F. Tadros // Second European conference on coal liquid mixtures. – London, UK, The Institution of Chemical Engineers, 1985. – P. 1–16.

348. Tanaka, M. The Operation of a CWM Relay Station in the CWM Chain from China to Japanese Users / Minoru Tanaka [et al.] // The Proceedings of the 21-st International Technical Conference on Coal Utilization & Fuel Systems, March 1996. – Clearwater, Florida, USA, 1996. – P. 691–698.

349. The try out of coal-water suspension preparation, transportation and combustion technology on the Belovo to Novosibirsk pipeline / D. Ercolani, G. Minnetti, B. Belykh [et al.] // Proceedings of the seventeenth international conference on coal and slurry technologies. – Clearwater, FL, USA ; Washington, DC, USA : Coal and Slurry Technology Association, 1991. – P. 1–16.

350. [Thompson](#), A. C. Basic hydrodynamics : Library of Congress Cataloging in Publication Data / A. Thompson. – London : Elsevier Science, 2013. – 190 p.

351. Van der Maaten L. J. P. Visualizing High-Dimensional Data Using t-SNE / L. J. P. Van der Maaten; G.E. Hinton // Journal of Machine Learning

Research. – 2008. – № 9. – P. 2579–2605.

352. Wibberley L. Efficient use of coal water fuels technology assessment report / L. Wibberley, D. Palfreyman, P. Scaife // CSIRO Energy Technology (Australia). – 2008. – P. 15-21.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

**Текст кода программы по расчету реализуемых скоростей сдвига
(программный код)**

```

import numpy as np
import time
import math
import xlswriter
from sklearn.manifold import TSNE
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
from mpl_toolkits.mplot3d import Axes3D
import plotly.express as px
import plotly.graph_objects as go
from scipy.optimize import curve_fit
import imageio
import os
import seaborn as sns
from sklearn.preprocessing import normalize
import scipy as sp
from sympy import S, symbols, printing

def seaviz():
    sns.set(style="ticks")
    df=pd.read_excel(open('rez.xlsx', 'rb'), sheet_name='Sheet1')
    zzz=df['Радтр']
    g=sns.pairplot(df)
    g.fig.set_size_inches(15,15)

# def normalize1(df):
#     result=df.copy()
#     for feature_name in df.columns:
#         max_value=df[feature_name].max()
#         min_value=df[feature_name].min()
#         result[feature_name]=(df[feature_name] - min_value) / (max_value -
min_value)
#     return result

def toexcelsimple(d1,d2, gg):
    wb=xlswriter.Workbook('rez.xlsx')
    ws=wb.add_worksheet()
    for j in range(8): ws.write(0,j,['tau', 'eta', 'Удпот', 'Радтр','Радсдвига', 'proc',
'Vsr', 'Gsr'][j])
    for i in range(len(d1)):
        for k in range(6): ws.write(i+1,k,d1[i].split()[k])
        ws.write(i+1,6,d2[i])
        ws.write(i+1,7,gg[i])
    wb.close()

```

```

def getTNSEfromExcel():
    df=pd.read_excel(open('reztn.xlsx', 'rb'), sheet_name='Sheet1')
    # print(df.info())
    myhash= np.array(pd.read_excel(open('reztn.xlsx', 'rb'),
sheet_name='Sheet1' )
    # print(myhash)
    # model=TSNE(perplexity=30.0, learning_rate=500)
    # transformed=model.fit_transform(myhash.data)
    # x_axis=transformed[:, 0]
    # y_axis=transformed[:, 1]
    # max_value=df['eta'].max()
    # min_value=df['eta'].min()
    # zzz= (df['eta'] - min_value) / (max_value - min_value)
    # # ax=plt.gca()
    # zzz= np.stack(df['eta'],axis=1)
    # zzz=normalize(df['eta'], norm='max', axis=0)
    x_axis=df[""]
    plt.figure(figsize=(16, 10), dpi= 150, facecolor='w', edgecolor='k')
    # plt.scatter(x_axis, y_axis, c=df['tau'].map({1: 'green', 2: 'blue'}),s=3)
    # plt.scatter(x_axis, y_axis,c=df['Радсдвига'], s=2)
    plt.scatter(x_axis, y_axis, s=2)
    # for i, txt in enumerate(ss):
    #     # ax.annotate(txt, (x_axis[i], y_axis[i]),size=12)
    #     # ax.annotate(ss,(x_axis, y_axis),rotation=25, size=12)
    plt.show()

def simpleplotly():
    df=pd.read_excel(open('rez1.xlsx', 'rb'), sheet_name='Sheet1')
    print(df.info())

    y=np.array(df['Vsr'])
    x=np.array(df['Радсвига'])
    fig=go.Figure()

    fig.add_trace(go.Scatter(x,y, name='sds', mode='markers',
marker_color='rgba(152, 0, 0, .8)'))
    fig.update_traces(mode='markers', marker_line_width=2, marker_size=10)
    fig.update_layout(title='Styled Scatter', yaxis_zeroline=False,
xaxis_zeroline=False)
    fig.show()

def simplescatter():
    df=pd.read_excel(open('rez.xlsx', 'rb'), sheet_name='Sheet1')

```

```

print(df.info())

# z=df['Vsr']
# x=df['Радсвига']
x=df['Радтр']
# x=df['Радсдвига']
# y=df['Vsr']
y=df['proc']
# zz=df['tau']

# myhash= np.array(pd.read_excel(open('rez.xlsx',
sheet_name='Sheet1') )
# print(myhash)

ax=plt.gca()
# rtr=np.arange(0.025,0.25,0.01)
# # ud=np.arange(10,10000,100)

# mycolor={a: 1-a for a in rtr}
# mycolor={a: 'blue' for a in ud}

# print(mycolor)

plt.figure(figsize=(16, 10), dpi= 300, facecolor='w', edgecolor='k')
# print(df['Удпод'].map(mycolor))
# plt.scatter(x, y, c=df['Удпод'].map(mycolor),s=1)
# plt.scatter(x_axis, y_axis, c=df['tau'].map({1: 'green', 2: 'blue'}),s=3)
plt.scatter(x, y,s=2)
# fig=plt.figure(figsize=(16, 10), dpi= 300, facecolor='w', edgecolor='k')
# ax=fig.add_subplot(111, projection='3d')
# ax.scatter(x, y, z, c=z, s=2)
# ax.scatter(x, y, z, c=df['Радтр'].map(mycolor))
# ax.scatter(x, y, s=1, c=df['Радтр'].map(mycolor))
# ax.plot_wireframe(x, y, z)
# for i, txt in enumerate(ss):
# ax.annotate(txt, (x_axis[i], y_axis[i]),size=12)
# ax.annotate(ss,(x_axis, y_axis),rotation=25, size=12)

fig, ax=plt.subplots()

# получаем параметры модели для полинома степени d
fp, residuals, rank, sv, rcond=sp.polyfit(x, y, 7, full=True)
f=sp.poly1d(fp)

```



```

# ax.set_title(f)

xx=symbols("x")
poly=sum(S("{:6.2f}".format(v))*xx**i for i, v in enumerate(fp[:-1]))
eq_latex=printing.latex(poly)
plt.plot(x, f(x), linewidth=2)
ax.set_title("${ }$".format(eq_latex))
plt.show()

def figani():
    for angle in range(70,210,2):
        df=pd.read_excel(open('rez.xlsx', 'rb'), sheet_name='Sheet1')
        z=df['Vsr']
        # x=df['Радсвига']
        # x=df['Радтр']
        x=df['eta']
        y=df['Радтр']
        zz=df['tau']
        fig=plt.figure(figsize=(16, 10), dpi= 300, facecolor='w', edgecolor='k')
        ax=fig.add_subplot(111, projection='3d')
        ax.scatter(x, y, z, c=z, s=2)
        ax.view_init(30,angle)
        filename='gydropic/'+str(angle)+'.png'
        plt.savefig(filename, dpi=300)

start_time=time.time()

def make_gif(input_folder, save_filepath):
    episode_frames=[]
    time_per_step=0.25
    for root, _, files in os.walk(input_folder):
        file_paths=[os.path.join(root, file) for file in files]
        #sorted by modified time
        file_paths=sorted(file_paths, key=lambda x: os.path.getmtime(x))
        episode_frames=[imageio.imread(file_path)
                        for file_path in file_paths if file_path.endswith('.png')]
    episode_frames=np.array(episode_frames)
    imageio.mimsave(save_filepath, episode_frames, duration=time_per_step)

def perebor():

```

```

vspred=0
tau0=np.arange(1,21,1)
eta=np.arange(0.2,1.2,0.2)
# rtr=np.arange(0.025,0.5,0.0005)
rtr=np.arange(0.025,0.325,0.025)
# print(rtr)
# rtr=np.arange(0.025,0.05,0.025)
rsdv=0
# ud=np.arange(1400,1500,100)
ud=np.arange(10,500,10)
dr=0.001
totalcase=0
r9=0
findskor=list()
gsred=list()
fparams=list()

for x1 in tau0:
    for x2 in eta:
        for x3 in ud:
            for x4 in rtr:
                dqsum=0
                priznaksviga=0
                rsdv=0
                # dr=(x4-2*x1/x3)/10
                totalcase=0
                r9=0
                gnakop=0
                ssc=0
                for xx5 in np.arange(x4,(2*x1/x3)-dr,-dr):
                    # print(x1,x2,x3,x4,xx5)
                    vs=(x3*(x4*x4-xx5*xx5)/4-x1*(x4-xx5))/x2
                    usdv=vs-vspred
                    gaga=usdv/dr

                    if gaga>0:
                        gnakop=gnakop+gaga
                        # print(gaga)
                        ssc=ssc+1
                    vspred=vs
                    if usdv>0:
                        totalcase=totalcase+1
                    if gaga<=9 and usdv>0.0014:
                        r9=r9+1
                    if 0<usdv<=0.0014 and priznaksviga==0:

```

```

# if 0<usdv<=0.0023 and priznaksdviga==0:
    rsdv=xx5
    priznaksdviga=1
    dqsum=dqsum+2*math.pi*xx5*dr*vs
if rsdv>0:
    myparam=str(round(x1,5))+'+str(round(x2,5))+'+str(round(x3,5))+'+
    '+str(round(x4,5))+'+str(round(rsdv,5))+'+
    str(round((r9/totalcase)*100,5))
    findskor.append(str(dqsum/(math.pi*(x4*x4))))
    gsred.append(str(gnakop/ssc))
    fparams.append(myparam)

toexcelsimple(fparams,findskor, gsred)
# print('total '+str(totalcase))
# print('r9 '+str(r9))

perebor()
# simplescatter()
# simpleplotly()
# figani()
# make_gif('gydropic/', 'gg.gif')
# seaviz()

# getTNSEfromExcel()

print("--- %s seconds ---" % (time.time() - start_time))

