

На правах рукописи



**Зенков Андрей Викторович**

**СВОЙСТВА ВОДОУГОЛЬНЫХ ТОПЛИВ С ДОБАВЛЕНИЕМ ЖИДКИХ  
ГОРЮЧИХ КОМПОНЕНТОВ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ИХ РАСПЫЛЕНИЯ  
ДЛЯ КОТЛОВ ПРОМЫШЛЕННОЙ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКИ**

05.14.04 Промышленная теплоэнергетика

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Томск – 2021

Работа выполнена в НОЦ И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск.

**Научный руководитель:**

**Губин Владимир Евгеньевич**, кандидат технических наук, доцент.

**Официальные оппоненты:**

**Богомолов Александр Романович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теплоэнергетики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева», г. Кемерово.

**Мальцев Леонид Иванович**, доктор технических наук, заместитель заведующего лабораторией теплофизики многофазных систем федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск.

Защита состоится «28» июня 2021 г. в 12:00 часов на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.18 при федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634050, г. Томск, ул. Усова, д. 7, уч. корпус 8, ауд. 217.

С диссертацией можно ознакомиться в Научно-технической библиотеке федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» и на сайте: [dis.tpu.ru](http://dis.tpu.ru)

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
кандидат технических наук



Табакаев Роман  
Борисович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** По состоянию на 2018 год в Российской Федерации действовало 566 теплоэлектроцентралей мощностью от 500 кВт и выше и около 74,8 тыс. отопительных котельных. Суммарная тепловая мощность ТЭЦ составляла лишь 265 тыс. Гкал/ч, а отопительных котельных – 582 тыс. Гкал/ч. При этом треть таких котельных работает на угле.

Также согласно экспертным прогнозам Международного Энергетического Агентства и British Petroleum доля угля в мировом топливно-энергетическом балансе снизится к 2040 году лишь на 5% по консервативному сценарию и на 8% по инновационному сценарию. Таким образом уголь продолжит играть одну из основных ролей в производстве тепловой энергии ближайшие десятилетия. Однако известно, что прямое сжигание угля приводит к значительным выбросам в атмосферу вредных веществ ( $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_x$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ).

В настоящее время ведутся разработки различных технологий, направленных на снижение вредных выбросов объектов энергетики, работающих на угле, которые также обеспечивают повышение энергетических характеристик. К таким технологиям относятся: направление HELE (high-efficiency low emission), нанесение иницирующих добавок в виде нитрата аммония, меди и др., сжигание композитных топлив на основе угля и, например, биомассы.

Одним из многообещающих направлений развития угольной энергетики является использование водоугольных топлив. Водоугольное топливо (ВУТ) может представлять собой смесь мелкодисперсного угля, жидкой среды и различных добавок. Исследования, направленные на изучение и создание угольных суспензий, проводились в России еще в середине прошлого века. Предполагалось использовать их в энергетических котлах как альтернативу мазуту.

За последние десятилетия было проведено большое количество исследований, направленных на изучение суспензионных топлив. Известны исследования водоугольного топлива с добавлением нефтепродуктов, глицерина, спиртов, а также органоводоугольных топлив. Несмотря на глубокий фундаментальный задел в области изучения суспензионного топлива, созданный проведенными исследованиями, ряд проблем все еще остается нерешенным.

Одна из них заключается в том, что внедрение в промышленную теплоэнергетику водоугольных топлив с добавлением жидких горючих компонентов, решающих проблему низкой теплотворной способности типичного ВУТ, сдерживается отсутствием экспериментально полученных характеристик струи после распыления таких топлив.

**Целью работы** является определение по результатам экспериментов характеристик струи (скорость, размер и число капель, угол раскрытия) распыленных водоугольных топлив на основе углей марки ЗБ, Д и Т с добавлением жидких горючих

компонентов (жидких отходов переработки резинотехнических изделий, отработанного моторного масла, изопропилового спирта), отсутствие которых сдерживает внедрение таких топлив в промышленную теплоэнергетику.

**Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:**

1. Создать стенд для экспериментальных исследований распыления суспензионных топлив.

2. Определить по результатам экспериментов свойства (вязкость, плотность, коэффициент поверхностного натяжения) водоугольных топлив на основе углей марки ЗБ, Д и Т с добавлением жидких горючих компонентов (жидких отходов переработки резинотехнических изделий, отработанного моторного масла, изопропилового спирта).

3. Установить по результатам экспериментов характеристики распыления (скорость, размер и число капель, угол раскрытия струи) водоугольных топлив на основе углей марки ЗБ, Д и Т с добавлением жидких горючих компонентов (жидких отходов переработки резинотехнических изделий, отработанного моторного масла, изопропилового спирта).

4. Определить предельные концентрации жидких горючих компонентов (жидких отходов переработки резинотехнических изделий, отработанного моторного масла, изопропилового спирта) в составе водоугольных топлив на основе углей марки ЗБ, Д и Т и разработать рекомендации по использованию результатов исследования.

**Научная новизна работы.** заключается в том, что впервые экспериментально определено влияние жидких горючих компонентов (жидких отходов переработки резинотехнических изделий, отработанного моторного масла, изопропилового спирта) на характеристики струи (снижение скорости до 14%, количества мелких капель до 15%, увеличение угла раскрытия до 25%) после распыления водоугольных топлив на основе углей марки ЗБ, Д и Т, отсутствие которых сдерживает внедрение таких топлив в промышленную теплоэнергетику.

**Практическая значимость работы.** состоит в том, что установлены и обоснованы предельные концентрации исследовавшихся жидких горючих добавок в составе водоугольного топлива: не более 3 мас.% изопропилового спирта и не более 8 мас.% жидких отходов переработки резинотехнических изделий и отработанного моторного масла. По результатам диссертационной работы получен патент на топливную суспензию с добавлением жидкой горючей добавки (изопропиловый спирт) №2731605 от 04.09.2020. Результаты диссертационного исследования используются ООО «НПО Инноватех» при проектировании новой установки термолизной переработки резинотехнических отходов производительностью 300 кг/ч с целью получения дополнительного полезного продукта – компонента водоугольных суспензий и решения безопасной утилизации в котлах промышленной теплоэнергетики отходов технологического цикла производства технического углерода.

**Достоверность** полученных результатов подтверждается оценками систематических и случайных погрешностей выполненных измерений, удовлетворительной повторяемостью опытов при идентичных начальных значениях параметров, использованием современных программно-аппаратных комплексов и

систем регистрации, а также сравнением с теоретическими и экспериментальными данными других авторов.

**Связь работы с научными программами и грантами.** Диссертационные исследования свойств водоугольных топлива с добавлением жидкой горючей добавки и характеристик выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект №FSWW-2020-0022) и проекта ВИУ-ИШЭ-193/2020 в рамках программы повышения конкурентоспособности Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Основные положения и результаты, выносимые на защиту:**

1. Введение в состав типичного водоугольного топлива на основе углей марки ЗБ, Д и Т 3 мас.% изопропилового спирта и 8 мас.% жидких отходов переработки резинотехнических изделий и отработанного моторного масла приводит к повышению вязкости до 29, 64 и 77%, плотности до 1,5, 6 и 8% и коэффициента поверхностного натяжения до 2,5, 8 и 12%, соответственно.

2. Введение в состав типичного водоугольного топлива на основе углей марки ЗБ, Д и Т 3 мас.% изопропилового спирта и 8 мас.% жидких отходов переработки резинотехнических изделий и отработанного моторного масла приводит к снижению средней скорости капель в струе до 10, 13 и 14%, соответственно.

3. Введение в состав типичного водоугольного топлива на основе углей марки ЗБ, Д и Т 3 мас.% изопропилового спирта и 8 мас.% жидких отходов переработки резинотехнических изделий и отработанного моторного масла не приводит к значительному снижению (до 2, 8 и 5%, соответственно) числа капель малого размера (до 300 мкм) после распыления.

4. Введение в состав типичного водоугольного топлива на основе углей марки ЗБ, Д и Т 3 мас.% изопропилового спирта и 8 мас.% жидких отходов переработки резинотехнических изделий и отработанного моторного масла приводит к росту угла раскрытия струи до 6, 15 и 22%, соответственно.

5. Предельная концентрация изопропилового спирта в качестве жидкого горючего компонента в составе суспензионного топлива на основе углей марки ЗБ, Д и Т составляет не более 3 мас.%, а жидких отходов переработки резинотехнических изделий и отработанного моторного масла – не более 8 мас.%.

