

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

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

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук, доцент
Губин Владимир Евгеньевич

Томск – 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРИМЕНЕНИЯ ВОДОУГОЛЬНЫХ ТОПЛИВ В ЭНЕРГЕТИКЕ.....	18
1.1. Водоугольное топливо	18
1.2. Реологические свойства водоугольных топлив	19
1.3. Распыление водоугольных топлив	22
1.4. Задачи исследования	24
ГЛАВА 2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ	26
2.1. Характеристика объекта исследования.....	26
2.2. Лабораторное оборудование и методика проведения исследований	30
2.3. Оценка погрешностей измерений	36
2.4. Выводы по второй главе	38
ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ СУСПЕНЗИОННЫХ ТОПЛИВ.....	40
3.1. Свойства водоугольных топлив с добавлением изопропилового спирта	40
3.2. Свойства водоугольных топлив с добавлением жидких отходов переработки РТИ	45
3.3. Свойства водоугольных топлив с добавлением отработанного моторного масла	50
3.4. Сравнение свойств водоугольных топлив с добавлением жидких горючих компонентов	55
3.5. Выводы по третьей главе:	59
ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА РАСПЫЛЕНИЯ СУСПЕНЗИОННЫХ ТОПЛИВ.....	60
4.1. Скорость распыленной струи суспензионного топлива	60
4.1.1. Скорость распыленной струи водоугольного топлива без добавления жидких горючих компонентов	61
4.1.2. Скорость распыленной струи водоугольного топлива с добавлением изопропилового спирта.....	63
4.1.3. Скорость распыленной струи водоугольного топлива с добавлением жидких отходов переработки РТИ.....	65
4.1.4. Скорость распыленной струи водоугольного топлива с добавлением отработанного моторного масла	67

4.1.5 Сравнение скоростей распыленной струи водоугольного топлива с добавлением жидких горючих компонентов	69
4.2 Распределение по размерам капель распыленной струи водоугольного топлива	72
4.2.1 Распределение по размерам капель распыленной струи водоугольного топлива без добавления жидких горючих компонентов	72
4.2.2 Распределение по размерам капель распыленной струи водоугольного топлива с добавлением изопропилового спирта	74
4.2.3 Распределение по размерам капель распыленной струи водоугольного топлива с добавлением жидких отходов переработки РТИ	78
4.2.4 Распределение по размерам капель распыленной струи водоугольного топлива с добавлением отработанного моторного масла	82
4.2.5 Сравнение распределения по размерам капель распыленной струи водоугольного топлива с добавлением жидких горючих компонентов	86
4.3 Угол раскрытия струи	87
4.3.1 Угол раскрытия распыленной струи водоугольного топлива без добавления жидких горючих компонентов	87
4.3.2 Угол раскрытия распыленной струи водоугольного топлива с добавлением изопропилового спирта	88
4.3.3 Угол раскрытия распыленной струи водоугольного топлива с добавлением жидких отходов переработки РТИ	90
4.3.4 Угол раскрытия распыленной струи водоугольного топлива с добавлением отработанного моторного масла	93
4.3.5 Сравнение угла раскрытия распыленной струи водоугольного топлива с добавлением жидких горючих компонентов	96
4.4 Выводы по четвертой главе:	98
ГЛАВА 5. ОБОСНОВАНИЕ ПРЕДЕЛЬНЫХ КОНЦЕНТРАЦИЙ ЖИДКИХ ГОРЮЧИХ ДОБАВОК В СОСТАВЕ ВОДОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА И РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ	100
5.1 Обоснование предельных концентраций жидких горючих добавок в составе водоугольного топлива	100
5.2 Рекомендации по использованию результатов исследования	102
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	104
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ	106

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	107
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Патент на изобретение.....	121
ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Акт о внедрении.....	122

ВВЕДЕНИЕ

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 (рисунок 1). При этом треть таких котельных работает на угле (рисунок 2) [1].



Рисунок 1 – Мощность источников теплоснабжения Российской Федерации по видам источников в 2014-2018 гг., тыс. Гкал/ч [1]