```

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Пересчет реологических показателей согласно величине локальной скорости сдвига (программный код)

```
unit Unit1;
```

```
interface
```

```
uses
```

```
Winapi.Windows, Winapi.Messages, System.SysUtils, System.Variants,  
System.Classes, Vcl.Graphics,  
Vcl.Controls, Vcl.Forms, Vcl.Dialogs, Vcl.StdCtrls, Vcl.ExtCtrls,  
VCLTee.TeeEngine, VCLTee.TeeProcs, VCLTee.Chart, VCLTee.Series,Excel2000,  
ExcelXP,ComObj,  
Excel2010, Vcl.OleServer, Vcl.ComCtrls, VclTee.TeeGDIPlus;
```

```
type
```

```
TForm1 = class(TForm)  
  Panel1: TPanel;  
  PageControl1: TPageControl;  
  TabSheet1: TTabSheet;  
  TabSheet2: TTabSheet;  
  Chart1: TChart;  
  Label12: TLabel;  
  Panel2: TPanel;  
  Label11: TLabel;  
  Label1: TLabel;  
  Edit1: TEdit;  
  Label2: TLabel;  
  Edit2: TEdit;  
  Label3: TLabel;  
  Edit3: TEdit;  
  Label4: TLabel;  
  Edit4: TEdit;  
  Label5: TLabel;  
  Edit5: TEdit;  
  Label6: TLabel;  
  Edit6: TEdit;  
  Label7: TLabel;  
  Edit7: TEdit;  
  Label8: TLabel;  
  Edit8: TEdit;  
  Label10: TLabel;  
  Edit10: TEdit;  
  Edit9: TEdit;  
  CheckBox1: TCheckBox;  
  Button1: TButton;  
  GroupBox2: TGroupBox;  
  Label13: TLabel;
```

```
Label14: TLabel;  
Label15: TLabel;  
Label16: TLabel;  
Label17: TLabel;  
Label18: TLabel;  
Label19: TLabel;  
Label20: TLabel;  
Button2: TButton;  
CheckBox2: TCheckBox;  
Edit11: TEdit;  
Edit12: TEdit;  
Edit13: TEdit;  
Edit14: TEdit;  
Edit15: TEdit;  
Edit16: TEdit;  
Edit17: TEdit;  
Edit18: TEdit;  
Edit19: TEdit;  
Edit20: TEdit;  
Label9: TLabel;  
Series1: TFastLineSeries;  
ExcelApplication1: TExcelApplication;  
procedure Button1Click(Sender: TObject);  
procedure FormCreate(Sender: TObject);  
procedure CheckBox1Click(Sender: TObject);  
procedure Button2Click(Sender: TObject);  
procedure CheckBox2Click(Sender: TObject);  
procedure Edit13KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);  
procedure Edit14KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);  
procedure Edit15KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);  
procedure Edit16KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);  
procedure Edit19KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);  
procedure Edit12KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);  
procedure Edit18KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);  
procedure Edit17KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);  
procedure Edit1KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);  
procedure Edit2KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);  
procedure Edit3KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);  
procedure Edit4KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);  
procedure Edit5KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);  
procedure Edit8KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);  
procedure Edit10KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);  
procedure Edit7KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);  
procedure Edit6KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);  
private
```

```

    { Private declarations }
public
    { Public declarations }
end;

var
    Form1: TForm1;
    path:string;
implementation

{$R *.dfm}

procedure TForm1.Button1Click(Sender: TObject);
var
    Gam, C, Ad, Vg, G2_G1, L, dp, x1,x2, x3, x4,x5, x11,x22, x33, x44,x55,
    tau,mu, tau0, r_yad, u_yad, Mu_st_yad, Q_yad, R,ri, dr, f0, ii, gamma_1_r,
    mu_st, Tau0_yad: real;
    mju :array of real;
    gamma:array of real;
    f:array of real;
    f1:array of real;
    mju1 :array of real;
    gamma1:array of real;
    mue1:array of real;
    tau_0:array of real;
    u:array of real;
    du:array of real;
    i,j, kol, RR, CC :integer;
    WorkBk : _WorkBook; // определяем WorkBook
    WorkSheet : _WorkSheet; // определяем WorkSheet
    Index : OleVariant;
    TabGrid : Variant;
begin

    //Gam:=strtofloat(edit1.text);
    //C:=strtofloat(edit2.text);
    //Ad:=strtofloat(edit3.text);
    //Vg:=strtofloat(edit4.text);
    //G2_G1:=strtofloat(edit5.text);

    Gam:=0;
    C:=64.5;
    Ad:=25;
    Vg:=25;

```

```
G2_G1:=2;
```

```
R:=0;
```

```
if edit6.text<>" then dp:=strtofloat(edit6.text);
if edit7.text<>" then L:=strtofloat(edit7.text);
```

```
//R:=strtofloat(edit8.text);
```

```
if edit10.text<>" then ii:=strtofloat(edit10.text);
```

```
//gamma_1_r:=strtofloat(edit9.text);
```

```
{ x1:=(Gam-5.4)/3.6;
x2:=(C-64.5)/2.5;
x3:=(Ad-25)/10;
x4:=(Vg-25)/20;
x5:=(G2_G1-2)/1;
```

```
x11:=(Gam-28.8)/19.8;
x22:=(C-64.5)/2.5;
x33:=(Ad-25)/10;
x44:=(Vg-25)/20;
x55:=(G2_G1-2)/1; }
i:=0;
dr:=0.001;
```

```
/// первый режим
```

```
begin
if Gam<=9 then
begin
{ tau:=abs(9.03+3.35*x1-1.89*x1*x1+8.37*x2+4.55*x2*x2+1.44*x3+1.64*x3*x3-
1.92*x4*x4+9.08*x5+5.19*x5*x5+4.68*x1*x2+
2.96*x1*x2*x2-
1.33*x1*x1*x2+2.25*x1*x3+1.92*x1*x4+3.23*x1*x5+2.20*x1*x5*x5-
1.51*x1*x1*x5+3.71*x2*x3+
1.70*x2*x3*x3+3.01*x2*x2*x3+3.39*x2*x4-
1.39*x2*x4*x4+3.29*x2*x2*x4+7.30*x2*x5+5.13*x2*x5*x5+4.30*x2*x2*x5*x5+
2.91*x3*x5+1.84*x3*x5*x5+3.24*x4*x5+2.73*x4*x5*x5-1.31*x4*x4*x5);
//////////
```



```

mu:=1.35+0.33*x1*x1+1.29*x2+0.93*x2*x2+0.38*x3*x3-
0.38*x4*x4+1.40*x5+1.21*x5*x5-0.81*x1*x2-0.54*x1*x2*x2-
0.26*x1*x3-0.29*x1*x4-1.04*x1*x5-
0.91*x1*x5*x5+0.42*x1*x1*x5+0.80*x2*x3+0.45*x2*x3*x3+0.81*x2*x2*x3+
0.72*x2*x4+0.65*x2*x2+x4+1.74*x2*x5+1.25*x2*x5*x5+0.97*x2*x2*x5+0.69*x
2*x2*x5*x5+0.69*x3*x5+0.60*x3*x5*x5+
0.76*x4*x5+0.64*x4*x5*x5; }

tau:=-9049.59+514.97*Gam-0.141*Gam*Gam+280.38*C-
2.165*C*C+211.62*Ad-0.422*Ad*Ad+84.03*Vg+689.1*G2_G1*G2_G1-
16.47*Gam*C+
0.132*Gam*C*C+0.0626*Gam*Ad+0.0691*Gam*Vg-0.0009*Gam*Vg*Vg-
1.547*Gam*G2_G1+0.611*Gam*G2_G1*G2_G1-6.408*C*Ad+0.0068*C*Ad*Ad+
0.0482*C*C*Ad-2.673*C*Vg+0.0212*C*C*Vg+5.224*C*G2_G1-
23.48*C*G2_G1*G2_G1-0.0818*C*C*G2_G1+0.198*C*C*G2_G1*G2_G1+
0.0751*Ad*G2_G1*G2_G1-0.259*Vg*G2_G1+0.105*Vg*G2_G1*G2_G1;

mu:=-56.89-93.89*Gam-
0.0137*Gam*Gam+0.927*C+0.748*Ad*Ad+11.93*Vg+139.84*G2_G1+3.00*Gam
*C-0.024*Gam*C*C-0.00725*Gam*Ad-
0.00399*Gam*Vg+0.572*Gam*G2_G1-
0.306*Gam*G2_G1*G2_G1+0.00836*Gam*Gam*G2_G1*G2_G1-
0.0238*C*Ad*Ad+
0.000189*C*C*Ad*Ad-0.383*C*Vg-
0.000015*C*Vg*Vg+0.00309*C*C*Vg+1.204*C*G2_G1-4.80*C*G2_G1*G2_G1-
0.0196*C*C*G2_G1+
0.0411*C*C*G2_G1*G2_G1-
0.139*Ad*G2_G1+0.0519*Ad*G2_G1*G2_G1+0.00977*Vg*G2_G1*G2_G1;

//tau0:=abs(tau-(3.35-3.78*x1+4.68*x2+2.96*x2*x2-
2.66*x1*x2+2.25*x3+1.92*x4+3.23*x5+2.20*x5*x5-3.02*x1*x5)*Gam) ;
//////////
// mu_st:= 3.35-3.78*x1+4.68*x2+2.96*x2*x2-
2.66*x1*x2+2.25*x3+1.92*x4+3.23*x5+2.20*x5*x5-3.02*x1*x5;
if gam=0 then
tau0:=abs(abs(-9050.59+280.38*C-2.165*C*C+211.61*Ad-
0.422*Ad*Ad+84.03*Vg+689.1*G2_G1*G2_G1-6.409*C*Ad+0.0068*C*Ad*Ad+
0.0482*C*C*Ad-2.673*C*Vg+0.0212*C*C*Ad+5.224*C*G2_G1-
23.48*C*G2_G1*G2_G1-0.0818*C*C*G2_G1+0.198*C*C*G2_G1*G2_G1+