**Личный вклад автора** автора состоит в создании экспериментальной установки, организации и проведении экспериментальных исследований, обработке результатов, оценке систематических и случайных погрешностей, анализе и обобщении полученных результатов, разработке рекомендаций их практического использования, формулировке защищаемых положений и выводов.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты исследования докладывались и обсуждались на Международной научной конференции «Тепломассоперенос в системах обеспечения тепловых режимов энергонасыщенного технического и технологического оборудования» (Томск, 2017), V Международном молодежном форуме «Интеллектуальные энергосистемы» (Томск, 2017), II Всероссийской научной конференции «Теплофизика и физическая гидродинамика» (Ялта, 2017), X Всероссийской конференции с международным участием «Горение топлива: теория, эксперимент, приложения» (Новосибирск, 2017), Международной

молодежной научной конференции «Тепломассоперенос в системах обеспечения тепловых режимов энергонасыщенного технического и технологического оборудования» (Томск, 2018), Международной молодежной научной конференции «Тепломассоперенос в системах обеспечения тепловых режимов энергонасыщенного технического и технологического оборудования» (Томск, 2019), III Международной конференции «Современные проблемы теплофизики и энергетики» (Москва, 2020).

**Публикации.** Основные положения, результаты и выводы диссертационных исследований опубликованы в 9 статьях в журналах, индексируемых базами данных Scopus и/или WoS и 5 статьях в журналах из списка, рекомендованного ВАК для опубликования результатов диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук: «Journal of Environmental Chemical Engineering» (IF=4,3, Q<sub>1</sub>), «International Journal of Energy Research» (IF=3,741, Q<sub>2</sub>), «Journal of Energy Engineering» (IF=1,33, Q<sub>2</sub>), «Chemical and Petroleum Engineering» (IF=0,35, Q<sub>3</sub>), МАТЕС Web of Conferences (IF=0,44), AIP Conference Proceedings (IF=0,4), Journal of Physics: Conference Series (IF=0,23), «Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика», «Вестник Иркутского государственного технического университета», «Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики», «Химическое и нефтегазовое машиностроение». Получен 1 патент на изобретение и 1 акт о внедрении.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, основных результатов и выводов, списка литературы. Диссертация изложена на 122 страницах машинописного текста, содержит 64 рисунка, 10 таблиц, 2 приложения. Библиография включает 132 наименования.

## **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, представлена степень разработанности, сформулированы цель и задачи исследования, отражена практическая значимость и научная новизна полученных результатов.

**В первой главе** отражено современное состояние и тенденции развития теоретических и экспериментальных исследований в области изучения свойств суспензионных топлив и характеристик их распыления. Выполнен анализ основных технологий снижения вредных выбросов при сжигании угля. Установлено, что одним из эффективных методов более экологически чистого сжигания угля является его применение в виде суспензионного топлива. Проведен анализ реологических свойств и характеристик распыления суспензионных топлив на основе различных компонентов. По результатам литературного обзора определено, что существенный вклад в исследования внесли Делягин Г.Н., Алексеенко С.В., Ануфриев И.С., Дектерев А.А., Мурко В.И., Сенчурова Ю.А., Ходаков Г.С., Баранова М.П., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А., Глушков Д.О., Сыродой С.В., Богомоллов А.Р., Daviault S.G., Jiang X., Tsai S.C., Wang C., Kefa C., Miao Z., Meng, X., Wu G., Padhy M., Routray A., Kaushal D., Singh H., Boylu F., Dincer H., Atesok G., Konduri M., Sadakata M., Gajewski W., Hu B., Kijo-Kleczkowska A., Pinchuk V., Kim S.H., Lee C.H., Staron A., Kowalski Z., Banach

М., Liu J., Liu H., Manwani P., Mohapatra S.K., Pisupati S.V., Svoboda K., Sakai T., Wang H., Zhu M. и др. известные ученые.

**Во второй главе** представлена методика экспериментальных исследований свойств (вязкость, плотность, коэффициент поверхностного натяжения) суспензионных топлив с добавлением жидких горючих компонентов. Описана схема подготовки топлив (рис. 1). Первичная подготовка угля заключалась в его измельчении с помощью дезинтегратора. Полученный мелкодисперсный уголь просеивался на ситах с отбором фракции размером менее 200 мкм. Затем, уголь, вода и пластификатор (лигносульфонат) смешивались в шаровой барабанной мельнице в течение 2 часов. После этого в полученное водоугольное топливо добавлялась горючая добавка, и проводился дополнительный помол в течение 1 часа.

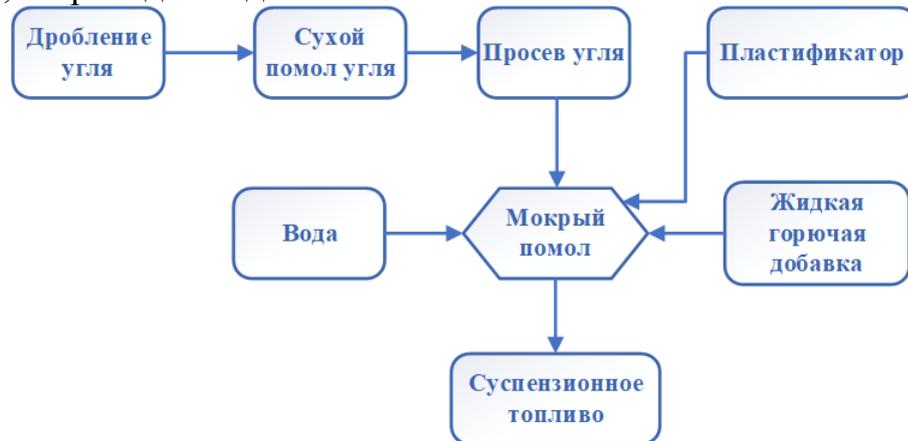


Рисунок 1 – Схема подготовки топлива

Измерение вязкости производилось с помощью ротационного вискозиметра Brookfield RVDV-II+ Pro. Необходимое количество суспензионного топлива помещалось в мерный стакан цилиндрической формы диаметром 100 мм. Шпindel вискозиметра помещался в стакан по центру. Измерения проводились в 2 этапа: 1) скорость сдвига плавно увеличивалась от 50 до 200 об/мин; 2) скорость сдвига плавно уменьшалась от 200 до 50 об/мин.

Для измерения плотности необходимое количество суспензионного топлива помещалось в мерный стакан цилиндрической формы диаметром 100 мм. Туда же опускался ареометр и производилось снятие показаний прибора.

Для измерения коэффициента поверхностного натяжения необходимое количество суспензионного топлива помещалось в мерный стакан цилиндрической формы диаметром 100 мм. Определение коэффициента поверхностного натяжения производилось по методу отрыва кольца (метод Дью-Нуи). Было проведено 5 измерений вязкости, плотности и коэффициента поверхностного натяжения для каждого исследуемого состава топлива. Все эксперименты выполнены в одинаковых и хорошо воспроизводимых условиях (при комнатной температуре  $25 \pm 0,1$  °C и др.)

Представлена методика экспериментальных исследований характеристик распыления суспензионных топлив с добавлением жидких горючих компонентов. Исследования процесса распыления топлива проводились с помощью стенда, представленного на рисунке 2. Распыление производилось в цилиндрической конструкции диаметром 2 м и длиной 6 м. Подача суспензионного топлива

осуществлялась из бака запаса топлива при помощи насоса с пневматическим приводом. Распыляющий агент (воздух) подавался компрессором на пневматическую форсунку с внутренним смешением и диаметром устья 3 мм. Обзор литературы показал, что для распыления вязких топлив, в том числе водоугольного, за частую применяется именно такой тип форсунок. При этом размер устья обуславливается отсутствием его забивания и сохранением эффективности распыления. Подсветка распыляемого потока топлива выполнялась лазерным ножом, создаваемым лазером с двойным импульсом, а регистрация процесса распыления осуществлялась кросскорреляционной камерой. Синхронизация работы лазера и камеры осуществлялась блоком синхронизации. При проведении экспериментов давление воздуха устанавливалось на 0,02 МПа меньше давления водоугольного топлива с целью исключения эффекта «задавливания» вязкого топлива потоком воздуха в форсунке. Исследуемое давление воздуха/ВУТ: 0,28 МПа/0,3 МПа, что соответствует давлениям в котлах промышленной теплоэнергетики.