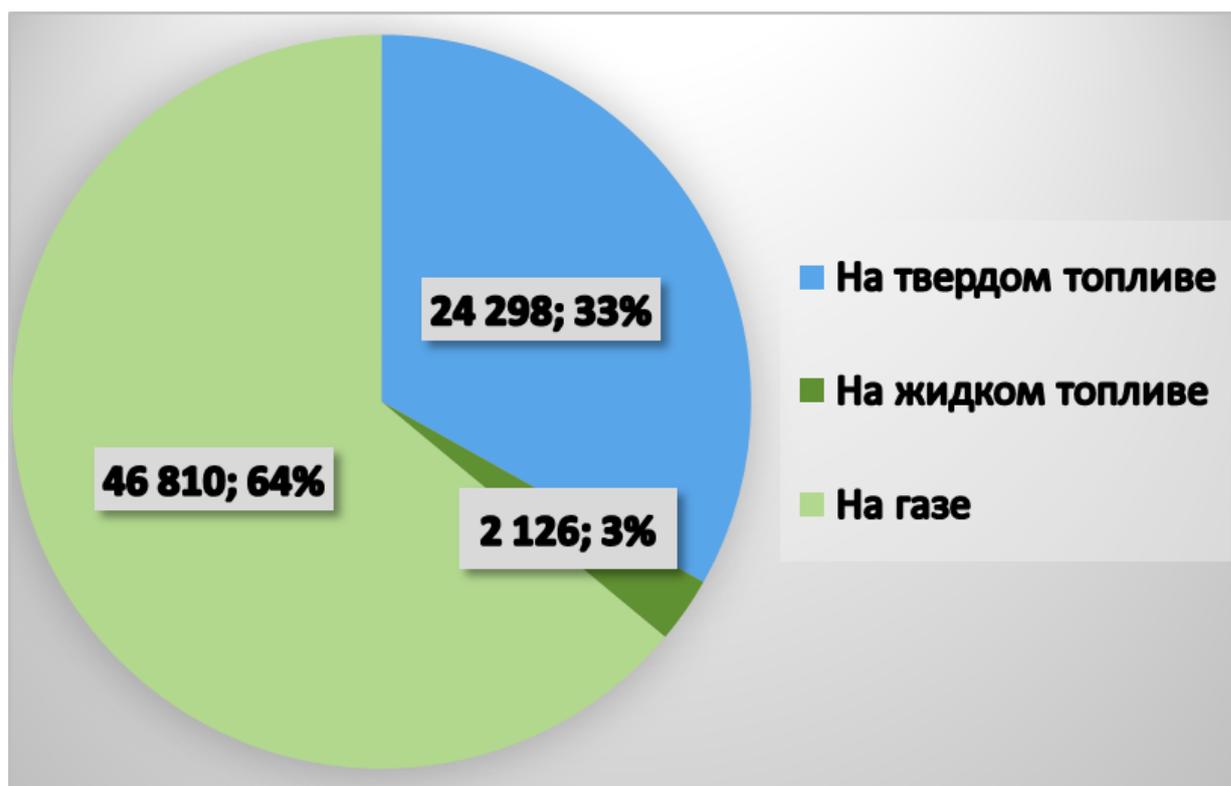


Рисунок 2 – Количество котельных в Российской Федерации в 2018 году, ед. [1]

В последние годы потребление угля в мире для выработки энергии изменяется незначительно [2]. Это вызвано активным использованием твердого топлива в энергетическом секторе России, Китая, Индии и других стран [2–4]. После снижения потребления угля в период 2014-2016 годов, данный показатель в мировом масштабе в 2018 году увеличился на 1,6% [2,5,6]. Основной вклад в это внесли Россия, Китай и Индия, однако, потребление угля также увеличилось и в ряде европейских стран (таблица 1). В 2019 году отмечено незначительное снижение потребления угля в мире (на 0,6%) [7]. Согласно экспертным прогнозам [8] 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.

Таблица 1 – Потребление угля, эксаджоуль [7]

Страна	2016	2017	2018	2019
Россия	8,12	8,62	9,23	9,20
Казахстан	1,85	2,02	2,13	2,08
Китай	70,82	73,17	76,58	79,82
Индия	11,89	11,99	12,80	12,73
Индонезия	11,25	11,38	13,76	15,05
Япония	0,03	0,02	0,02	0,02
Пакистан	0,08	0,08	0,08	0,12
Австралия	12,83	12,50	13,06	13,15
Южная Корея	0,03	0,03	0,02	0,02
Вьетнам	0,90	0,90	0,98	1,08
Таиланд	0,18	0,17	0,16	0,15
ЮАР	6,01	5,97	5,99	6,02
Турция	0,65	0,63	0,69	0,70
Польша	2,18	2,08	1,98	1,87
Германия	1,66	1,65	1,58	1,27
Болгария	0,21	0,24	0,22	0,20
Бразилия	0,11	0,09	0,10	0,12
Мексика	0,25	0,31	0,28	0,26

Несмотря на активное продвижение и постепенное усиление позиций возобновляемых источников энергии, их мощности (порядка 8% мировой) недостаточно для покрытия требуемой нагрузки [2]. Также, во многих странах мира отсутствует возможность внедрения энергопроизводящих установок на альтернативных источниках энергии ввиду географического расположения. В связи с этим выработка тепловой энергии на ТЭЦ и локальных котельных, работающих на угле, увеличивается (либо незначительно снижается), в том числе и в ряде европейских стран, широко использующих возобновляемые источники. Это относится и к Японии, полагающейся в основном на атомную энергетику и сжигание различных отходов [9].

В России распределение выработки по источникам энергии отличается от региона к региону. В европейской части страны (включая Урал) теплоэнергетика в основном основана на природном газе, в то время как в Сибири и на Дальнем Востоке преобладает доля угля [4]. Однако, высококачественные угли, добываемые

в России, либо экспортируются за рубеж, либо используются на химических и металлургических предприятиях [10], оставляя объектам энергетики всего порядка 30% [4]. Тем не менее, к 2030 году ожидается рост поставок российского угля для теплоэнергетики на внутреннем рынке со 102 млн. тонн в 2010 году до 150 млн. тонн при увеличении доли экспорта в поставках угольной продукции за этот период с 38,5% до 45,6% [11].

Однако прямое сжигание углеродных топлив на локальных котельных влечет за собой выброс в атмосферу значительного количества вредных веществ (NO_x , SO_x , CO_2 , CH_4) [5,10]. Угольные котельные вносят значительный вклад в тот факт, что Россия входит в пятерку стран с самыми большими выбросами парниковых газов, наряду с Китаем, США, Индией и Германией [12].

Несмотря на снижение использования угля в качестве основного топлива объектов энергетики во многих странах Европы, а также США [2,6], мировое потребление его в ближайшие десятилетия снизится незначительно, так как применение угля в энергетике развивающихся стран будет продолжать расти для поддержания темпов развития (в основном за счет Индии и Юго-Восточной Азии) [5]. Уголь и его продукты горения также являются источником различных важных элементов (уран, германий, иттрий, редкоземельные элементы, галлий, алюминий, золото, серебро и др.), что представляет огромный интерес в развитии технологий его использования в углехимии [13].