```

```

0.0751*Ad*G2_G1*G2_G1-0.259*Vg*G2_G1+0.105*Vg*G2_G1*G2_G1))
    else
        tau0:=abs(tau-(514.97-0.292*Gam-16.47*C+0.132*C*C+0.062*Ad+0.0691*Vg-
0.0009*Vg*Vg-1.547*G2_G1+0.611*G2_G1*G2_G1)*Gam) ;

        mu_st:=514.97-0.292*Gam-16.47*C+0.132*C*C+0.0626*Ad+0.0691*Vg-
0.0009*Vg*Vg-1.547*G2_G1+0.611*G2_G1*G2_G1;
    end
    else
    begin
    {
tau:=abs(21.9+10.86*x11+14.91*x22+11.01*x22*x22+4.92*x33+3.68*x33*x33+4.
72*x44+12.77*x55+9.54*x55*x55+

9.84*x11*x22+4.85*x11*x22*x22+4.87*x11*x33+5.26*x11*x44+3.38*x11*x44*x
44+4.00*x11*x55+3.67*x11*x55*x55+

7.35*x22*x33+2.39*x22*x33*x33+5.90*x22*x22*x33+8.71*x22*x44+5.18*x22*x
44*x44+8.64*x22*x22*x44+10.72*x22*x55+
    7.65*x22*x55*x55+6.12*x22*x22*x55+4.57*x22*x22*x55*x55-
2.13*x33*x33*x44+5.11*x33*x55+4.24*x33*x55*x55+
    4.43*x44*x55+3.36*x44*x55*x55); ////////////////
    mu:=1.35+0.33*x11*x11+1.29*x22+0.93*x22*x22+0.38*x33*x33-
0.38*x44*x44+1.40*x55+1.21*x55*x55-0.81*x11*x22-
    0.54*x11*x22*x22-0.26*x11*x33-0.29*x11*x44-1.04*x11*x55-
0.91*x11*x55*x55+0.42*x11*x11*x55+0.80*x22*x33+

0.45*x22*x33*x33+0.81*x22*x22*x33+0.72*x22*x44+0.65*x22*x22*x44+1.74*x
22*x55+1.25*x22*x55*x55+

0.97*x22*x22*x55+0.69*x22*x22*x55*x55+0.69*x33*x55+0.60*x33*x55*x55+0.
76*x44*x55*0.64*x44*x55*x55;
    }
    tau:=abs(13.849+143.82*Gam+7.319*Ad*Ad+5.488*Vg*Vg-
11407.89*G2_G1+3754.09*G2_G1*G2_G1-
    4.643*Gam*C+ 0.0375*Gam*C*C +0.0005 *Gam*Ad*Ad+0.000274*
Gam*Vg*Vg -
    0.541*Gam*G2_G1+ 0.186*Gam*G2_G1*G2_G1-0.233*C*Ad*Ad-
0.000421*C*C*Ad +0.00186*C*C*Ad*Ad+
    0.00964*C*Vg-0.174*C*Vg*Vg+0.00138*C*C*Vg*Vg+363.12* C*G2_G1-
119.86*C*G2_G1*G2_G1-2.883*C*C*G2_G1+
    0.954*C*C*G2_G1*G2_G1+0.00117 *Ad*Vg*Vg - 0.000023*Ad*Ad*Vg*Vg
+0.00854*Ad*Ad*G2_G1*G2_G1 -
    0.430*Vg*G2_G1+0.163*Vg*G2_G1*G2_G1);

```

```

mu:=-20.19-
9.75*Gam+0.00521*C*C+0.358*Ad*Ad+0.22*Vg*Vg+53.38*G2_G1*G2_G1+0.3
34*Gam*C-
0.00284*Gam*C*C-0.000378*Gam*Gam*C+0.000006*Gam*Gam*C*C -
0.000021*Gam*Ad*Ad-0.00169*Gam*Vg+
0.000025*Gam*Vg*Vg+0.0416*Gam*G2_G1-
0.0299*Gam*G2_G1*G2_G1+0.000231*Gam*Gam*G2_G1*G2_G1-
0.0113*C*Ad*Ad+
0.00009*C*C*Ad*Ad-
0.00696*C*Vg*Vg+0.000016*C*C*Vg+0.000055*C*C*Vg*Vg+0.306*C*G2_G1-
1.777*C*G2_G1*G2_G1-

0.00534*C*C*G2_G1+0.0150*C*C*G2_G1*G2_G1+0.000124*Ad*Ad*G2_G1*G
2_G1+0.00319*Vg*G2_G1*G2_G1;

tau0:=abs(tau-(143.82-4.643*C+0.0375*C*C+0.0005*Ad*Ad+0.00027*Vg*Vg-
0.541*G2_G1+0.186*G2_G1*G2_G1)*Gam );
mu_st:=143.82-4.643*C+0.0375*C*C+0.0005*Ad*Ad+0.00027*Vg*Vg-
0.541*G2_G1+0.186*G2_G1*G2_G1;
//tau0:=abs(tau-(10.86-9.84*x22+4.85*x22*x22+4.87*x33-
5.26*x44+3.385*x44*x44+4.00*x55+3.67*x55*x55)*Gam ); ////////////////
// mu_st:= 10.86-9.84*x22+4.85*x22*x22+4.87*x33-
5.26*x44+3.385*x44*x44+4.00*x55+3.67*x55*x55;
end;

// Label11.Caption:='Для первого режима '+#13+'tau =
'+FloatToStrF(tau,ffFixed,10,4) +#13+'mju_e = '+ floattostrf( mu,ffFixed,10,4)
+#13+ 'tau_0 = '+floattostrf( tau0,ffFixed,10,4) +#13+'mju_st = '+ floattostrf(
mu_st,ffFixed,10,4) ;
Label11.Caption:='Для первого режима '+#13+'tau = '+FloatToStr(tau)
+#13+'mju_e = '+ floattostrf( mu,ffFixed,10,4) +#13+ 'tau_0 = '+floattostrf(
tau0,ffFixed,10,4) +#13+'mju_st = '+ floattostrf( mu_st,ffFixed,10,4) ;

end;
{
Chart1.Series[0].Clear;
//////////////////// rejim 2
// Соединяемся с сервером TExcelApplication
ExcelApplication1.Connect;
// Добавляем WorkBooks в ExcelApplication
ExcelApplication1.WorkBooks.Add(path+'1111.xls',0);
// Выбираем первую Workbook
WorkBk := ExcelApplication1.ActiveWorkbook;
// Определяем первый WorkSheet
WorkSheet := WorkBk.WorkSheets.Get_Item(1) as _WorkSheet;

```

```

Tau0_yad:= 9.03+3.35*x1-
1.89*x1*x1+8.37*x2+4.55*x2*x2+1.44*x3+1.64*x3*x3-
1.92*x4*x4+9.08*x5+5.19*x5*x5+4.68*x1*x2+
  2.96*x1*x2*x2-
1.33*x1*x1*x2+2.25*x1*x3+1.92*x1*x4+3.23*x1*x5+2.20*x1*x5*x5-
1.51*x1*x1*x5+3.71*x2*x3+
  1.70*x2*x3*x3+3.01*x2*x2*x3+3.39*x2*x4-
1.39*x2*x4*x4+3.29*x2*x2*x4+7.30*x2*x5+5.13*x2*x5*x5+4.30*x2*x2*x5*x5+
  2.91*x3*x5+1.84*x3*x5*x5+3.24*x4*x5+2.73*x4*x5*x5-1.31*x4*x4*x5;

```

```

Mu_st_yad:=3.35-3.78*x1+4.68*x2+2.96*x2*x2-
2.66*x1*x2+2.25*x3+1.92*x4+3.23*x5+2.20*x5*x5-3.02*x1*x5;

```

```

  if edit10.text="" then
r_yad:=Tau0_yad*2*L/dp
else
r_yad:=Tau0_yad*2*(1/ii) ;

```

```

if edit10.text="" then
u_yad:= 1/Mu_st_yad*(dp/(4*L)*(R*R-r_yad)-tau0*(R*R-r_yad))
else
  u_yad:= 1/Mu_st_yad*(ii/(4)*(R*R-r_yad)-tau0*(R*R-r_yad));
Q_yad:=3.14159*r_yad*r_yad*u_yad;

```

```

ri:=r_yad;

```

```

Label12.Caption:='Для второго режима '+#13+'Tau0_yad = '+floattostr(
Tau0_yad) +#13+'Mu_st_yad = '+ floattostr( Mu_st_yad) +#13+ 'r_yad =
'+floattostr( r_yad) +#13+' Q_yad = '+ floattostr( Q_yad) ;

```

```

  if r_yad<0 then

```

```

kol:= round((R+ abs(r_yad))/dr)+1
else
kol:= round((R-r_yad)/dr)+1 ;
CC:=10;
setlength (mju, kol);
setlength (gamma, kol);
setlength (f, kol);
setlength (f1, kol);
setlength (mju1, kol);
setlength (gamma1, kol);
setlength (mue1, kol);

```

```

setlength (tau_0,kol);
setlength (u, kol);
setlength (du, kol);
TabGrid := VarArrayCreate([0,(kol - 1),0,(20)],VarOleStr);

```

```

gamma[0]:= 0;
  if edit10.text="" then
f0:= (-3.78-2.66*x2)*1/Mu_st_yad*dp/(2*L)
else
f0:= (-3.78-2.66*x2)*1/Mu_st_yad*ii/(2) ;
f1[0]:=f0;
mju[0]:= Mu_st_yad;

```

```

Worksheet.Cells.Item[1,1].value:= 'r ';
Worksheet.Cells.Item[1,2].value:= 'u ';
Worksheet.Cells.Item[1,3].value:= 'mju_1_1 ';
Worksheet.Cells.Item[1,4].value:= 'mju_1 ';
Worksheet.Cells.Item[1,5].value:= 'mue1 ';
Worksheet.Cells.Item[1,6].value:= 'gamma_1_1';
Worksheet.Cells.Item[1,7].value:= 'gamma_1';
Worksheet.Cells.Item[1,8].value:= 'f_1_1';
Worksheet.Cells.Item[1,9].value:= 'f_1';
Worksheet.Cells.Item[1,10].value:= 'delta_u';