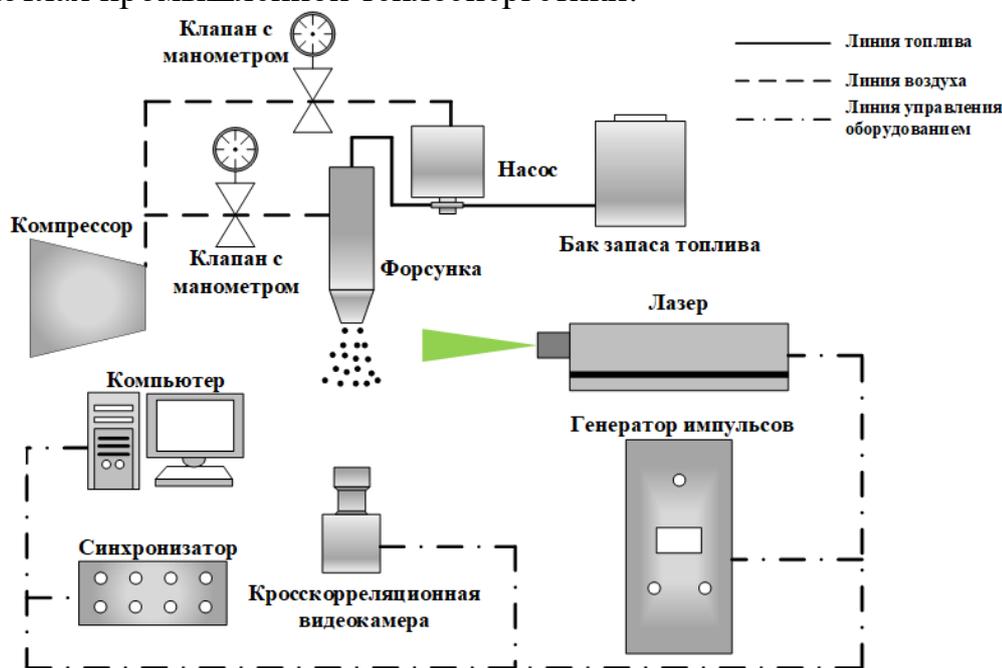


Рисунок 2 – Принципиальная схема стенда для исследования процессов распыления суспензионных топлив

Регистрация структуры установившегося потока распыляемых топливных суспензий и их скорости выполнена методом PIV (Particle Image Velocimetry, метод цифровой трассерной визуализации) с использованием камеры ImperX Bobcat B2020 и объектива марки Nikon с фокусным расстоянием 50 мм и углом обзора 46°. Подсветка распыляемого потока топлива выполнялась лазерным ножом, ориентированным по оси факела. Лазерный нож создавался лазером Beamtech Vlite-200 с двойным импульсом. Синхронизация лазера и камеры осуществлялась блоком синхронизации SP-2.0 ПС. Для определения размеров частиц распыленного потока использовался метод IPI (Interferometric Particle Imaging, Интерферометрический метод измерения диаметров частиц). Перед объективом камеры добавлялось специальное устройство для получения интерференционных полос – блок оптического сжатия интерференционных картин. Исследования производились с

помощью программного обеспечения (ПО) ActualFlow. Обработка полученных изображений выполнялась в том же ПО.

**В третьей главе** приведены результаты исследований свойств (вязкость, плотность, коэффициент поверхностного натяжения) водоугольных топлив на основе углей марки ЗБ, Д и Т с добавлением жидких горючих компонентов (изопропилового спирта, жидких отходов переработки резинотехнических изделий и отработанного моторного масла). Установлено, что все исследуемые составы являются псевдопластичными неньютоновскими жидкостями и подчиняются модели Гершеля-Балкли:

На рисунке 3 представлены зависимости вязкости, плотности и коэффициента поверхностного натяжения водоугольного топлива на основе углей марки ЗБ, Д и Т с добавлением 3 мас.%, 5 мас.%, 8 мас.% и 12 мас.% изопропилового спирта. Сравнение вязкости всех полученных составов производилось при скорости сдвига 100 об/мин.

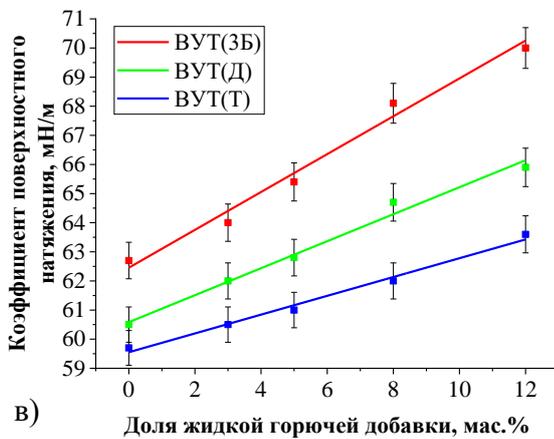
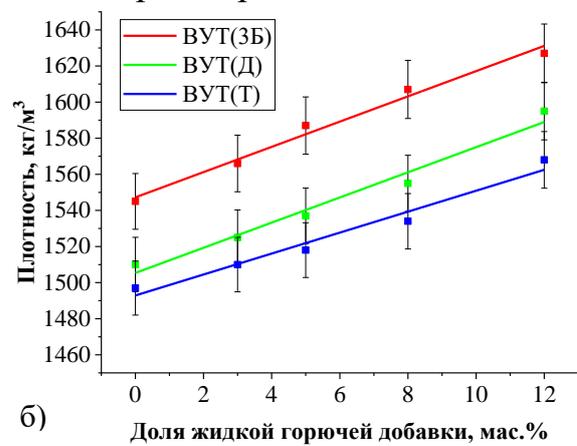
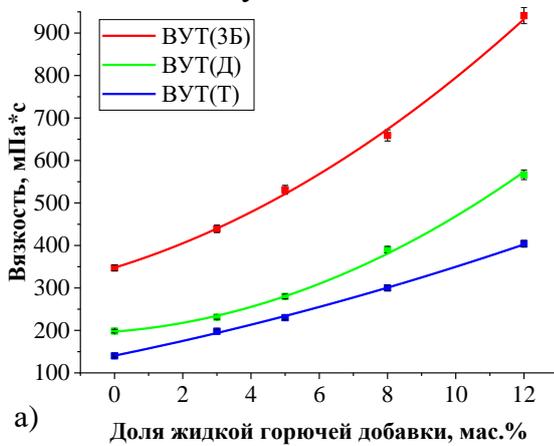


Рисунок 3 – Свойства водоугольного топлива на основе углей марки ЗБ, Д и Т с добавлением от 3 мас.% до 12 мас.% изопропилового спирта: а – динамическая вязкость, б – плотность, в – коэффициент поверхностного натяжения

На рисунке 4 представлены зависимости вязкости, плотности и коэффициента поверхностного натяжения водоугольного топлива на основе углей марки ЗБ, Д и Т с добавлением 3 мас.%, 5 мас.%, 8 мас.% и 12 мас.% жидких отходов переработки РТИ.

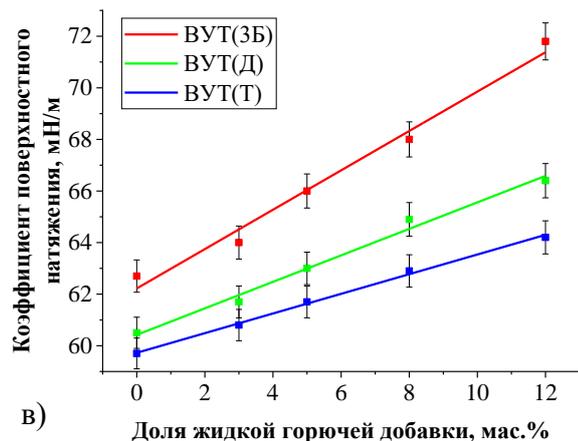
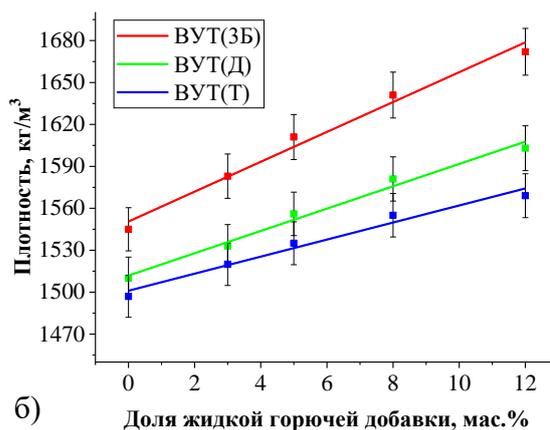
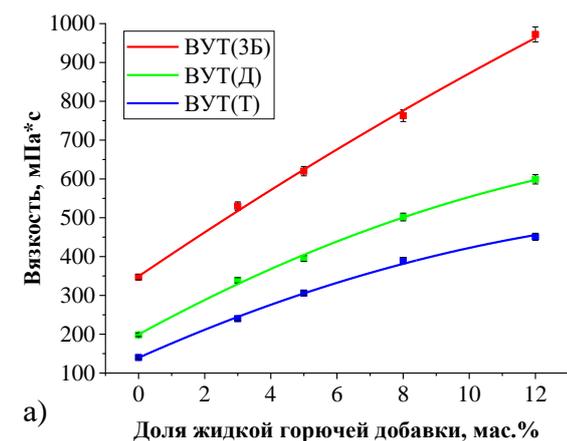
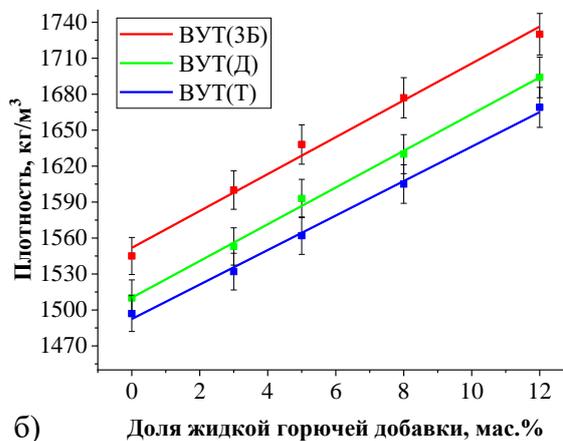
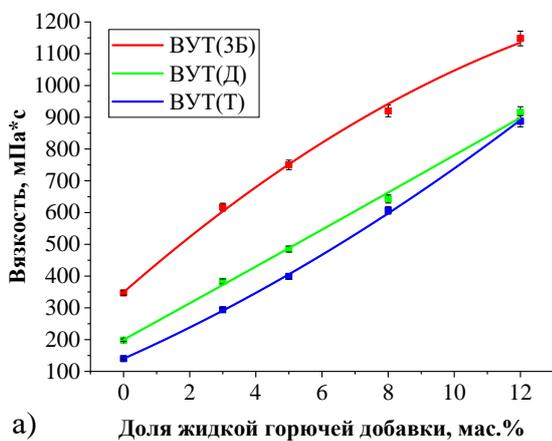