Несмотря на все усилия мирового сообщества, направленные на выполнение условий Парижского Соглашения [14], в 2017 году отмечено увеличение мировых выбросов CO_2 от производства энергии на 1,4% (после трех лет сдерживания данного показателя на одном уровне) [15]. Согласно экспертным оценкам [7] в 2020 году ожидается пиковое значение данного показателя, а к 2050 году прогнозируется снижение выбросов лишь на 10%.

В настоящее время ведутся разработки различных технологий, направленных на снижение вредных выбросов объектов энергетики, работающих на угле, [16] и обеспечивающих повышение энергетических характеристик угля. К

таким технологиям относятся: направление HELE (high-efficiency low emission) [17], нанесение иницирующих добавок в виде нитрата аммония, меди и др. [18,19], сжигание композитных топлив на основе угля и биомассы [20,21], низкотемпературный и циркулирующий кипящий слой [22] и др.

Одним из наиболее многообещающих направлений развития угольной энергетики является использование суспензионных топлив. Суспензионное топливо может представлять собой смесь мелкодисперсного угля, жидкой среды и различных добавок. В настоящее время известны исследования водоугольного топлива (ВУТ) с добавлением нефтепродуктов [23], глицерина [24], спиртов [25], а также органоводоугольных топлив [26].

Исследования, направленные на изучение и создание угольных суспензий, проводились в России еще в середине прошлого века. В 1959 году были начаты работы по созданию и энергетическому использованию водоугольных суспензий по заданию Госплана СССР из-за необходимости утилизации угольных шламов. «Первопроходцами» в данном направлении были Институт горючих ископаемых (ИГИ) и Энергетический Институт имени Кржижановского (ЭНИИ). Их исследования были направлены на разработку технологии утилизации дисперсных угольных шламов, загрязняющих окружающую среду, образующихся в результате гидравлической добычи, обогащения и гидротранспортирования угля из шахты [27,28].

Тема ВУТ стала особенно популярной в 70-е годы прошлого века. Предполагалось использовать его для сжигания в котлах как альтернативу мазуту. Для этого необходимо было получать суспензию высокого качества с меньшими издержками. Создавались проекты по трубопроводному транспортированию ВУТ на дальние расстояния, применению его в двигателях внутреннего сгорания и газогенераторах [29].

Наиболее интенсивное развитие технологии ВУТ пришлось на период нефтяного кризиса 1973 года в таких развитых странах как США, Китай, Япония, Швеция и др., где уголь стали рассматривать как альтернативный вид топлива,

взамен нефтепродуктам [30]. Таким образом, в данном направлении в последующие несколько лет были выполнены целые серии научных работ по созданию и эксплуатационному применению водоугольного топлива. После активной проработки ряда вопросов в лабораторных условиях, в первой половине 80-ых годов под данный вид топлива были модернизированы и запущены энергетические котлы на действующих объектах энергетики. После удачной серии промышленных опытов во многих ведущих угледобывающих странах мира доля получаемой энергии с использованием ВУТ стала увеличиваться, показывая, что основные характеристики ВУТ принципиально не уступают другим видам топлива.

Наиболее известным отечественным проектом использования водоугольного топлива является внедрение трубопроводного комплекса «Белово-Новосибирск» в 1989 году. В рамках проекта был спроектирован и построен терминал приготовления ВУТ в г. Белово и сам трубопровод протяженностью 262 км [28]. Сжигание суспензии производилось на Новосибирской ТЭЦ-5. В результате эксплуатации данного технологического комплекса было передано по трубопроводу и сожжено в энергетических котлах с получением энергии 400 тыс. т ВУТ [29]. К сожалению, этот проект был приостановлен с целью профилактических работ на ТЭЦ-5, но не был запущен из-за серьезных политических перемен и экономических проблем в стране. Тем не менее, этот положительный опыт подтвердил возможность использования водоугольного топлива в энергетической отрасли.

В настоящее время наибольший размах работы по ВУТ получили в Китае, где они активно поддерживаются государством и коммерческими организациями. Данной тематикой в Китае занимаются несколько исследовательских государственных центров [31].

Несмотря на активное использование водоугольного топлива рядом стран, некоторые проблемы остаются нерешенными. 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. При этом большинство исследований в области суспензионных топлив в настоящее время направлены на изучение характеристик зажигания и горения.

За последние десятилетия было проведено большое количество исследований, направленных на изучение суспензионных топлив. Наибольший вклад 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 M., Liu J., Liu H., Manwani P., Mohapatra S.K., Pisupati S.V., Svoboda K., Sakai T., Wang H., Zhu M. и др. известные ученые.

Несмотря на глубокий фундаментальный задел в области изучения суспензионного топлива, созданный проведенными исследованиями, ряд проблем все еще остается нерешенным.

Целью диссертационной 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 решены 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 исследованных 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.

Научные положения, результаты и выводы, 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 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, Q₁), «International Journal of Energy Research» (IF=3,741, Q₂), «Journal of Energy Engineering» (IF=1,33, Q₂), «Chemical and Petroleum Engineering» (IF=0,35, Q₃), MATEC 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 (ПРИЛОЖЕНИЕ 1) и 1 акт о внедрении (ПРИЛОЖЕНИЕ 2).

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 проанализировано современное состояние экспериментальных исследований реологических свойств водоугольных топлив.

Изучены результаты экспериментальных и теоретических исследований распыления водоугольных суспензий. Определены основные достижения и нерешенные задачи. Установлена недостаточность экспериментальной информации о реологических свойствах водоугольного топлива с добавками выбранных жидких горючих компонентов, а также отсутствие экспериментальных и теоретических исследований распыления таких топлив.

Во второй главе приведены характеристики объекта исследования. Представлена схема экспериментального стенда, а также методика исследования характеристик распыления (скорость и размер капель, угол раскрытия струи) водоугольных топлив с добавлением жидких горючих компонентов. Представлена методика экспериментальных исследований свойств (вязкость, плотность, коэффициент поверхностного натяжения) водоугольных топлив с добавлением жидких горючих компонентов. Проведена оценка погрешностей измерений.