```

```

while (ri<=R) do
begin
  if edit10.text="" then
  begin
    mju[i+1]:= mju[i]+ (-3.78-2.66*x2)*1/mju[i]*dp/(2*L)*dr ;
    gamma[i+1]:=1/mju[i+1]*dp/(2*L)*dr;
    f[i+1]:=1/mju[i+1]*dp/(2*L)*(-3.78-2.66*x2);

```

```

  end
else
begin
  mju[i+1]:= mju[i]+ (-3.78-2.66*x2)*1/mju[i]*ii/(2)*dr ;
  gamma[i+1]:=1/mju[i+1]*ii/(2)*dr;
  f[i+1]:=1/mju[i+1]*ii/(2)*(-3.78-2.66*x2);
end;

```

```

f1[i+1]:=0.5*(f[i+1]+ f1[i]);
mju1[i+1]:= mju1[i]+ f1[i+1]*dr;
  if edit10.text="" then
  gamma1[i+1]:=1/ mju1 [i+1]*dp/(2*L)*dr
else

```

$\text{gamma1}[i+1]:=1/\text{mju1}[i+1]*ii/(2)*\text{dr};$

if $\text{gamma1}[i+1]\leq 9$ then

$\text{mue1}[i+1]:=1.35+0.33*x1*x1+1.29*x2+0.93*x2*x2+0.38*x3*x3-$
 $0.38*x4*x4+1.40*x5+1.21*x5*x5-0.81*x1*x2-0.54*x1*x2*x2-$
 $0.26*x1*x3-0.29*x1*x4-1.04*x1*x5-$
 $0.91*x1*x5*x5+0.42*x1*x1*x5+0.80*x2*x3+0.45*x2*x3*x3+0.81*x2*x2*x3+$
 $0.72*x2*x4+0.65*x2*x2*x4+1.74*x2*x5+1.25*x2*x5*x5+0.97*x2*x2*x5+0.69*x$
 $2*x2*x5*x5+0.69*x3*x5+0.60*x3*x5*x5+$
 $0.76*x4*x5+0.64*x4*x5*x5$

else

$\text{mue1}[i+1]:=1.35+0.33*x11*x11+1.29*x22+0.93*x22*x22+0.38*x33*x33-$
 $0.38*x44*x44+1.40*x55+1.21*x55*x55-0.81*x11*x22-$
 $0.54*x11*x22*x22-0.26*x11*x33-0.29*x11*x44-1.04*x11*x55-$
 $0.91*x11*x55*x55+0.42*x11*x11*x55+0.80*x22*x33+$
 $0.45*x22*x33*x33+0.81*x22*x22*x33+0.72*x22*x44+0.65*x22*x22*x44+1.74*x$
 $22*x55+1.25*x22*x55*x55+$
 $0.97*x22*x22*x55+0.69*x22*x22*x55*x55+0.69*x33*x55+0.60*x33*x55*x55+0.$
 $76*x44*x55*0.64*x44*x55*x55;$

$\text{tau}_0[i+1]:=(\text{mue1}[i+1]-\text{mju1}[i+1])* \text{gamma1}[i+1];$

$\text{ri}:=\text{ri}+\text{dr};$

if $\text{edit10.text}=""$ then

$\text{u}[i+1]:=1/\text{mue1}[i+1]*(\text{dp}/(4*L))*(R*R-\text{ri}*ri)-\text{Tau0}*(R*R-\text{ri})$

else

$\text{u}[i+1]:=1/\text{mue1}[i+1]*(ii/(4))*(R*R-\text{ri}*ri)-\text{Tau0}*(R*R-\text{ri});$

$\text{du}[i+1]:= \text{u}[i+1]*(2*3.14159*ri*\text{dr}+\text{dr}*\text{dr}*3.14159);$ //????????????

$\text{TabGrid}[I,0]:=ri; // r$

$\text{TabGrid}[I,1]:=u[i+1]; // \text{скороть}$

$\text{TabGrid}[I,2]:=mju[i+1]; //mju_1_1$

$\text{TabGrid}[I,3]:=mju1[i+1]; // mju_1$

$\text{TabGrid}[I,4]:=mue1[i+1];$

$\text{TabGrid}[I,5]:=gamma[i+1]; //gamma_1_1$

$\text{TabGrid}[I,6]:=gamma1[i+1]; // gamma_1$

$\text{TabGrid}[I,7]:=f[i+1]; //f_1_1$

$\text{TabGrid}[I,8]:=f1[i+1]; //f_1$

$\text{TabGrid}[I,9]:=du[i+1]; //delta_u$

$\text{inc}(i,1);$

```

Series1.AddXY(ri,u[i+1]);
end;
Worksheet.Range['A2',Worksheet.Cells.Item[kol+2,CC]].Value2:= TabGrid;
Worksheet.Range['A1',Worksheet.Cells.Item[kol+2,CC]].HorizontalAlignment:=xlLeft;
WorkBk.SaveAs(path+'rez.xls',xlNormal,"",false,false,xlShared,xlUserResolution,false,EmptyParam,EmptyParam,false,0);
// Показываем Excel
ExcelApplication1.Visible[0] := True;
// Разрываем связь с сервером
ExcelApplication1.Disconnect;
// Unassign the Delphi Variant Matrix
TabGrid := Unassigned; }
end;
procedure TForm1.Button2Click(Sender: TObject);
var
Gam, C, Ad, Vg, G2_G1, L, dp, x1,x2, x3, x4,x5, x11,x22, x33, x44,x55,
tau,mu, tau0, r_yad, u_yad, Mu_st_yad, Q_yad, R,ri, dr, f0, ii, gamma_1_r,
mu_st, Tau0_yad, sum_q,U_sech: real;
mju :array of real;
gamma:array of real;
f:array of real;
f1:array of real;
mju1 :array of real;
gamma1:array of real;
mue1:array of real;
tau_0:array of real;
u:array of real;
dQ:array of real;
i,j, kol, RR, CC :integer;
WorkBk : _WorkBook; // определяем WorkBook
WorkSheet : _WorkSheet; // определяем WorkSheet
Index : OleVariant;
TabGrid : Variant;
begin

Gam:=0;//strtofloat(edit11.text);
C:=strtofloat(edit13.text);
Ad:=strtofloat(edit14.text);
Vg:=strtofloat(edit15.text);
G2_G1:=strtofloat(edit16.text);

if edit17.text<>" then dp:=strtofloat(edit17.text);
if edit18.text<>" then L:=strtofloat(edit18.text);

```

```
R:=strtofloat(edit19.text);
```

```
if edit12.text<>" then ii:=strtofloat(edit12.text);
```

```
//gamma_1_r:=strtofloat(edit9.text);
```

```
{x1:=(Gam-5.4)/3.6;
```

```
x2:=(C-64.5)/2.5;
```

```
x3:=(Ad-25)/10;
```

```
x4:=(Vg-25)/20;
```

```
x5:=(G2_G1-2)/1;
```

```
x11:=(Gam-28.8)/19.8;
```

```
x22:=(C-64.5)/2.5;
```

```
x33:=(Ad-25)/10;
```

```
x44:=(Vg-25)/20;
```

```
x55:=(G2_G1-2)/1; }
```

```
i:=0;
```

```
dr:=0.001;
```

```
{
```

```
/// первый режим
```

```
begin
```

```
if Gam<=9 then
```

```
begin
```

```
tau:=9.03+3.35*x1-1.89*x1*x1+8.37*x2+4.55*x2*x2+1.44*x3+1.64*x3*x3-  
1.92*x4*x4+9.08*x5+5.19*x5*x5+4.68*x1*x2+  
2.96*x1*x2*x2-
```

```
1.33*x1*x1*x2+2.25*x1*x3+1.92*x1*x4+3.23*x1*x5+2.20*x1*x5*x5-
```

```
1.51*x1*x1*x5+3.71*x2*x3+
```

```
1.70*x2*x3*x3+3.01*x2*x2*x3+3.39*x2*x4-
```

```
1.39*x2*x4*x4+3.29*x2*x2*x4+7.30*x2*x5+5.13*x2*x5*x5+4.30*x2*x2*x5*x5+  
2.91*x3*x5+1.84*x3*x5*x5+3.24*x4*x5+2.73*x4*x5*x5-1.31*x4*x4*x5;
```

```
mu:=1.35+0.33*x1*x1+1.29*x2+0.93*x2*x2+0.38*x3*x3-
```

```
0.38*x4*x4+1.40*x5+1.21*x5*x5-0.81*x1*x2-0.54*x1*x2*x2-
```

```
0.26*x1*x3-0.29*x1*x4-1.04*x1*x5-
```

```
0.91*x1*x5*x5+0.42*x1*x1*x5+0.80*x2*x3+0.45*x2*x3*x3+0.81*x2*x2*x3+
```

```
0.72*x2*x4+0.65*x2*x2*x4+1.74*x2*x5+1.25*x2*x5*x5+0.97*x2*x2*x5+0.69*x  
2*x2*x5*x5+0.69*x3*x5+0.60*x3*x5*x5+
```

```
0.76*x4*x5+0.64*x4*x5*x5;
```

```
tau0:=tau-(3.35-3.78*x1+4.68*x2+2.96*x2*x2-
```

```
2.66*x1*x2+2.25*x3+1.92*x4+3.23*x5+2.20*x5*x5-3.02*x1*x5)*Gam ;
```

```
mu_st:= 3.35-3.78*x1+4.68*x2+2.96*x2*x2-
```

```
2.66*x1*x2+2.25*x3+1.92*x4+3.23*x5+2.20*x5*x5-3.02*x1*x5;
```

```
end
```



```
else
begin
```

```
tau:=21.9+10.86*x11+14.91*x22+11.01*x22*x22+4.92*x33+3.68*x33*x33+4.72*x
44+12.77*x55+9.54*x55*x55+
```

```
9.84*x11*x22+4.85*x11*x22*x22+4.87*x11*x33+5.26*x11*x44+3.38*x11*x44*x
44+4.00*x11*x55+3.67*x11*x55*x55+
```

```
7.35*x22*x33+2.39*x22*x33*x33+5.90*x22*x22*x33+8.71*x22*x44+5.18*x22*x
44*x44+8.64*x22*x22*x44+10.72*x22*x55+
```

```
7.65*x22*x55*x55+6.12*x22*x22*x55+4.57*x22*x22*x55*x55-
2.13*x33*x33*x44+5.11*x33*x55+4.24*x33*x55*x55+
4.43*x44*x55+3.36*x44*x55*x55;
```

```
mu:=1.35+0.33*x11*x11+1.29*x22+0.93*x22*x22+0.38*x33*x33-
0.38*x44*x44+1.40*x55+1.21*x55*x55-0.81*x11*x22-
```

```
0.54*x11*x22*x22-0.26*x11*x33-0.29*x11*x44-1.04*x11*x55-
0.91*x11*x55*x55+0.42*x11*x11*x55+0.80*x22*x33+
```

```
0.45*x22*x33*x33+0.81*x22*x22*x33+0.72*x22*x44+0.65*x22*x22*x44+1.74*x
22*x55+1.25*x22*x55*x55+
```

```
0.97*x22*x22*x55+0.69*x22*x22*x55*x55+0.69*x33*x55+0.60*x33*x55*x55+0.
76*x44*x55*0.64*x44*x55*x55;
```

```
tau0:=tau-(10.86-9.84*x22+4.85*x22*x22+4.87*x33-
5.26*x44+3.385*x44*x44+4.00*x55+3.67*x55*x55)*Gam ;
```

```
// mu_st:= 10.86-9.84*x22+4.85*x22*x22+4.87*x33-
5.26*x44+3.385*x44*x44+4.00*x55+3.67*x55*x55;
```

```
end;
```

```
Label11.Caption:='Для первого режима '+#13+'tau = '+floattostr( tau)
+#13+'mju_e = '+ floattostr( mu) +#13+ 'tau_0 = '+floattostr( tau0) +#13+'mju_st =
'+ floattostr( mu_st) ;
```

```
end;
```

```
}
```

```
Chart1.Series[0].Clear;
```

```
////////// режим 2
```

```
// Соединяемся с сервером TExcelApplication
```

```
ExcelApplication1.Connect;
```

```
// Добавляем WorkBooks в ExcelApplication
```

```
ExcelApplication1.WorkBooks.Add(path+'1111.xls',0);
```

```
// Выбираем первую Workbook
```

```
WorkBk := ExcelApplication1.ActiveWorkbook;
```

```
// Определяем первый Worksheet
```