Рисунок 4 – Свойства водоугольного топлива на основе углей марки ЗБ, Д и Т с добавлением от 3 мас.% до 12 мас.% жидких отходов переработки РТИ: а – динамическая вязкость, б – плотность, в – коэффициент поверхностного натяжения

На рисунке 5 представлены зависимости вязкости, плотности и коэффициента поверхностного натяжения водоугольного топлива на основе углей марки ЗБ, Д и Т с добавлением 3 мас.%, 5 мас.%, 8 мас.% и 12 мас.% отработанного моторного масла.



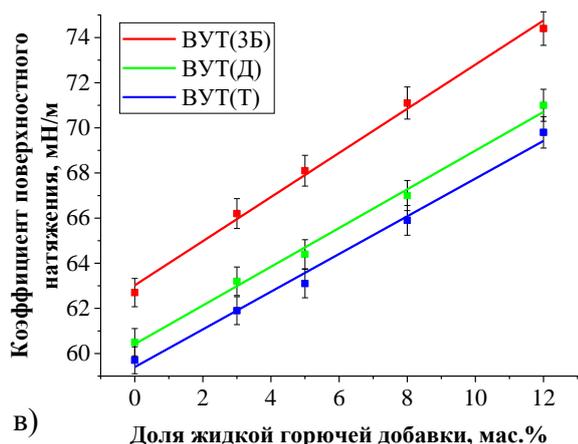


Рисунок 5 – Свойства водоугольного топлива на основе углей марки 3Б, Д и Т с добавлением от 3 мас.% до 12 мас.% отработанного моторного масла: а – динамическая вязкость, б – плотность, в – коэффициент поверхностного натяжения

Установлено, что добавление жидких горючих компонентов приводит к повышению вязкости, плотности и коэффициента поверхностного натяжения получаемого водоугольного топлива.

Определено, что из трех исследовавшихся марок углей суспензионное топливо на основе угля марки 3Б обладает наибольшими вязкостью, плотностью и коэффициентом поверхностного натяжения, а водоугольное топливо на основе угля марки Т – наименьшими. Это связано с их степенью метаморфизма и, соответственно, средним размером пор. Установлено, что уголь марки 3Б имеет наибольший средний размер пор (18,4 нм), уголь марки Т – наименьший (11,9 нм). Средний размер пор угля марки Д составляет 16,6 нм.

Вязкость и текучесть водоугольного топлива при добавлении исследовавшихся жидких горючих компонентов остается в допустимых пределах при их концентрации не более 8%.

**В четвертой главе** приведены результаты исследований характеристик распыления водоугольных топлив на основе углей марки 3Б, Д и Т с добавлением жидких горючих компонентов (изопропилового спирта, жидких отходов переработки резинотехнических изделий и отработанного моторного масла). На рисунке б показан типичный кадр распыленной струи суспензионного топлива с обозначением исследовавшихся сечений.

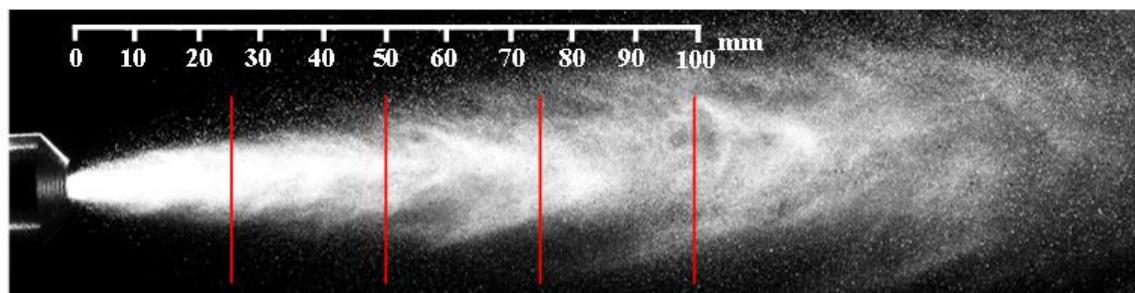


Рисунок 6 – Типичный кадр распыленной струи суспензионного топлива с обозначением исследуемых сечений

На рисунке 7 представлено типичное распределение скорости в струе суспензионного топлива на основе угля марки 3Б на расстоянии 25 мм, 50 мм, 75 мм и 100 мм от устья форсунки при начальном давлении топливо/воздух 0,3/0,28 МПа. Схожие зависимости получены для всех исследовавшихся составов. Полученные результаты показывают, что скорость в ядре струи всех исследовавшихся составов

топлива снижается при удалении от устья форсунки, а площадь сечения струи увеличивается, что соответствует теории распыления жидких топлив.