В третьей главе представлены основные результаты проведенных экспериментальных исследований свойств (вязкость, плотность, коэффициент поверхностного натяжения) суспензионных топлив. Экспериментально установлено влияние типа жидких горючих компонентов и их концентрации на свойства суспензионных топлив.

В четвертой главе представлены основные результаты проведенных экспериментальных исследований распыления суспензионных топлив. Экспериментально установлено влияние типа жидких горючих компонентов и их концентрации на характеристики распыления (угол раскрытия струи, количество, размер и скорость капель) суспензионных топлив.

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.

В заключении подведены основные итоги экспериментальных исследований, сформулированы соответствующие выводы.

ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРИМЕНЕНИЯ ВОДОУГОЛЬНЫХ ТОПЛИВ В ЭНЕРГЕТИКЕ

1.1. Водоугольное топливо

Один из наиболее эффективных и экологически безопасных способов сжигания угля – это его сжигание в виде водоугольного топлива [32]. ВУТ представляет собой взвесь мелкодисперсного угля в воде с добавлением пластификатора [33,34], а также других горючих и стабилизирующих веществ [35]. Сжигание водоугольной суспензии в топках котлов снижает негативные последствия, возникающие в результате использования угля в чистом виде, а также не требует дорогостоящих методов очистки дымовых газов для снижения содержания оксидов азота и серы [36]. Процесс горения ВУТ характеризуется высокой полнотой выгорания (98-99%) и небольшим избытком воздуха в топке (3-5%) [37]. Наличие воды в виде перегретого пара в зоне горения топлива приводит к образованию микровзрывов, что в свою очередь приводит к более тонкому распылению углеродной основы [38]. При этом водоугольные топлива уступают высокоуглеродистым видам топлива по количеству углерода [39] и калорийности. Данную проблему можно решить с помощью ввода в состав ВУТ дополнительной жидкой горючей добавки.

Существует ряд работ по изучению органо-водоугольных топлив (ОВУТ). ОВУТ представляет собой водоугольное топливо с добавлением отработанного турбинного, моторного или трансформаторного масел, а также других отходов химической и нефтяной промышленности [40]. Дмитриенко М.А. и др. [41] проводили исследования технико-экономических характеристик ОВУТ с добавлением до 20 мас.% жидкого горючего компонента. В качестве такой добавки использовался широкий спектр веществ: мазут, ацетон, этанол, керосин, бензин, дизельное топливо, а также отработанное моторное, трансформаторное и турбинное масло. Установлено, что использование ОВУТ может быть экономически целесообразно в различных регионах России при наличии

достаточного количества исходного материала. Няшина Г.С. и др. [42] определили, что даже добавление небольшого количества (10-20 мас.%) жидкого горючего компонента в состав ВУТ приведет к повышению его теплотворной способности на 25-40%. В [43] утверждается, что сжигание водоугольного топлива с добавлением отработанного моторного масла и растительных добавок приводит к значительному снижению выбросов вредных веществ, таких как SO_x и NO_x .

Таким образом, водоугольное топливо является перспективной альтернативой прямому сжиганию угля. Однако такая технология имеет ряд ограничений, связанных с реологическими и энергетическими характеристиками, а также параметрами распыления ВУТ.

1.2. Реологические свойства водоугольных топлив

Известно, что чем больше вязкость, тем хуже жидкость течет. Высокое значение вязкости приводит к ухудшению распыления, образованию крупных агломератов топлива и появлению отложений на устройстве распыления и в камере сгорания [44]. Также известно, что повышение вязкости влечет за собой увеличение диаметра капель [45,46]. Следовательно, вязкость топлива напрямую влияет на качество его распыления и, в свою очередь, на эффективность сжигания [47].

Активные исследования реологических свойств водоугольного топлива проводились еще в прошлом столетии, как в России, так и за рубежом [48–51]. Известно, что ВУТ представляет собой разновидность неньютоновской жидкости [52–54] и ее реологическое поведение соответствует модели Гершеля-Балкли [55,56].

Реологические характеристики водоугольного топлива зависят от множества параметров: марки угля, концентрации компонентов, распределения капель по размеру, типа и количества пластификатора и других добавок, в том числе горючих. Так, для уменьшения вязкости и повышения стабильности водоугольного топлива активно изучаются уже существующие виды пластификаторов, а также разрабатываются новые [57–64]. Известны работы по

изучению реологических свойств водоугольного топлива с добавлением отработанного моторного масла [35,65]. Утверждается [65], что использование моторного масла смещает точку воспламенения суспензии в область более низких температур, а также повышает эффективность сгорания из-за более высокой теплотворной способности масла и возникновения микровзрыва при зажигании такого топлива.

В работе Барановой М.П. [66] представлено комплексное исследование вязкости водоугольного топлива из углей различной степени метаморфизма с добавлением различных пластификаторов, а также при использовании нескольких способов обработки суспензии.

Liu J. и др. [55] исследовали возможность использования смеси угля и осадка муниципальных сточных вод для его утилизации. Такой осадок обычно имеет не только высокое содержание органических веществ, но также токсичные и вредные вещества, такие как потенциально патогенные организмы, бактерии, тяжелые металлы и плохо разлагаемые микроэлементы. К тому же осадок сточных вод обладает повышенной влажностью (>80%), что сокращает количество воды, которую необходимо добавить в суспензию. Было установлено, что добавление шлама приводит к усилению псевдопластичности и тиксотропности суспензии, а ее реологическое поведение соответствует модели Гершеля-Балкли.