WorkSheet := WorkBk.WorkSheets.Get_Item(1) as _Worksheet;

```
Tau0_yad:= abs(-9049.59+514.97*Gam-0.146*Gam*Gam+280.38*C-
2.165*C*C+211.61*Ad-0.422*Ad*Ad+84.03*Vg+689.1*G2_G1*G2_G1-
16.47*Gam*C+
0.132*Gam*C*C+0.0626*Gam*Ad+0.0691*Gam*Vg-0.0009*Gam*Vg*Vg-
1.547*Gam*G2_G1+0.611*Gam*G2_G1*G2_G1-6.409*C*Ad+0.0068*C*Ad*Ad+
0.0482*C*C*Ad-2.673*C*Vg+0.0212*C*C*Ad+5.224*C*G2_G1-
23.48*C*G2_G1*G2_G1-0.0818*C*C*G2_G1+0.198*C*C*G2_G1*G2_G1+
0.0751*Ad*G2_G1*G2_G1-0.259*Vg*G2_G1+0.105*Vg*G2_G1*G2_G1);
```

////////////////////////////////////

```
Mu_st_yad:=abs(514.97-0.292*Gam-
16.47*C+0.132*C*C+0.0626*Ad+0.0691*Vg-0.0009*Vg*Vg-
1.547*G2_G1+0.611*G2_G1*G2_G1);
if checkbox2.Checked=true then
r_yad:=Tau0_yad*2*L/dp
else
r_yad:=Tau0_yad*2*(1/ii) ;
if checkbox2.Checked=true then
u_yad:= 1/Mu_st_yad*(dp/(4*L))*(R*R-r_yad*r_yad)-Tau0_yad*(R-r_yad)
else
u_yad:= 1/Mu_st_yad*(ii/(4))*(R*R-r_yad*r_yad)-Tau0_yad*(R-r_yad));
Q_yad:=3.14159*r_yad*r_yad*u_yad;
ri:=r_yad;
```

```
Label12.Caption:='Для второго режима '+#13+'Tau0_yad = '+floattostrf(
Tau0_yad,ffFixed,10,6) +#13+'Mu_st_yad = '+ floattostrf( Mu_st_yad,ffFixed,10,6)
+#13+' r_yad = '+floattostrf( r_yad,ffFixed,10,6) +#13+' Q_yad = '+ floattostrf(
Q_yad,ffFixed,10,8) ;
```

```
if r_yad<0 then
```

```
kol:= round((R+ abs(r_yad))/dr)+2
else
kol:= round((R-r_yad)/dr)+2 ;
CC:=10;
```

```
setlength (mju, kol);
setlength (gamma, kol);
setlength (f, kol);
setlength (f1, kol);
setlength (mju1, kol);
setlength (gamma1, kol);
setlength (mue1, kol);
```

```

setlength (tau_0,kol);
setlength (u, kol);
setlength (dQ, kol);
TabGrid := VarArrayCreate([0,(kol - 1),0,(20)],VarOleStr);
// gamma[0]:= 0;
if checkbox2.Checked=true then
f0:= (-0.292)*1/Mu_st_yad*dp/(2*L)
else
f0:= (-0.292)*1/Mu_st_yad*ii/(2) ;
f1[0]:=f0;
mju[0]:= Mu_st_yad;
mju1[0]:= Mu_st_yad;
////////////////////////////////////
TabGrid[I,0]:=ri; // r
TabGrid[I,2]:=mju[i]; //mju_1_1
TabGrid[I,3]:=mju1[i]; // mju_1
if checkbox2.Checked=true then
begin
TabGrid[I,5]:=1/mju[i]*dp/(2*L)*dr ; //gamma_1_1
TabGrid[I,6]:=1/mju1[i]*dp/(2*L)*dr; // gamma_1
TabGrid[I,7]:=1/mju[i]*dp/(2*L)*(-0.292); //f_1_1
//TabGrid[I,1]:= 1/mju1[i]*(dp/(4*L)*(R*R-ri*ri)-Tau0*(R*R-ri)) ; //////////////////////////////////
end
else
begin
TabGrid[I,5]:=0;// 1/mju[i]*ii/(2)*dr; //gamma_1_1
TabGrid[I,6]:=0;//1/mju1[i]*ii/(2)*dr; //gamma_1
TabGrid[I,7]:=1/mju[i]*ii/(2)*(-0.292); //f_1_1
// TabGrid[I,1]:= 1/mju1[i]*(ii/(4)*(R*R-ri*ri)-Tau0*(R*R-ri)) ; //////////////////////////////////
end;

if TabGrid[I,6]<=9 then
TabGrid[I,4]:= -56.89-93.89*TabGrid[I,6]-
0.0137*TabGrid[I,6]*TabGrid[I,6]+0.927*C+0.748*Ad*Ad+11.93*Vg+
139.84*G2_G1+3.00*TabGrid[I,6]*C-0.024*TabGrid[I,6]*C*C-
0.00725*TabGrid[I,6]*Ad-
0.00399*TabGrid[I,6]*Vg+0.572*TabGrid[I,6]*G2_G1-
0.306*TabGrid[I,6]*G2_G1*G2_G1+
0.00836*TabGrid[I,6]*TabGrid[I,6]*G2_G1*G2_G1-0.0238*C*Ad*Ad+
0.000189*C*C*Ad*Ad-0.383*C*Vg-
0.000015*C*Vg*Vg+0.00309*C*C*Vg+1.204*C*G2_G1-4.80*C*G2_G1*G2_G1-
0.0196*C*C*G2_G1+
0.0411*C*C*G2_G1*G2_G1-
0.139*Ad*G2_G1+0.0519*Ad*G2_G1*G2_G1+0.00977*Vg*G2_G1*G2_G1
else

```

```

TabGrid[I,4]:=-20.19-
9.75*TabGrid[I,6]+0.00521*C*C+0.358*Ad*Ad+0.22*Vg*Vg+53.38*G2_G1*G2_
G1+0.334*TabGrid[I,6]*C-
0.00284*TabGrid[I,6]*C*C-
0.000378*TabGrid[I,6]*TabGrid[I,6]*C+0.000006*TabGrid[I,6]*TabGrid[I,6]*C*C
-
0.000021*TabGrid[I,6]*Ad*Ad-0.00169*TabGrid[I,6]*Vg+
0.000025*TabGrid[I,6]*Vg*Vg+
0.0416*TabGrid[I,6]*G2_G1-
0.0299*TabGrid[I,6]*G2_G1*G2_G1+0.000231*TabGrid[I,6]*TabGrid[I,6]*G2_G1
*G2_G1-0.0113*C*Ad*Ad+
0.00009*C*C*Ad*Ad-
0.00696*C*Vg*Vg+0.000016*C*C*Vg+0.000055*C*C*Vg*Vg+0.306*C*G2_G1-
1.777*C*G2_G1*G2_G1-

0.00534*C*C*G2_G1+0.0150*C*C*G2_G1*G2_G1+0.000124*Ad*Ad*G2_G1*G
2_G1+0.00319*Vg*G2_G1*G2_G1;

gamma1[i]:= TabGrid[I,6];
gamma[i]:= TabGrid[I,5];
Tau_0[i]:= Tau0_yad;//( mue1[i]- mju1[i])* gamma1[i];

if checkbox2.Checked=true then
begin
u[i]:= 1/mju1[i]*(dp/(4*L)*(R*R-ri*ri)-Tau_0[i]*(R-ri)) ; ////////////////////////////////////////////////////
end
else
begin
u[i]:= 1/mju1[i]*(ii/(4)*(R*R-ri*ri)-Tau_0[i]*(R-ri)) ; ////////////////////////////////////////////////////
end;
TabGrid[I,1]:= u[i];
{
TabGrid[I,4]:=1.35+0.33*TabGrid[I,6]*TabGrid[I,6]+1.29*x2+0.93*x2*x2+0.38*x3
*x3-0.38*x4*x4+1.40*x5+1.21*x5*x5-0.81*x1*x2-0.54*x1*x2*x2-
0.26*x1*x3-0.29*x1*x4-1.04*x1*x5-
0.91*x1*x5*x5+0.42*x1*x1*x5+0.80*x2*x3+0.45*x2*x3*x3+0.81*x2*x2*x3+
0.72*x2*x4+0.65*x2*x2+x4+1.74*x2*x5+1.25*x2*x5*x5+0.97*x2*x2*x5+0.69*x
2*x2*x5*x5+0.69*x3*x5+0.60*x3*x5*x5+
0.76*x4*x5+0.64*x4*x5*x5; //эффект вяз
}
TabGrid[I,8]:=f1[i]; //f_1
TabGrid[I,9]:=u[i]*(2*3.14159*ri*dr+dr*dr*3.14159); //delta_Q
dQ[i]:=TabGrid[I,9];
sum_q:=u[i]*(2*3.14159*ri*dr+dr*dr*3.14159);