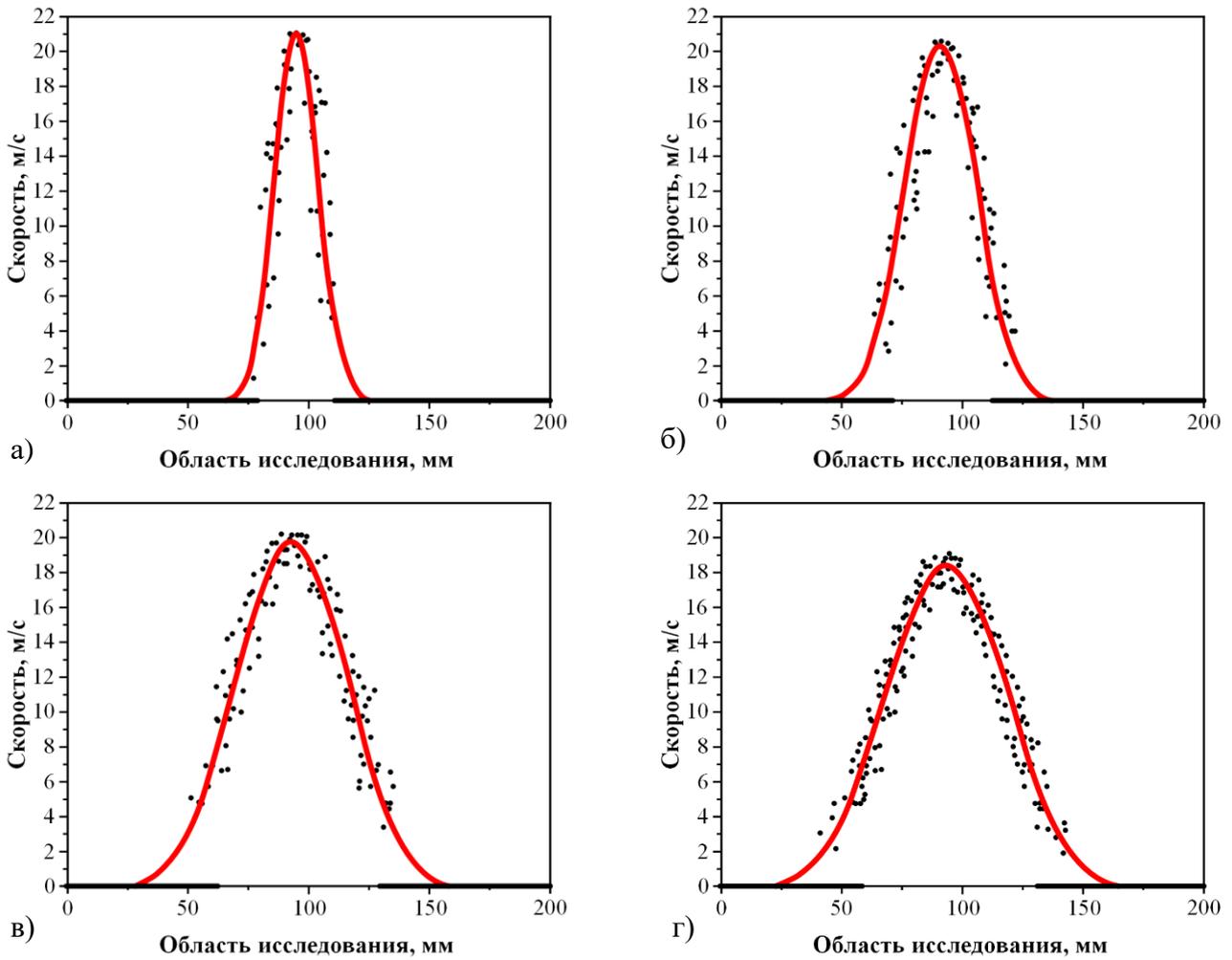
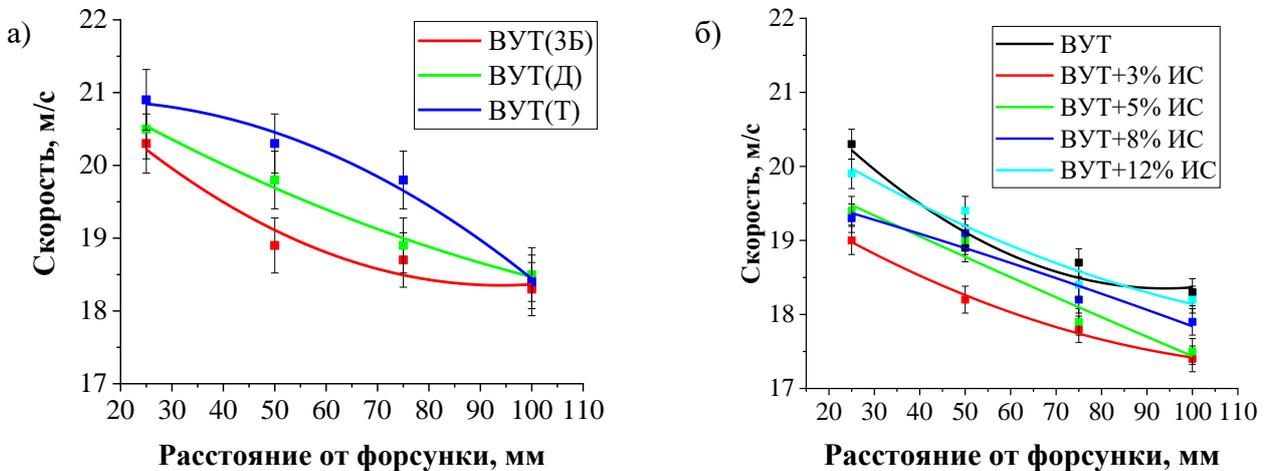
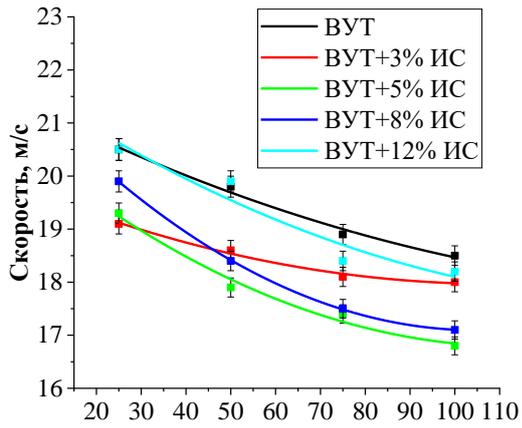


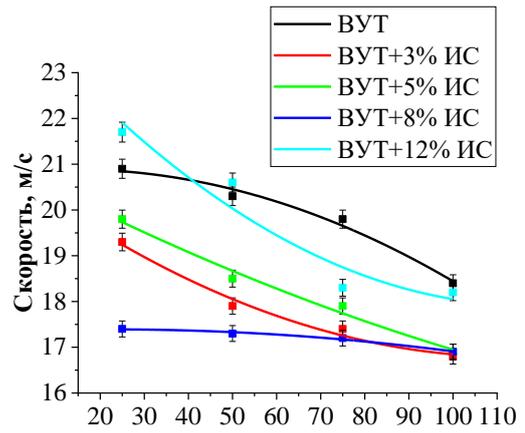
Рисунок 7 – Распределение скорости в струе водоугольного топлива на основе угля марки ЗБ на расстоянии 25 мм (а), 50 мм (б), 75 мм (в) и 100 мм (г) от устья форсунки

На рисунке 8 представлены зависимости скорости в ядре струи на различном расстоянии от устья форсунки для водоугольного топлива на основе углей марки ЗБ, Д и Т с добавлением исследовавшихся жидких горючих компонентов и без них.