Известны исследования [52,67,68] влияния марки угля и его концентрации на реологические свойства водоугольного топлива. В [67] утверждается, что вязкость водоугольного топлива может быть уменьшена до определенного минимального значения путем оптимизации распределения частиц по размеру. Дальнейшее снижение вязкости достигается за счет использования химических добавок. Youli F. и др. [67] определили, что диаметр частиц угля не должен превышать 250 мкм, чтобы избежать проблем с расслоением, распылением и сжиганием таких топлив. Atesok G. и др. [52] установили, что на вязкость суспензии оказывает значительное влияние марка угля, т.е. его пористость, содержание летучих веществ, углерода и кислорода. Также утверждается, что большей

концентрации угля в суспензии можно достичь, используя уголь более высокой марки при большем среднем размере частиц топлива.

Не вызывает сомнения тот факт, что увеличение концентрации угля в составе водоугольного топлива приводит к повышению его теплотворной способности, однако при этом возрастает и вязкость суспензии, что несомненно затрудняет ее распыление [36]. Таким образом, логичным решением кажется добавление в состав водоугольного топлива жидких горючих компонентов для повышения его теплотворной способности. Последние несколько лет ведутся активные работы по исследованию многокомпонентных водоугольных топлив.

Известны исследования [69,70], утверждающие положительное влияние на вязкость водоугольного топлива небольшого количества дополнительного жидкого компонента в его составе. Zhang J. и др. [69] изучали влияние малого количества керосина на вязкость суспензии. В результате был разработан метод введения дополнительной жидкой добавки, дающий положительный эффект. Chen X. и др. [70] провели комплексное исследование влияния керосина, парафинового масла, дизельного топлива и масла селективной очистки на реологические характеристики водоугольного топлива. Установлено, что при определенной концентрации дополнительного жидкого компонента в составе ВУТ наблюдается снижение вязкости суспензии.

Авторы [71–73] исследовали спиртосодержащие водоугольные суспензии. В данных работах рассматривались метанол и этанол с массовой концентрацией в ВУТ от 20% до 45%, при этом массовое содержание воды составляло 5-30%. Такие составы сложно назвать водоугольным топливом с добавлением спирта. Скорее их можно классифицировать как спиртоугольные топлива с добавлением воды. Такие топлива невозможно использовать в теплоэнергетике по двум основным причинам. Первая – значительное удорожание такого топлива из-за высокой стоимости предложенных спиртов. Вторая – высокая пожарная опасность спиртоугольных топлив ввиду воспламеняемости этих спиртов при достаточно низких температурах. Однако установлено [72], что добавление спирта в состав ВУТ

способствует ускорению процесса зажигания суспензии, а также увеличивает время непосредственного горения пламени. В свою очередь, увеличенное время пиролиза угля в течение более длительного периода горения пламени приводит к образованию меньшего количества кокса и, следовательно, к снижению времени выгорания кокса. Таким образом данных о реологических свойствах водоугольных топлив с добавлением спирта в настоящий момент недостаточно. Поэтому целесообразно исследовать характеристики водоугольного топлива с относительно небольшими (3-12 мас.%) добавками недорогого спирта, например, изопропилового.

1.3 Распыление водоугольных топлив

Эффективность сжигания или газификации зависит от скорости массопереноса, поэтому изучение процесса распыления водоугольного топлива является весьма важным и актуальным вопросом [74].

Процессы распыления неньютоновских жидкостей широко освещены в литературе [75–80].

Известно [81], что важнейшими характеристиками распыления топлива являются угол раскрытия струи, скорость капель и их распределение по размеру. Эффективность его сжигания в значительной степени определяется траекторией капель, скоростью проникновения и временем пребывания внутри топочного пространства.

Характеристики распыляющих устройств были экспериментально изучены ранее с использованием методов оптической регистрации [82–85]. Также [86,87] представлены результаты моделирования распределения капель по размерам при распылении.

Установлено [88–90], что процесс распыления проходит в две стадии: первичное дробление (когда происходит предварительное удаление жидкой массы с поверхности, в результате чего образуются крупные капли) и вторичное дробление (образованные крупные капли разбиваются на более мелкие).

Установлено, что вторичное разрушение капель происходит по четырем причинам: столкновение друг с другом, с твердой поверхностью и потоком газа, а также микровзрывное разрушение [91]. Известно, что размер капель после распыления жидких топлив может быть различным, не смотря на то что свойства топлива изменяются незначительно [92].

Известны работы [81,93–95], направленные на изучение угла раскрытия струи, как одного из основных параметров, влияющих на эффективность сжигания распыленного топлива. Считается, что угол раскрытия струи должен быть таким, чтобы капли топлива были равномерно распределены по камере сгорания [96]. Такое распыление приводит к образованию большей площади поверхности распыленного потока, что в свою очередь повышает эффективность сжигания топлива.

В [97,98] проводилось исследование влияния давления основного потока и распыляющего агента на характеристики факела распыления. Установлено, что при значительном превышении давления основного потока над давлением распыляющего агента в двухфазном потоке преобладает жидкая компонента. В этом случае распыленный поток принимает форму струи. При значительном превышении давления распыляющего агента над давлением основного потока в двухфазном потоке преобладает распыляющий агент. В этом случае двухфазный поток на выходе из сопла демонстрировал характеристики цилиндрической воздушной струи, а угол ее раскрытия был небольшим. Только когда давление подачи распыляющего агента и давление подачи основного потока были относительно близки, взаимодействие между двумя фазами было относительно сильным. Выходная струя демонстрировала двухфазные (газожидкостные) характеристики смешения и имела большой угол распыления. Также установлено, что скорость капель распыленного потока в большей степени определяется энергией распыляющего агента.