```

```

Series1.AddXY(ri,u[i]);
//////////
Worksheet.Cells.Item[1,1].value:= 'r ';
Worksheet.Cells.Item[1,2].value:= 'u ';
Worksheet.Cells.Item[1,3].value:= 'mju_1_1 ';
Worksheet.Cells.Item[1,4].value:= 'mju_1 ';
Worksheet.Cells.Item[1,5].value:= 'mue1 ';
Worksheet.Cells.Item[1,6].value:= 'gamma_1_1';
Worksheet.Cells.Item[1,7].value:= 'gamma_1';
Worksheet.Cells.Item[1,8].value:= 'f_1_1';
Worksheet.Cells.Item[1,9].value:= 'f_1';
Worksheet.Cells.Item[1,10].value:= 'delta_Q';
while (ri<=R) do
begin
if checkbox2.Checked=true then
begin
mju[i+1]:= mju[i]+ (-0.292)*1/mju[i]*dp/(2*L)*dr ; // MЮ 1_1
gamma[i+1]:=1.0/mju[i+1]*dp/(2*L)*dr;
f[i+1]:=1.0/mju[i+1]*dp/(2*L)*(-0.292);

end
else
begin
mju[i+1]:= mju[i]+ (-0.292)*1/mju[i]*ii/(2)*dr ; // MЮ 1_1
gamma[i+1]:=1.0/mju[i+1]*ii/(2)*dr;
f[i+1]:=1.0/mju[i+1]*ii/(2)*(-0.292);
end;

f1[i+1]:=0.5*(f[i+1]+ f1[i]);
mju1[i+1]:= mju1[i]+ f1[i+1]*dr;

if checkbox2.Checked=true then
gamma1[i+1]:=1.0/ mju1 [i+1]*dp/(2*L)*dr
else
gamma1[i+1]:=1.0/ mju1 [i+1]*ii/(2)*dr;

if gamma1[i+1]<=9 then
{
mue1[i+1]:=1.35+0.33*gamma1[i+1]*gamma1[i+1]+1.29*x2+0.93*x2*x2+0.38*x3
*x3-0.38*x4*x4+1.40*x5+1.21*x5*x5-0.81*x1*x2-0.54*x1*x2*x2-
0.26*x1*x3-0.29*x1*x4-1.04*x1*x5-
0.91*x1*x5*x5+0.42*x1*x1*x5+0.80*x2*x3+0.45*x2*x3*x3+0.81*x2*x2*x3+
0.72*x2*x4+0.65*x2*x2+x4+1.74*x2*x5+1.25*x2*x5*x5+0.97*x2*x2*x5+0.69*x
2*x2*x5*x5+0.69*x3*x5+0.60*x3*x5*x5+

```

```

0.76*x4*x5+0.64*x4*x5*x5 }
begin
  mue1[i+1]:= -56.89-93.89*gamma1[i+1]-
0.0137*gamma1[i+1]*gamma1[i+1]+0.927*C+0.748*Ad*Ad+11.93*Vg+
  139.84*G2_G1+3.00*gamma1[i+1]*C-0.024*gamma1[i+1]*C*C-
0.00725*gamma1[i+1]*Ad-
  0.00399*gamma1[i+1]*Vg+0.572*gamma1[i+1]*G2_G1-
0.306*gamma1[i+1]*G2_G1*G2_G1+
  0.00836*gamma1[i+1]*gamma1[i+1]*G2_G1*G2_G1-0.0238*C*Ad*Ad+
  0.000189*C*C*Ad*Ad-0.383*C*Vg-
0.000015*C*Vg*Vg+0.00309*C*C*Vg+1.204*C*G2_G1-4.80*C*G2_G1*G2_G1-
0.0196*C*C*G2_G1+
  0.0411*C*C*G2_G1*G2_G1-
0.139*Ad*G2_G1+0.0519*Ad*G2_G1*G2_G1+0.00977*Vg*G2_G1*G2_G1 ;

  tau_0[i+1]:=abs(-9050.59+514.97*gamma1[i+1]-
0.146*gamma1[i+1]*gamma1[i+1]+280.38*C-2.165*C*C+211.61*Ad-
0.422*Ad*Ad+84.03*Vg+689.1*G2_G1*G2_G1-16.47*gamma1[i+1]*C+
  0.132*gamma1[i+1]*C*C+0.0626*gamma1[i+1]*Ad+0.0691*gamma1[i+1]*Vg-
0.0009*gamma1[i+1]*Vg*Vg-
1.547*gamma1[i+1]*G2_G1+0.611*gamma1[i+1]*G2_G1*G2_G1-
6.409*C*Ad+0.0068*C*Ad*Ad+
  0.0482*C*C*Ad-2.673*C*Vg+0.0212*C*C*Ad+5.224*C*G2_G1-
23.48*C*G2_G1*G2_G1-0.0818*C*C*G2_G1+0.198*C*C*G2_G1*G2_G1+
  0.0751*Ad*G2_G1*G2_G1-0.259*Vg*G2_G1+0.105*Vg*G2_G1*G2_G1)-
gamma1[i+1]*mju1[i+1];
  end
else
begin
  {
mue1[i+1]:=1.35+0.33*gamma1[i+1]*gamma1[i+1]+1.29*x22+0.93*x22*x22+0.38
*x33*x33-0.38*x44*x44+1.40*x55+1.21*x55*x55-0.81*x11*x22-
  0.54*x11*x22*x22-0.26*x11*x33-0.29*x11*x44-1.04*x11*x55-
0.91*x11*x55*x55+0.42*x11*x11*x55+0.80*x22*x33+
0.45*x22*x33*x33+0.81*x22*x22*x33+0.72*x22*x44+0.65*x22*x22*x44+1.74*x
22*x55+1.25*x22*x55*x55+
0.97*x22*x22*x55+0.69*x22*x22*x55*x55+0.69*x33*x55+0.60*x33*x55*x55+0.
76*x44*x55*0.64*x44*x55*x55; }
  mue1[i+1]:= -20.19-
9.75*gamma1[i+1]+0.00521*C*C+0.358*Ad*Ad+0.22*Vg*Vg+53.38*G2_G1*G2
_G1+0.334*gamma1[i+1]*C-

```

```

0.00284*gamma1[i+1]*C*C-
0.000378*gamma1[i+1]*gamma1[i+1]*C+0.000006*gamma1[i+1]*gamma1[i+1]*C
*C-
0.000021*gamma1[i+1]*Ad*Ad-0.00169*gamma1[i+1]*Vg+
0.000025*gamma1[i+1]*Vg*Vg+
0.0416*gamma1[i+1]*G2_G1-
0.0299*gamma1[i+1]*G2_G1*G2_G1+0.000231*gamma1[i+1]*gamma1[i+1]*G2_
G1*G2_G1-0.0113*C*Ad*Ad+
0.00009*C*C*Ad*Ad-
0.00696*C*Vg*Vg+0.000016*C*C*Vg+0.000055*C*C*Vg*Vg+0.306*C*G2_G1-
1.777*C*G2_G1*G2_G1-

0.00534*C*C*G2_G1+0.0150*C*C*G2_G1*G2_G1+0.000124*Ad*Ad*G2_G1*G
2_G1+0.00319*Vg*G2_G1*G2_G1;
tau_0[i+1]:=abs(13.849+143.82*gamma1[i+1]+7.319*Ad*Ad+5.488*Vg*Vg-
11407.89*G2_G1+3754.09*G2_G1*G2_G1-
4.643*gamma1[i+1]*C+ 0.0375*gamma1[i+1]*C*C +0.0005
*gamma1[i+1]*Ad*Ad+0.000274* gamma1[i+1]*Vg*Vg -
0.541*gamma1[i+1]*G2_G1+ 0.186*gamma1[i+1]*G2_G1*G2_G1-
0.233*C*Ad*Ad-0.000421*C*C*Ad +0.00186*C*C*Ad*Ad+
0.00964*C*Vg-0.174*C*Vg*Vg+0.00138*C*C*Vg*Vg+363.12* C*G2_G1-
119.86*C*G2_G1*G2_G1-2.883*C*C*G2_G1+
+0.954*C*C*G2_G1*G2_G1+0.00117 *Ad*Vg*Vg - 0.000023*Ad*Ad*Vg*Vg
+0.00854*Ad*Ad*G2_G1*G2_G1 -
0.430*Vg*G2_G1+0.163*Vg*G2_G1*G2_G1)-gamma1[i+1]*mju1[i+1];
end;
// tau_0[i+1]:= ((mue1[i+1]- mju1[i+1])* gamma1[i+1]); ////////////////
ri:=ri+dr;

if checkbox2.Checked=true then
u[i+1]:=1.0/mju1[i+1]*(dp/(4*L)*(R*R-ri*ri)-tau_0[i+1]*(R-ri)) ///
else
u[i+1]:=1.0/mju1[i+1]*(ii/(4)*(R*R-ri*ri)-tau_0[i+1]*(R-ri)) ; ///

dQ[i+1]:= u[i+1]*(2*3.14159*ri*dr+dr*dr*3.14159); ///???????????
// ri:=ri+dr;
if ri<=R then
sum_q:=sum_q+ dQ[i+1];

TabGrid[I+1,0]:=ri; // r
TabGrid[I+1,1]:=u[i+1]; // скорость
TabGrid[I+1,2]:=mju1[i+1]; //mju_1_1
TabGrid[I+1,3]:=mju1[i+1]; // mju_1
TabGrid[I+1,4]:=mue1[i+1]; //эффект вяз
TabGrid[I+1,5]:=gamma1[i+1]; //gamma_1_1