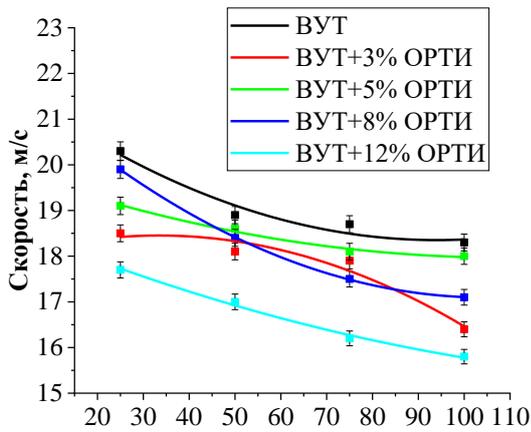




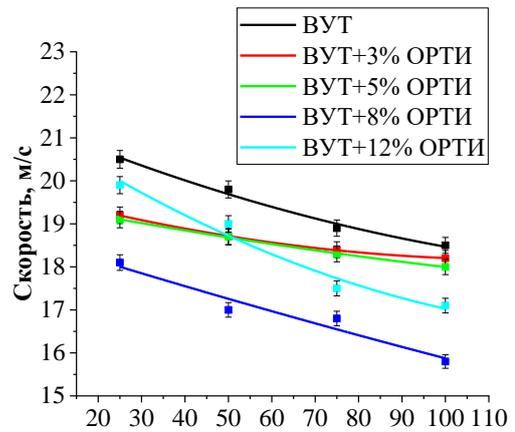
В) Расстояние от форсунки, мм



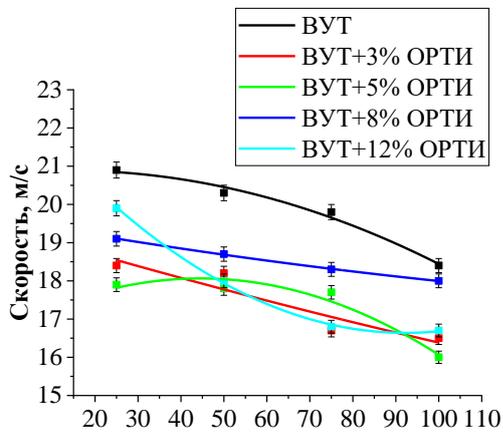
Г) Расстояние от форсунки, мм



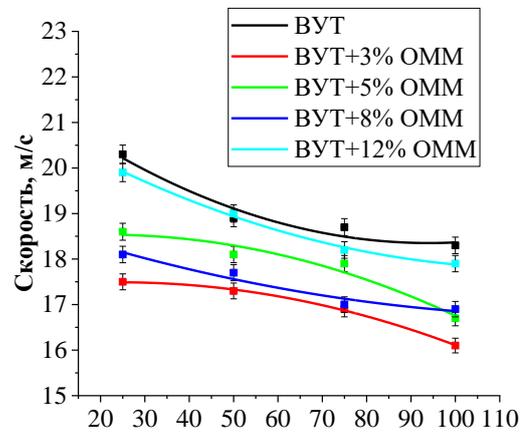
Д) Расстояние от форсунки, мм



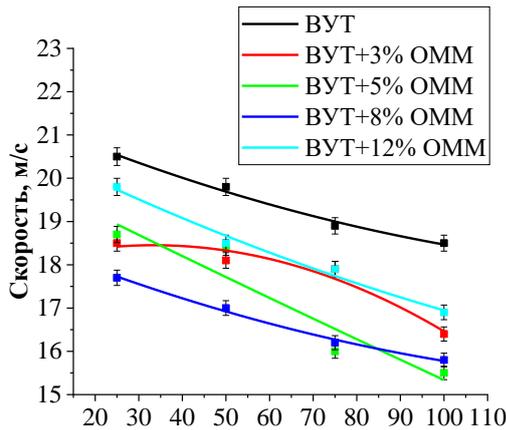
Е) Расстояние от форсунки, мм



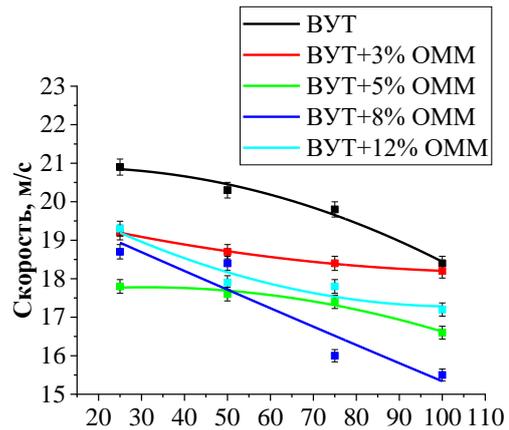
Ж) Расстояние от форсунки, мм



З) Расстояние от форсунки, мм



и) Расстояние от форсунки, мм



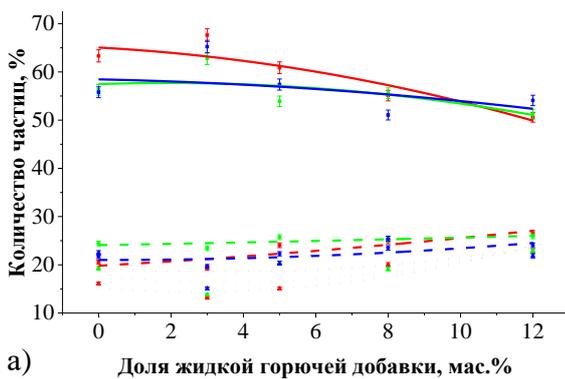
к) Расстояние от форсунки, мм

Рисунок 8 – Скорость в ядре струи на различном расстоянии от устья форсунки для водоугольного топлива на основе углей марки ЗБ, Д и Т: а – без жидких горючих компонентов, б – ВУТ(ЗБ)+ИС, в – ВУТ(Д)+ИС, г – ВУТ(Т)+ИС, д – ВУТ(ЗБ)+ОРТИ, е – ВУТ(Д)+ ОРТИ, ж – ВУТ(Т)+ ОРТИ, з – ВУТ(ЗБ)+ОММ, и – ВУТ(Д)+ ОММ, к – ВУТ(Т)+ ОММ

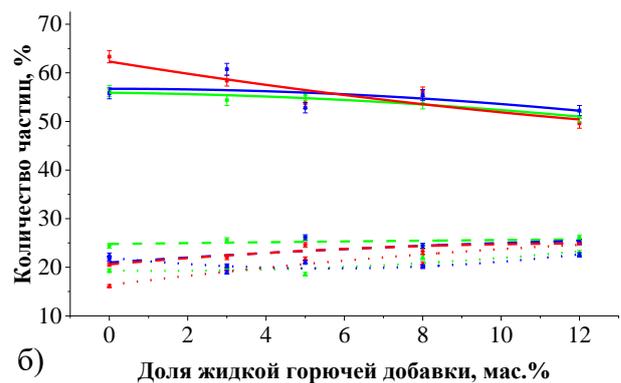
Результаты экспериментальных исследований показывают, что введение в состав водоугольного топлива на основе углей марки ЗБ, Д и Т 3%, 5%, 8% и 12% исследовавшихся жидких горючих компонентов приводит к снижению средней скорости струи.

Таким образом, использование исследовавшихся жидких горючих компонентов оказывает положительное влияние на среднюю скорость струи, так как снижение скорости капель означает увеличение времени их пребывания в камере сгорания, что в свою очередь приведет к снижению недожога и, соответственно, повышению эффективности работы котельного оборудования.

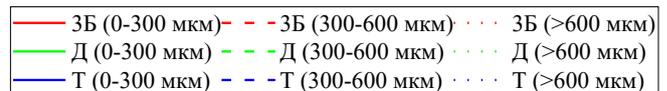
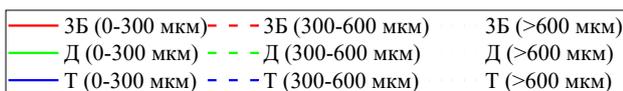
На рисунке 9 представлены зависимости количества капель в области исследования (25-100 мм от устья форсунки) после распыления водоугольного топлива на основе углей марки ЗБ, Д и Т от доли исследовавшихся жидких горючих компонентов.



а) Доля жидкой горючей добавки, мас.%



б) Доля жидкой горючей добавки, мас.%



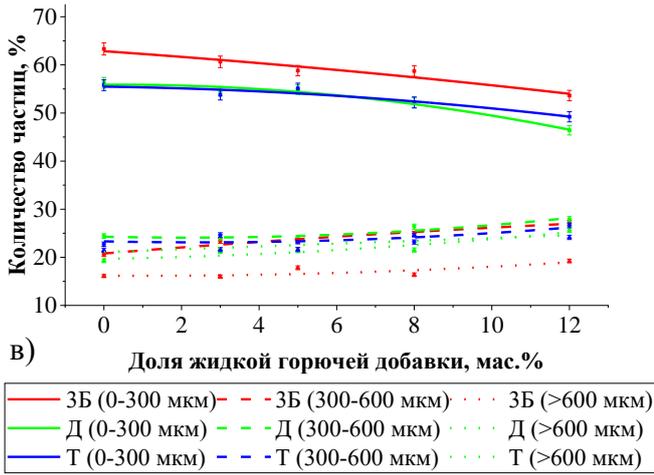


Рисунок 9 – Зависимости количества капель выбранных диапазонов после распыления водоугольного топлива на основе углей марки ЗБ, Д и Т от доли исследовавшихся жидких горючих компонентов: а – ВУТ с добавлением изопропилового спирта, б – ВУТ с добавлением жидких отходов переработки РТИ, в – ВУТ с добавлением отработанного моторного масла

При добавлении отработанного моторного масла в состав ВУТ на основе углей марки ЗБ, Д и Т отмечается снижение количества мелких капель (до 300 мкм). Для суспензионного топлива на основе угля марки ЗБ такое снижение составляет 1,8%, 3,2%, 5,4% и 8,9% при введении 3%, 5%, 8% и 12% жидких отходов переработки РТИ, соответственно, для суспензионного топлива на основе угля марки Д – 0,5%, 1,5%, 4,1% и 9,4%, для суспензионного топлива на основе угля марки Т – 0,6%, 1,4%, 3,1% и 6,2%. При этом количество средних и/или крупных капель увеличивается на соответствующую величину.

На рисунке 10 представлены типичные кадры, иллюстрирующие процесс распыления водоугольного топлива на основе углей марки ЗБ, Д и Т без добавления жидких горючих компонентов с обозначением угла раскрытия струи.