Известны исследования распыления топлива для двигателей внутреннего сгорания в смеси со спиртами [99–102]. Однако процесс распыления водоугольного

топлива, содержащего изопропиловый спирт, отработанное моторное масло или жидкие отходы переработки резинотехнических изделий, в литературе освещен слабо. Скопление отходов после переработки резинотехнических изделий, а также отработанного моторного масла становится все большей проблемой мирового масштаба. Их утилизация в качестве компонентов суспензионных топлив будет способствовать решению этой проблемы, а также увеличению теплотворной способности топлива. Выбор изопропилового спирта обусловлен его дешевизной относительно других спиртов и нетоксичностью. В настоящее время спирты активно применяются в качестве добавки к различным видам топлива, например, дизельному, и даже в качестве основного топлива на станциях. Изопропиловый спирт также используется в качестве антисептика, поэтому объемы его производства довольно велики и в ближайшее время не уменьшатся. В связи с этим целесообразно провести исследования реологических свойств и характеристик распыления водоугольных топлив с добавлением этих жидких горючих компонентов для решения поставленных задач в области энергетики и экологии [103].

1.4 Задачи исследования

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.

ГЛАВА 2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1 Характеристика объекта исследования

В работе использовались 3 марки угля разной степени метаморфизма: бурый уголь (ЗБ, Балахтинский разрез, Канско-Ачинский угольный бассейн), длиннопламенный уголь (Д, Шахта Красноярская, Кемеровская область), тощий уголь (Т, шахта Алардинская, Кемеровская область), наиболее распространенные в энергетике; а также 3 вида жидких горючих добавок: изопропиловый спирт, жидкие отходы переработки резинотехнических изделий (РТИ) и отработанное моторное масло. Характеристики исследованных углей приведены в таблице 2.1, а характеристики исследованных горючих добавок представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.1 – Характеристики исследованных углей [104]

Характеристика	Образцы исследованных углей		
	ЗБ	Д	Т
Зольный остаток, мас.%	3,6	8,5	16,5
Внешняя влага, мас.%	0,8	0,5	0,3
Выход летучих веществ, мас.%	35,3	26,2	13,1
Содержание углерода, мас.%	60,3	63,8	70,1
Водопоглощение, г/г	3,2	2,9	2,6
Пористость			
Средний размер пор, нм	18,4	16,6	11,9
Суммарный объём пор, см ³ /г	0,02	0,02	0,01
Низшая теплота сгорания, МДж/кг	20,08	22,18	25,12

Из таблицы 2.1 следует, что исходные угли характеризуются отличными друг от друга физико-химическими свойствами. Угли марки ЗБ и Д имеют высокое значение выхода летучих веществ (29-40%). При этом уголь марки ЗБ, в отличие от марок Д и Т, характеризуется сравнительно небольшим значением зольного остатка (не более 3,6 мас.%) и углерода (около 60 мас.%).

Средний размер пор варьируется от 11,9 нм (уголь марки Т) до 18,4 нм (уголь марки ЗБ). Это объясняется тем, что каменные и бурые угли имеют различные морфологические свойства.

Несмотря на малую пористость (около 0,02 см³/г), данные угли характеризуются вполне приемлемым водопоглощением, что дает возможность подготовки водоугольных топлив на их основе.

Таблица 2.2 – Характеристики исследовавшихся жидких горючих добавок

Характеристика	Изопропиловый спирт	Жидкие отходы переработки резинотехнических изделий	Отработанное моторное масло
Общая химическая формула	C ₃ H ₈ O	-	-
Плотность, г/см ³	0,785	0,815	0,835
Температура замерзания, °С	-89	-43	-30
Температура самовоспламенения на воздухе, °С	400	113	260
Температура вспышки, °С	11,7	83	230
Низшая теплота сгорания, МДж/кг	33,4	40,6	41,8
Вязкость (при 20°С), мПа·с	2270	3500	4000
Смешиваемость с водой	смешивается	не смешивается	не смешивается

Из таблицы 2.2 видно, что предлагаемые жидкие горючие добавки обладают высокой низшей теплотой сгорания, что в свою очередь увеличит низшую теплоту сгорания получаемого суспензионного топлива и снизит время задержки зажигания по сравнению с типичными водоугольными топливами.

Жидкие отходы переработки РТИ были получены на лабораторном стенде из изношенных летних шин легковых автомобилей. Перед проведением паровой

газификации, шины подвергались измельчению с помощью режущего инструмента. Размер исследовавшихся образцов (ширина × высота × длина) составлял 7x1x7 см. В трубчатый реактор паровой газификации, работающий в периодическом режиме, загружается образец РТИ массой 0.5 кг в емкость, выполненную из металлической сетки, плотно зафиксированную в объеме реакционной камеры. Далее реактор плотно герметизируется, после чего открывается регулирующее устройство для постоянной продувки системы паром и последующего высвобождения газов, образующихся в ходе процесса разложения РТИ. Водяной пар генерируется в парогенераторе, который снабжается с помощью насосов химически обработанной водой из резервуара. Расход пара регулируется игольчатой задвижкой на входе в реактор и контролируется с помощью жидкостного расходомера, установленного перед парогенератором. Далее пар, нагретый до 120°C, проходит через первую ступень пароперегревателя и дополнительный теплообменник, в котором происходит его перегрев до необходимой температуры с помощью воздушонагревателя. Образующиеся в процессе паровой газификации РТИ парогазовые продукты конденсируются в трубчатом конденсаторе, после которого получаемые жидкофазные (вода и жидкая углеводородная фракция) продукты сливаются в отстойную емкость. Контроль температуры внутри реактора и в межтрубном продуваемом зазоре (для поддержания постоянной равномерной температуры) ведется непрерывно с помощью установленных термопар, подключенных к многоканальному регистратору. Паровая газификация исследовавшихся образцов изношенных автомобильных шин проводилась при температуре пара 500°C и расходе 5 кг/ч в течение 1 часа.