```

```

TabGrid[I+1,6]:=gamma1[i+1]; // gamma_1
TabGrid[I+1,7]:=f[i+1]; //f_1_1
TabGrid[I+1,8]:=f1[i+1]; //f_1
TabGrid[I+1,9]:=dQ[i+1]; //delta_Q
inc(i,1);
Series1.AddXY(ri,u[i]);
end;
U_sech:= sum_q/(R*R*3.14159) ;

Label12.Caption:= Label12.Caption+#13+#13+'Средний расход по сечению '
+floattostr(sum_q) + #13+#13+'Средняя скорость по сечению '
+floattostr(U_sech);

Worksheet.Range['A2',Worksheet.Cells.Item[kol+2,CC]].Value2:= TabGrid;
Worksheet.Range['A1',Worksheet.Cells.Item[kol+2,CC]].HorizontalAlignment:=xlL
eft;

for I := 2 to kol+1 do
  for j := 1 to 10 do
    begin

Worksheet.Cells.Item[i,j].Value:=Worksheet.Cells.Item[i,j].Value+0.000000000000;
Worksheet.Cells.Item[i,j].NumberFormatLocal:='0,00000000';
end;

WorkBk.SaveAs(path+'rez.xls',xlNormal,"",false,false,xlShared,xlUserResolution,fal
se,EmptyParam,EmptyParam,false,0);

// Показываем Excel
ExcelApplication1.Visible[0] := True;
// Разрываем связь с сервером
ExcelApplication1.Disconnect;
// Unassign the Delphi Variant Matrix
TabGrid := Unassigned;

end;

procedure TForm1.CheckBox1Click(Sender: TObject);
begin
  if CheckBox1.Checked=true then
    begin
      edit7.Visible:=true;
      edit6.Visible:=true;
      label7.Visible:=true;
      label6.Visible:=true;
    end;
end;

```



```

    edit10.Visible:=false;
    label10.Visible:=false;
end
else
begin
    edit10.Visible:=true;
    label10.Visible:=true;
    edit7.Visible:=false;
    edit6.Visible:=false;
    label7.Visible:=false;
    label6.Visible:=false;
end;

end;

procedure TForm1.CheckBox2Click(Sender: TObject);
begin
    if CheckBox2.Checked=true then
    begin
        edit17.Visible:=true;
        edit18.Visible:=true;
        label19.Visible:=true;
        label18.Visible:=true;
        edit12.Visible:=false;
        label13.Visible:=false;
    end
    else
    begin
        edit12.Visible:=true;
        label13.Visible:=true;
        edit17.Visible:=false;
        edit18.Visible:=false;
        label19.Visible:=false;
        label18.Visible:=false;
    end;
end;

end;

procedure TForm1.Edit10KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);
begin
if (key <>',' ) and (key <>'0')and (key <>'1') and (key <>'2')and (key <>'3')
and (key <>'4')and (key <>'5') and (key <>'6')and (key <>'7') and (key <>'8')
and (key <>'9') and (key <> #8) and (key <> '-')and (key <> '.')
then
begin

```

```

    key:=#27;
//  showmessage('некорректно');
end;
if (key ='.') then
begin
    key:=#27;
    key:=';';
end;
end;

```

```

procedure TForm1.Edit12KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);
begin
if (key <>',' ) and (key <>'0')and (key <>'1') and (key <>'2')and (key <>'3')
and (key <>'4')and (key <>'5') and (key <>'6')and (key <>'7') and (key <>'8')
and (key <>'9') and (key <> #8) and (key <> '-')and (key <> '.')
then
begin
    key:=#27;
//  showmessage('некорректно');
end;
if (key ='.') then
begin
    key:=#27;
    key:=';';
end;
end;

```

```

procedure TForm1.Edit13KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);
begin
if (key <>',' ) and (key <>'0')and (key <>'1') and (key <>'2')and (key <>'3')
and (key <>'4')and (key <>'5') and (key <>'6')and (key <>'7') and (key <>'8')
and (key <>'9') and (key <> #8) and (key <> '-')and (key <> '.')
then
begin
    key:=#27;
//  showmessage('некорректно');
end;
if (key ='.') then
begin
    key:=#27;
    key:=';';
end;
end;

```

```

procedure TForm1.Edit14KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);
begin

```

```

if (key <>'') and (key <>'0')and (key <>'1') and (key <>'2')and (key <>'3')
and (key <>'4')and (key <>'5') and (key <>'6')and (key <>'7') and (key <>'8')
and (key <>'9') and (key <> #8) and (key <> '-')and (key <> '.')
then
begin
key:=#27;
// showmessage('некорректно');
end;
if (key ='.') then
begin
key:=#27;
key:='.';
end;
end;

```

```

procedure TForm1.Edit15KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);
begin
if (key <>'') and (key <>'0')and (key <>'1') and (key <>'2')and (key <>'3')
and (key <>'4')and (key <>'5') and (key <>'6')and (key <>'7') and (key <>'8')
and (key <>'9') and (key <> #8) and (key <> '-')and (key <> '.')
then
begin
key:=#27;
// showmessage('некорректно');
end;
if (key ='.') then
begin
key:=#27;
key:='.';
end;
end;

```

```

procedure TForm1.Edit16KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);
begin
if (key <>'') and (key <>'0')and (key <>'1') and (key <>'2')and (key <>'3')
and (key <>'4')and (key <>'5') and (key <>'6')and (key <>'7') and (key <>'8')
and (key <>'9') and (key <> #8) and (key <> '-')and (key <> '.')
then
begin
key:=#27;
// showmessage('некорректно');
end;
if (key ='.') then
begin
key:=#27;
key:='.';
end;
end;

```

```

end;
end;

```

```

procedure TForm1.Edit17KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);
begin
if (key <>',' ) and (key <>'0')and (key <>'1') and (key <>'2')and (key <>'3')
and (key <>'4')and (key <>'5') and (key <>'6')and (key <>'7') and (key <>'8')
and (key <>'9') and (key <> #8) and (key <> '-')and (key <> '.')
then
begin
key:=#27;
// showmessage('некорректно');
end;
if (key ='.') then
begin
key:=#27;
key:='.';
end;
end;
end;

```

```

procedure TForm1.Edit18KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);
begin
if (key <>',' ) and (key <>'0')and (key <>'1') and (key <>'2')and (key <>'3')
and (key <>'4')and (key <>'5') and (key <>'6')and (key <>'7') and (key <>'8')
and (key <>'9') and (key <> #8) and (key <> '-')and (key <> '.')
then
begin
key:=#27;
// showmessage('некорректно');
end;
if (key ='.') then
begin
key:=#27;
key:='.';
end;
end;
end;

```

```

procedure TForm1.Edit19KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);
begin
if (key <>',' ) and (key <>'0')and (key <>'1') and (key <>'2')and (key <>'3')
and (key <>'4')and (key <>'5') and (key <>'6')and (key <>'7') and (key <>'8')
and (key <>'9') and (key <> #8) and (key <> '-')and (key <> '.')
then
begin
key:=#27;
// showmessage('некорректно');

```

```

end;
if (key = '.') then
begin
  key:=#27;
  key:='.';
end;
end;
procedure TForm1.Edit1KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);
begin
if (key <>',' ) and (key <>'0')and (key <>'1') and (key <>'2')and (key <>'3')
and (key <>'4')and (key <>'5') and (key <>'6')and (key <>'7') and (key <>'8')
and (key <>'9') and (key <> #8) and (key <> '-')and (key <> '.')
then
begin
  key:=#27;
//  showmessage('некорректно');
end;
if (key = '.') then
begin
  key:=#27;
  key:='.';
end;
end;
end;

```

```

procedure TForm1.Edit2KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);
begin
if (key <>',' ) and (key <>'0')and (key <>'1') and (key <>'2')and (key <>'3')
and (key <>'4')and (key <>'5') and (key <>'6')and (key <>'7') and (key <>'8')
and (key <>'9') and (key <> #8) and (key <> '-')and (key <> '.')
then
begin
  key:=#27;
//  showmessage('некорректно');
end;
if (key = '.') then
begin
  key:=#27;
  key:='.';
end;
end;
end;

```

```

procedure TForm1.Edit3KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);
begin
if (key <>',' ) and (key <>'0')and (key <>'1') and (key <>'2')and (key <>'3')
and (key <>'4')and (key <>'5') and (key <>'6')and (key <>'7') and (key <>'8')

```

```

and (key <>'9') and (key <> #8) and (key <> '-')and (key <> '.')
then
begin
key:=#27;
// showmessage('некорректно');
end;
if (key ='.') then
begin
key:=#27;
key:='.';
end;
end;

```

```

procedure TForm1.Edit4KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);
begin
if (key <>',' ) and (key <>'0')and (key <>'1') and (key <>'2')and (key <>'3')
and (key <>'4')and (key <>'5') and (key <>'6')and (key <>'7') and (key <>'8')
and (key <>'9') and (key <> #8) and (key <> '-')and (key <> '.')
then
begin
key:=#27;
// showmessage('некорректно');
end;
if (key ='.') then
begin
key:=#27;
key:='.';
end;
end;

```

```

procedure TForm1.Edit5KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);
begin
if (key <>',' ) and (key <>'0')and (key <>'1') and (key <>'2')and (key <>'3')
and (key <>'4')and (key <>'5') and (key <>'6')and (key <>'7') and (key <>'8')
and (key <>'9') and (key <> #8) and (key <> '-')and (key <> '.')
then
begin
key:=#27;
// showmessage('некорректно');
end;
if (key ='.') then
begin
key:=#27;
key:='.';
end;
end;

```

```

procedure TForm1.Edit6KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);
begin
if (key <>',' ) and (key <>'0')and (key <>'1') and (key <>'2')and (key <>'3')
and (key <>'4')and (key <>'5') and (key <>'6')and (key <>'7') and (key <>'8')
and (key <>'9') and (key <> #8) and (key <> '-')and (key <> '.')
then
begin
key:=#27;
// showmessage('некорректно');
end;
if (key ='.') then
begin
key:=#27;
key:='.';
end;
end;
procedure TForm1.Edit7KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);
begin
if (key <>',' ) and (key <>'0')and (key <>'1') and (key <>'2')and (key <>'3')
and (key <>'4')and (key <>'5') and (key <>'6')and (key <>'7') and (key <>'8')
and (key <>'9') and (key <> #8) and (key <> '-')and (key <> '.')
then
begin
key:=#27;
// showmessage('некорректно');
end;
if (key ='.') then
begin
key:=#27;
key:='.';
end;
end;
procedure TForm1.Edit8KeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);
begin
if (key <>',' ) and (key <>'0')and (key <>'1') and (key <>'2')and (key <>'3')
and (key <>'4')and (key <>'5') and (key <>'6')and (key <>'7') and (key <>'8')
and (key <>'9') and (key <> #8) and (key <> '-')and (key <> '.')
then
begin
key:=#27;
// showmessage('некорректно');
end;
if (key ='.') then
begin

```

```
    key:=#27;  
    key:='';  
end;  
end;
```

```
procedure TForm1.FormCreate(Sender: TObject);  
begin  
    path := ExtractFilePath(Application.ExeName);  
end;  
  
end.
```


ПРИЛОЖЕНИЕ В

**Акт внедрения
результатов диссертационной работы
на ООО «Локомотив-Сервис Ростов»**

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор ООО «Локомотив-
Сервис Ростов»
Першкова О.П.