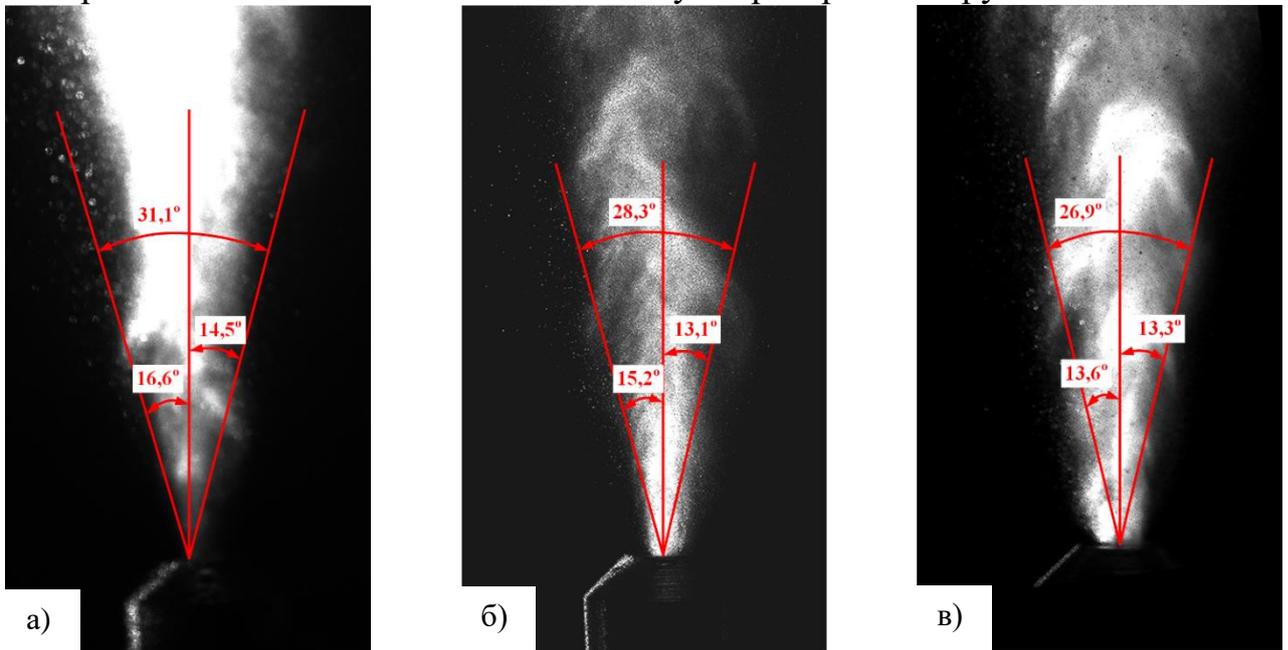


Рисунок 10 – Угол раскрытия струи после распыления водоугольного топлива на основе углей марки ЗБ (а), Д (б) и Т (в) без добавления жидких горючих компонентов

На рисунке 11 представлены зависимости угла раскрытия струи после распыления водоугольного топлива на основе углей марки ЗБ, Д и Т от содержания жидкой горючей добавки.

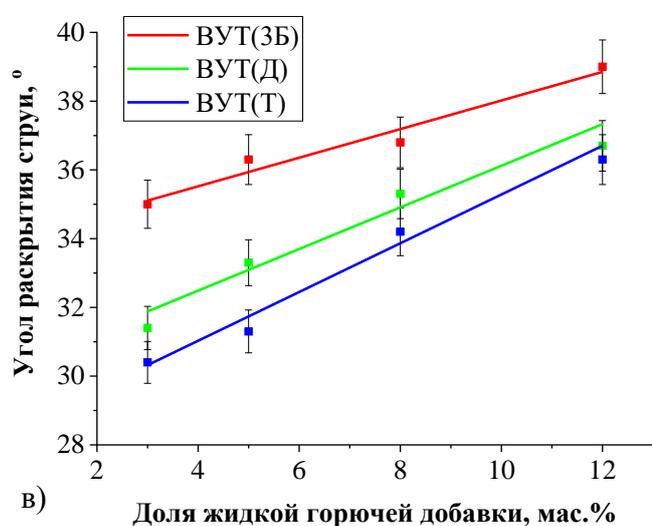
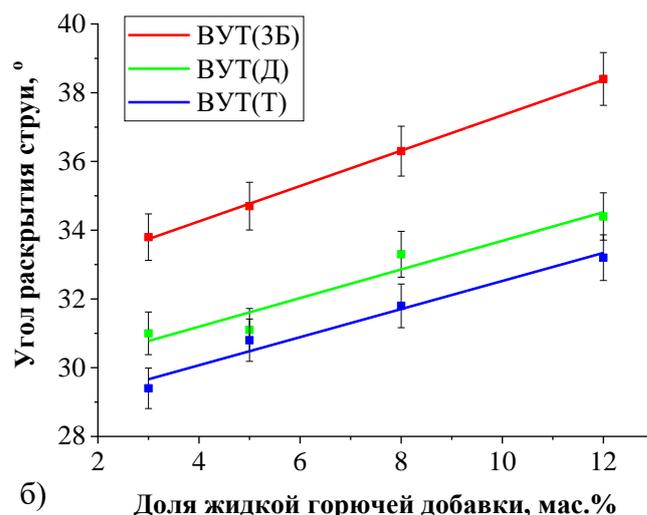
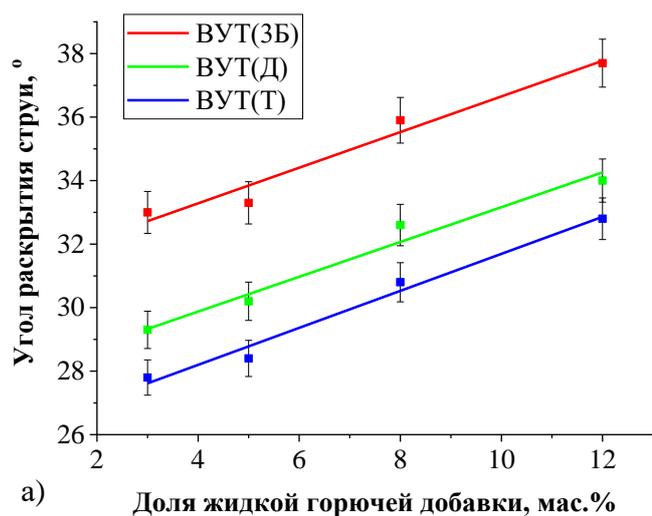


Рисунок 11 – Зависимости угла раскрытия струи после распыления водоугольного топлива на основе углей марки ЗБ, Д и Т от доли исследовавшихся жидких горючих компонентов: а – ВУТ с добавлением изопропилового спирта, б – ВУТ с добавлением жидких отходов переработки РТИ, в – ВУТ с добавлением отработанного моторного масла

Полученные результаты показывают, что при добавлении одинакового количества изопропилового спирта, жидких отходов переработки РТИ и отработанного моторного масла наименьший угол раскрытия струи будет соответствовать первой добавке, а наибольший – последней, соответственно. По полученным зависимостям можно сделать вывод, что увеличение вязкости приводит к росту угла раскрытия струи. Считается, что увеличение угла раскрытия струи способствует более равномерному распределению капель топлива по камере сгорания. Однако введение в состав типичного водоугольного топлива более 8 мас.% жидких отходов переработки резинотехнических изделий и отработанного моторного масла приводит к образованию крупных агломератов капель, что свидетельствует о снижении качества распыления не смотря на увеличение угла раскрытия струи.

**В пятой главе** приведено обоснование предельных концентраций исследовавшихся жидких горючих компонентов (жидких отходов переработки резинотехнических изделий, отработанного моторного масла, изопропилового спирта) в составе водоугольных топлив на основе углей марки ЗБ, Д и Т и сформированы рекомендации для практического применения полученных экспериментальных результатов исследования.

Введение в состав типичного водоугольного топлива жидких отходов переработки РТИ и отработанного моторного масла является способом их

утилизации. В то время как использование изопропилового спирта повлечет за собой определенные затраты. При этом расчет увеличения стоимости такого суспензионного топлива относительно типичного ВУТ показал целесообразность применения не более 3 мас.% спирта. Увеличение его концентрации в составе суспензионного топлива до 5% приведет к повышению стоимости на 13%, а низшая теплота сгорания увеличится менее чем на 5% по сравнению с составом с 3% спирта. В то же время введение 3 мас.% изопропилового спирта в состав ВУТ приведет к увеличению угла раскрытия струи (до 6%), приемлемому повышению вязкости топлива (до 30%) и незначительному увеличению количества крупных капель после распыления (до 1%).

Не смотря на увеличение угла раскрытия струи и снижение скорости капель после распыления, добавление в состав водоугольного топлива более 8 мас.% жидких отходов переработки РТИ и отработанного моторного масла приводит к значительному повышению вязкости (более 70%) и коэффициента поверхностного натяжения (более 10%) суспензионного топлива. Это в свою очередь приводит к агломерации и увеличению количества и размера крупных капель после распыления, что, как известно, влечет за собой увеличение времени задержки зажигания топлива. Данный факт объясняется тем, что высокая вязкость и коэффициент поверхностного натяжения суспензионного топлива, в сравнении с типичным водоугольным топливом, препятствует деформации капель за счет аэродинамического сопротивления окружающей среды. Такие капли топлива при столкновении с другими каплями не разрушаются на несколько мелких, а сохраняют свою целостность и агломерируются. При этом их траектории движения после первичного дробления практически не изменяются и ориентированы хаотично. В результате это является одной из причин почему характеристики струи после распыления вязких суспензий ухудшаются.

Использование водоугольных топлив в энергетике характеризуется множеством аспектов: марка угля, процентное соотношение компонентов, тип пластификаторов и горючих добавок и др. Применение жидких горючих компонентов в составе таких топлив целесообразно не только для улучшения их характеристик, но и с точки зрения утилизации различных отходов.