В качестве отработанного моторного масла использовалось масло Castrol Edge 5W-40, прошедшее эксплуатацию в автомобиле Ford Focus в течение 10 тыс. км.

Схема подготовки суспензионного топлива представлена на рисунке 2.1. 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 жидкая горючая добавка и проводился дополнительный помол в течение 1 часа. Помимо этого, для сравнения, был подготовлен образец водоугольного топлива без добавления горючих добавок. Исследуемые составы представлены в таблице 2.3.



Рисунок 2.1 – Схема подготовки топлива

Таблица 2.3 – Исследованные составы суспензионного топлива

Марка угля	Содержание угля, мас.%	Содержание воды, мас.%	Содержание пластификатора, мас.%	Содержание жидкой горючей добавки, мас.%
ЗБ	50	49	1	0
		46		3
		44		5
		41		8
		37		12
Д	50	49	1	0
		46		3
		44		5
		41		8
		37		12

Продолжение таблицы 2.3

Т	50	49	1	0
		46		3
		44		5
		41		8
		37		12

2.2 Лабораторное оборудование и методика проведения исследований

Измерение вязкости производилось с помощью ротационного вискозиметра Brookfield RVDV-II+ Pro (рисунок 2.2а). Эксперименты по исследованию плотности водоугольных топлив выполнялись ареометрами общего назначения с различным диапазоном измеряемой величины (рисунок 2.2б). Измерение коэффициента поверхностного натяжения проводилось с помощью тензиометра Кб KRUSS (рисунок 2.2в). Все эксперименты выполнены в одинаковых и хорошо воспроизводимых условиях (при комнатной температуре $25 \pm 0,1^\circ\text{C}$ и др.).

Для измерения динамической вязкости необходимое количество суспензионного топлива помещалось в мерный стакан цилиндрической формы диаметром 100 мм. Шпindel вискозиметра располагался в стакане по центру, после чего производился запуск прибора. 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. Было проведено 5 измерений для каждого исследуемого состава топлива.

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. Было проведено 5 измерений для каждого исследуемого состава топлива.

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 для каждого исследуемого состава топлива.



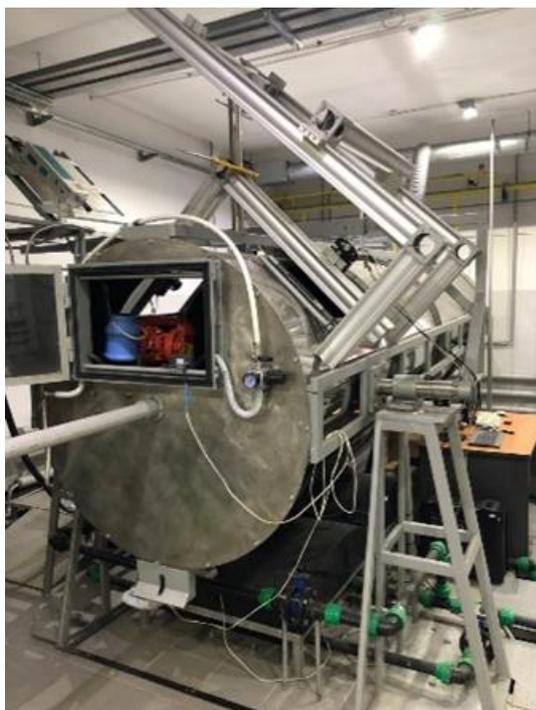
Рисунок 2.2 – Оборудование для проведения исследований реологических свойств суспензионных топлив: а – вискозиметр Brookfield RVDV-II+ Pro; б – ареометр АОН-1; в – тензиометр KRUSS K6

Исследования процесса распыления суспензионных топлив проводились с помощью стенда, представленного на рисунке 2.3.

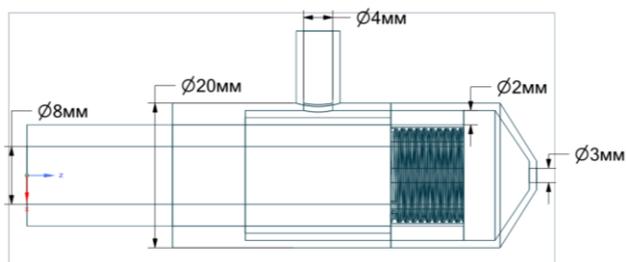


Рисунок 2.3 – Принципиальная схема стенда для исследования процессов распыления суспензионных топлив [105]

Распыление производилось в цилиндрической конструкции диаметром 2 м и длиной 6 м (рисунок 2.4а). Подача водоугольной суспензии осуществлялась из бака запаса топлива при помощи насоса с пневматическим приводом Yamada NDP15 (рисунок 2.4б, максимальная вязкость перекачиваемой среды 5000 мПа·с). Распыляющий агент (воздух) подавался компрессором на пневматическую форсунку с внутренним смешением (рисунок 2.4в) и диаметром канала сопла 3 мм. Такие форсунки положительно зарекомендовали себя при распылении вязких жидкостей при низком давлении [106]. Процесс пневматического распыления суспензионного топлива представлен на рисунке 2.4г.