«___» 20__ г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов и выводов диссертационной работы Капустина Д.А.
представленной на соискание ученой степени доктора технических наук

Комиссия в составе:

Председателя – главный технолог ООО «Локомотив-Сервис Ростов»

Шинкаренко А.С.

Члены комиссии:

– начальник технического бюро ООО «Локомотив-Сервис Ростов»

Кушнаренко О.А.;

– ведущий инженер конструктор ООО «Локомотив-Сервис Ростов» Узунов

С.Н.;

– инженер технолог ООО «Локомотив-Сервис Ростов» Серов С.В.;

рассмотрев диссертационную работу Д.А. Капустина, установила:

1. Представленная диссертационная работа Капустина Д.А. посвящена решению актуальной проблемы, связанной с повышением точности расчета параметров трубопроводной системы по перемещению топливных водоугольных суспензий при их производстве, транспортировании и использовании.

2. Практическую ценность представляет предложенная методика расчета основных эксплуатационных параметров трубопроводной системы с учетом влияния вязкостных свойств среды на кинематические характеристики потока транспортируемого материала.

3. Разработанные подходы и методы расчета параметров процесса течения топливной водоугольной суспензии по трубопроводу круглого сечения, а также способы определения типа используемой пластифицирующей добавки, позволяет повысить надежность работы технологической системы в целом и сохранить качество водоугольной суспензии на заданном уровне.

4. Разработанными в представленной диссертационной работе методами повышения эффективности работы технологической трубопроводной системы являются:

- определение вязкостных характеристик транспортируемой суспензии в том числе с учетом внешних факторов;

- определение основных параметров течения с учетом изменения реологического поведения по сечению потока;

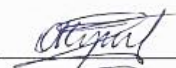
- определение энергозатрат на транспортирование с учетом величины получаемой в результате тепловой энергии.

5. Предложенные в диссертационной работе подходы использованы в проекте перевода твердотопливных котлов КВ-Т 630 на совместное сжигание топливной водоугольной суспензии на основе антрацитовых шламов и обогащенных антрацитов, что позволило сократить топливные затраты и получить экономический эффект порядка 5 млн. руб. в год для котельной из восьми котлов.

Председатель комиссии


Шинкаренко А.С.

Члены комиссии:


Кушнарченко О.А.


Узунов С.Н.


Серов С.В.

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

**Акт внедрения
результатов диссертационной работы
на ООО «Луганский завод трубопроводной арматуры «Маршал»**



«УТВЕРЖДЕНО»

Обратенко С.Ю.

« ___ » _____ 2023 г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов диссертационной работы Капустина Д.А.

«Развитие научных основ теории процессов производства и транспортирования водоугольных суспензий в современных топливных технологиях»
представленной на соискание ученой степени доктора технических наук

Комиссия в составе:

Председателя главный инженер Олейник А.М. и членов комиссии заместителя генерального директора по сертификации, стандартизации, сертификации и качеству Хмеленко М.А., главного конструктора Шевченко Р.К., рассмотрев диссертационную работу Д.А. Капустина постановила:

1. Представленная диссертационная работа Капустина Д.А. посвящена решению актуальной проблемы совершенствованию методов расчета параметров процесса течения топливных водоугольных суспензий по трубопроводам в технологических системах, направленных на переработку угольных отходов и производство жидких топлив на основе угля, по результатам которого разработаны научно-обоснованные способы расчета основных эксплуатационных параметров технологических процессов в данной отрасли.

2. Практическую ценность представляют реализация предлагаемых решений и простота технического расчета в условиях дефицита средств на реконструкцию и модернизацию систем переработки угольных отходов.

3. Разработанные подходы и методы для повышения точности расчета основных параметров течения топливной водоугольной суспензии позволяют увеличить эффективность работы трубопроводных технологических систем.

4. Разработанными в представленной диссертационной работе методами повышения эффективности работы технологической гидротранспортной системы являются:

- пересчет реологических характеристик топливных водоугольных суспензий с учетом значения температуры окружающей среды, кислотности водной со-

ставляющей, типа и количества пластификатора, времени и расстояния транспортирования;

- определение коэффициентов реологической модели с учетом содержания влияния скорости сдвига, концентрации твердой фазы и ее гранулометрического распределения, зольности исходного угля, а также выхода летучих веществ;

- определение удельных потерь на прямолинейном участке, местных сопротивлений, включая запорную арматуру, с учетом реологических характеристик суспензии;

- учет при определении основных параметров течения воздействия на них конфигурации трубопровода.

5. Предложенные методы расчета параметров производства и транспортирования топливных водоугольных суспензий использованы повышения эффективности и надежности работы технологических процессов в системах утилизации отходов углеобогащения, а также увеличить временной интервал технического обслуживания, что позволяет получить экономический эффект порядка 3 млн. руб. в год.

Председатель комиссии

А.М. Олейник

Члены комиссии:

М.А. Хмеленко

Р.К. Шевченко

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

**Акт внедрения
результатов диссертационной работы
на ООО ТД «Краснолучэнергоресурс»**

«УТВЕРЖДЕНО»



Директор
ООО «ТД «КрасполучЭнергоресурс»

А.Н. Лакушев

2023 г.

АКТ

об использовании результатов и выводов диссертации Капустина Д.А.
«Развитие теории подготовки и транспортирования топливных водоуголь-
ных суспензий из угольного сырья и шламов»
представленной на соискание ученой степени доктора технических наук

Комиссия в составе:

Председателя - и.о. главного механика Т.С. Ковтун и членов комиссии:
главный энергетик А.Л. Разумов и начальник цеха обогащения Н.Н. Лекачинская,
рассмотрев диссертационную работу Д.А. Капустина, установила:

1. Результаты работы могут быть использованы на углеобогащательных предприятиях, оснащенных сушильными аппаратами или котельными, с возможностью переоборудования энергетических установок на использование водоугольного топлива. Кроме того, использование водоугольной суспензии в качестве источника энергии в рамках различных технологических процессов, позволяет снизить риски возникновения возгораний при обогащении углей.

2. Особую значимость в аспекте практической реализации представляют разработанные в диссертации научно-обоснованные методы повышения надежности и эффективности процессов транспортирования топливной водоугольной суспензии, которые заключаются в следующем:

- рационализация подбора концентрации твердой фазы, с учетом гранулометрического состава водоугольной суспензии;
- определение допустимого времени транспортирования высококонцентрированной водоугольной суспензии по трубопроводу определенной конфигурации и диаметра с учетом ее реологических показателей;
- определение потерь давления при течении топливной водоугольной суспензии в технологической системе и корректировка насосного оборудования с учетом содержания угольных частиц.

3. При разработке перечисленных методов использованы следующие гипотезы и результаты исследований:

- реологическая модель, позволяющая определить напряжение сдвига и вязкость в зависимости от градиента скорости сдвига, содержания твердой фазы, зольности исходного угля, выхода летучих веществ и критерия бимодальности.

- математическая модель течения высококонцентрированной водоугольной суспензии с учетом влияния свойств среды и неньютоновского поведения на ее составляющие;

- аналитическое уравнение для определения величины расхода топливной водоугольной суспензии с учетом величины начального напряжения сдвига и структурной вязкости, а также их изменения в зоне малых скоростей деформаций;

- результаты исследований закономерностей течения топливной водоугольной суспензии на лабораторном экспериментальном стенде.

4. Предложенные методы совершенствования процессов течения топливной водоугольной суспензии за счет рационального выбора эксплуатационных свойств позволяют снизить риски безотказной работы трубопроводной технологической системы, тем самым уменьшив затраты на ремонт и восстановление системы перемещения водоугольной суспензии и увеличив время непрерывной ее эксплуатации.

5. Работа Капустина Д.А. является самостоятельным, законченным исследованием, результаты которого представлены в виде научно-обоснованных рекомендаций, инженерных методов расчета, конструктивных решений, выполненных на высоком научно-техническом уровне, а планируемый экономический эффект составляет порядка 25 млн. рублей в год.

Председатель комиссии:


И.о. главного механика



Т.С. Ковтун

Члены комиссии:

Главный энергетик



А.Л. Разумов

Начальник цеха обогащения



Н.Н. Лекачинская

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

Справка
о внедрении результатов диссертационной работы
в учебный процесс
в ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет
имени Владимира Даля»

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«Луганский государственный университет имени Владимира Даля»
(ФГБОУ ВО «ЛГУ им. В. Даля»)



УТВЕРЖДАЮ

ректор ФГБОУ ВО «ЛГУ им. В. Даля»

д.т.н., проф. Рябичев В.Д.

2023 г.

СПРАВКА

о внедрении результатов диссертационной работы
на соискание ученой степени доктора технических наук

Капустина Дениса Алексеевича

в учебный процесс

Полученные, в результате диссертационных исследований Капустина Дениса Алексеевича, новые научные и практические результаты внедрены в учебный процесс при подготовке бакалавров по направлению подготовки 01.03.03 «Механика и математическое моделирование» профиль: «Механика деформируемых тел и сред» в учебные дисциплины: «Основы механики сплошной среды», «Динамика вязкой жидкости», «Основы профессиональных знаний по механике и математическому моделированию», «Практикум на ЭВМ по гидроаэродинамике»; при подготовке магистров по направлению 01.04.03 «Механика и математическое моделирование» магистерская программа: «Компьютерная аэрогидродинамика» в учебные дисциплины: «Методы анализа и синтеза оптимальных конструкций», «Структурно-параметрическая оптимизация систем».

Проректор по научной работе и
инновационной деятельности,
д.т.н., профессор

В.А. Витренко