По результатам выполненных экспериментальных исследований сформулирован перечень рекомендаций по практическому применению в промышленно теплоэнергетике водоугольных топлив на основе углей марки ЗБ, Д и Т с добавлением жидких горючих компонентов (изопропиловый спирт, жидкие отходы переработки РТИ, отработанное моторное масло):

1. Рекомендуется использование водоугольных топлив на основе углей марки ЗБ, Д и Т с добавлением до 8% жидких отходов переработки РТИ и отработанного моторного масла, так как превышение этого содержания приводит к увеличению вязкости топлива и образованию крупных агломератов частиц после распыления.

2. Рекомендуется использование до 3% изопропилового спирта в качестве жидкой горючей компоненты суспензионного топлива на основе углей марки ЗБ, Д и Т. Увеличение содержания спирта значительно повышает стоимость суспензионного топлива, не приводя к ощутимому приросту его теплотворной способности.

3. Не существует единой закономерности изменения характеристик (скорость и размер капель) процесса распыления водоугольных топлив с добавлением жидких горючих компонентов. Для определения характеристик процесса распыления конкретного состава суспензионного топлива необходимо проведение отдельных исследований.

4. Выбор марки угля-основы суспензионного топлива, типа пластификаторов и жидких горючих компонентов, а также процентного отношения компонентов должен основываться на их доступности в регионе, необходимых энергетических, экономических и экологических показателях.

5. Полученные свойства суспензионных топлив на основе исследовавшихся марок углей с добавлением исследовавшихся жидких горючих компонентов и характеристики их распыления могут использоваться при проектировании локальных котельных или при переводе мазутных и угольных котельных на суспензионное топливо.

**В заключении** подведены основные итоги исследования, а также сформулированы соответствующие выводы.

### **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ**

1. Создан действующий стенд для экспериментальных исследований распыления суспензионных топлив.

2. Установлено, что добавление в состав типичного водоугольного топлива на основе углей марки ЗБ, Д и Т 3 мас.% изопропилового спирта и 8 мас.% жидких отходов переработки резинотехнических изделий и отработанного моторного масла приводит к повышению вязкости до 29, 64 и 77%, плотности до 1,5, 6 и 8% и коэффициента поверхностного натяжения до 2,5, 8 и 12%, соответственно.

3. Определено, что из трех исследовавшихся марок углей суспензионное топливо на основе угля марки ЗБ обладает наибольшей вязкостью (347 мПа·с), а суспензионное топливо на основе угля марки Т – наименьшей (140 мПа·с). Это связано с их степенью метаморфизма и, соответственно, средним размером пор.

4. Введение в состав типичного водоугольного топлива на основе углей марки ЗБ, Д и Т 3 мас.% изопропилового спирта и 8 мас.% жидких отходов переработки резинотехнических изделий и отработанного моторного масла приводит к росту угла раскрытия струи до 6, 15 и 22%, соответственно. Дальнейшее увеличение концентрации изопропилового спирта влечет за собой значительный прирост стоимости топлива. Увеличение концентрации жидких отходов переработки резинотехнических изделий и отработанного моторного масла до 12 мас.% приводит к образованию достаточно крупных агломератов капель после распыления, что, как известно, приводит к увеличению времени задержки зажигания топлива.

5. Установлено, что введение в состав типичного водоугольного топлива на основе углей марки ЗБ, Д и Т 3 мас.% изопропилового спирта и 8 мас.% жидких отходов переработки резинотехнических изделий и отработанного моторного масла приводит к снижению средней скорости струи до 10, 13 и 14%, соответственно. Таким образом, использование жидких горючих компонентов снижает среднюю скорость капель, что приводит к увеличению времени их пребывания в камере сгорания,

снижению недожога и, соответственно, повышению эффективности работы котлов промышленной теплоэнергетики. При этом доказано, что невозможно описать изменение скорости частиц исследовавшихся составов одним законом.

6. Введение в состав типичного водоугольного топлива на основе углей марки ЗБ, Д и Т 3 мас.% изопропилового спирта и 8 мас.% жидких отходов переработки резинотехнических изделий и отработанного моторного масла не приводит к значительному снижению (до 2, 8 и 5%, соответственно) числа капель малого размера (до 300 мкм) после распыления.

7. Предельная концентрация изопропилового спирта в качестве жидкого горючего компонента в составе суспензионного топлива на основе углей марки ЗБ, Д и Т составляет не более 3 мас.%, а жидких отходов переработки резинотехнических изделий и отработанного моторного масла – не более 8 мас.%.

### ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Gvozdyakov D.V., **Zenkov A.V.**, Kuznetsov G.V. Ignition of coal-water fuel droplets with addition of isopropyl alcohol // International Journal of Energy Research. – 2021. – Vol. 45(2). – P. 1535-1549 (IF=3,741, Q<sub>2</sub>) [Scopus, WoS].

2. Gvozdyakov D.V., **Zenkov A.V.** Effect of isopropyl alcohol concentration on the size and number of droplets after coal-water fuel spraying // Journal of Energy Engineering. – 2021. – Vol. 147(3). – Article number 05021001 (IF=1,33, Q<sub>2</sub>) [Scopus, WoS].

3. Gvozdyakov D.V., Gubin V.E., Larionov K.B., **Zenkov A.V.** Ignition of Coal-Water Fuel with the Addition of the Liquid Fraction of Rubber Pyrolysis Products // Chemical and Petroleum Engineering. – 2020. – Vol. 56(1-2). – P. 42-47 (IF=0,35, Q<sub>3</sub>) [Scopus, WoS].

4. Kuznetsov G.V., Syrodoy S.V., Purin M.V., **Zenkov A.V.**, Gvozdyakov D.V., Larionov K.B. Justification of the possibility of car tires recycling as part of coal-water composites // Journal of Environmental Chemical Engineering. – 2021. – Vol. 9(1). – Article number 104741 (IF=4,3, Q<sub>1</sub>) [Scopus, WoS].

5. Tolokolnikov A.A., Yankovsky S.A., Gubin V.E., **Zenkov A.V.**, Zaitsev A.S. Research of Mechanical Treatment Influence on Rheological Properties of Coal-Water Fuel Based on Low-Grade 3B Coal // MATEC Web of Conferences. – 2016. – Vol. 91, Article number 01012 (IF=0,44) [Scopus, WoS].

6. **Zenkov A.**, Larionov K., Gubin V. Review of coal-water fuel pulverization technology and atomization quality registration methods. // MATEC Web of Conferences. – 2017. – Vol. 110. – Article number 01091 (IF=0,44) [Scopus, WoS].

7. **Zenkov A.**, Larionov K., Yankovsky S., Lavrinenko S. Research of rheological properties improvement methods of coal-water fuel based on low-grade coal. // MATEC Web of Conferences. – 2017. – Vol. 141. – Article number 01018 (IF=0,44) [Scopus, WoS].

8. **Zenkov A.V.**, Gvozdyakov D.V., Gubin V.E. Analysis of coal-water fuel flow structure in the process of coaxial spraying. // AIP Conference Proceedings. – 2019. – Vol. 2135. – Article number 020064 (IF=0,4) [Scopus, WoS].

9. Gvozdyakov D.V., **Zenkov A.V.**, Gubin V.E. Experimental research of flow characteristics of coaxially atomized coal-water fuel. // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1359(1). – Article number 012040 (IF=0,23) [Scopus, WoS].

10. Гвоздяков Д.В., **Зенков А.В.**, Губин В.Е., Ведяшкин М.В. К вопросу об исследовании структуры потока водоугольного топлива в процессе его пневмомеханического распыла // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2018. – Т. 18, №4. – С. 5-12. **№ 687 в Перечне ВАК, утв. в 2015 г.**

11. Гвоздяков Д.В., **Зенков А.В.**, Губин В.Е., Ведяшкин М.В. Влияние коэффициента поверхностного натяжения суспензионного топлива на механизм дробления капель различных размеров // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2019. – Т. 23, №4 (147). – С. 775-786. **№ 334 в Перечне ВАК, утв. в 2015 г.**

12. Гвоздяков Д.В., **Зенков А.В.**, Губин В.Е., Ведяшкин М.В. Экспериментальные исследования влияния давления суспензионного топлива и воздуха на структуру факела в процессе распыла // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2019. – Т. 21, №5. – С. 110-123. **№ 992 в Перечне ВАК, утв. в 2015 г.**

13. **А.В. Зенков**, Д.В. Гвоздяков, В.Е. Губин. Влияние жидких горючих компонент на вязкость водоугольного топлива // Вестник ЮУрГУ. Серия: Энергетика. – 2020. – Т. 20, №3. – С. 26–32. **№ 687 в Перечне ВАК, утв. в 2015 г.**

14. Гвоздяков Д.В., Губин В.Е., **Зенков А.В.** Характеристики процесса распыления водоугольных топлив с добавками жидких отходов переработки резинотехнических изделий // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2021. – №2. – С. 37-40. **№ 44 в перечне изданий, входящих в МРБД и СЦ.**