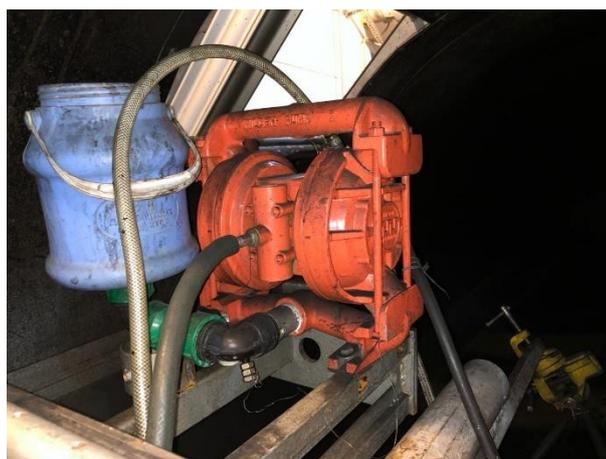
а)



в)



г)



б)

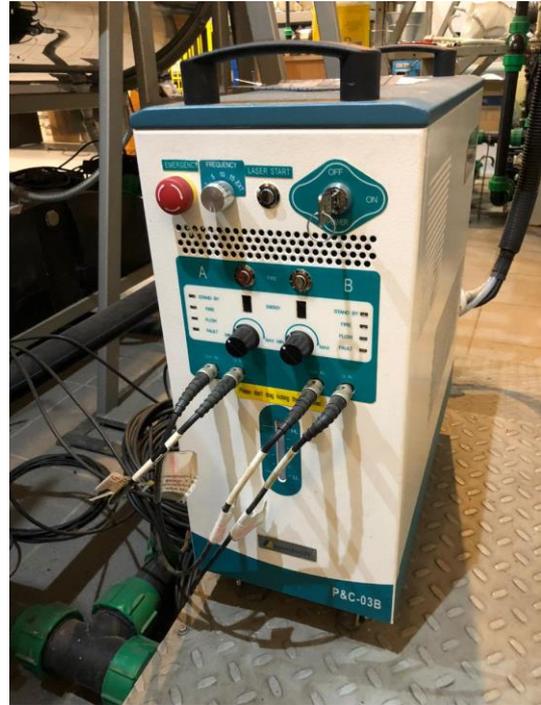
Рисунок 2.4 – Стенд для исследования процессов распыления суспензионных топлив: а – общий вид; б – фотография насоса NDP15; в – чертеж форсунки; г – фотография форсунки в работе [105]

Подсветка распыляемого потока топлива выполнялась лазерным ножом, ориентированным по оси факела. Лазерный нож создавался лазером Beamtech Vlite-200 с двойным импульсом (рисунок 2.5а,б). Характеристики лазера приведены в таблице 2.4. Регистрация процесса распыления осуществлялась камерой ImperX Bobcat B2020 (рисунок 2.5в, таблица 2.4) и объективом марки

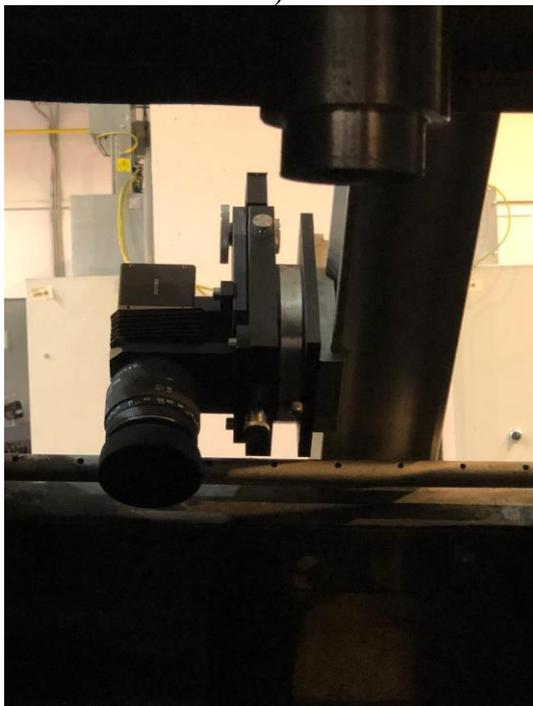
Nikon с фокусным расстоянием 50 мм и углом обзора 46°. Синхронизация работы лазера и камеры осуществлялась блоком синхронизации SP-2.0 ПС (рисунок 2.5г).



а)



б)



в)



г)

Рисунок 2.5 – Фотографии оборудования для реализации измерений методами PIV и PPI: а – импульсный лазер; б – блок управления лазером; в – кросскорреляционная видеокамера; г – синхронизатор сигналов

Таблица 2.4 – Характеристики лазера Beamtech Vlite-200 и камеры ImperX Bobcat B2020

Лазер Beamtech Vlite-200	Значение	Камера ImperX Bobcat B2020	Значение
Длина волны, нм	532	Разрешение, пикс	2048x2048
Частота, Гц	1-15	Максимальное разрешение, пикс	2056x2060
Энергия импульса, мДж	200	Сенсор	КАI-04022, CCD
Энергетическая устойчивость	$\leq 2\%$	Формат сенсора	оптический 4/3"
Продолжительность импульса, нс	6-8	Частота кадров стандартная, кадров в секунду	40 МГц/16
Отклонение, мрад	≤ 3	Частота кадров разогнанная, кадров в секунду	50 МГц/20
Точность наведения, мкрад	≤ 50	Баланс	Аналоговый и цифровой
Диаметр луча, мм	7	Скорость действия затвора, сек	От 1/100000 до 1/16
Задержка данных, нс	≤ 1	Двойной межкадровый триггер, наносекунд	200
Спектральная чистота	$\geq 99,8\%$	Вибрация, Гц	100г (20-200) XYZ, 1000г

При проведении экспериментов давление воздуха устанавливалось на 0,02 МПа меньше давления основного потока с целью исключения эффекта «задавливания» вязкого топлива потоком воздуха в форсунке. Согласно [97], были выбраны близкие значения давления основного потока и распыляющего агента – 0,3/0,28 МПа. Такие давления являются типичными для котлов промышленной теплоэнергетики.

Регистрация структуры установившегося потока распыляемых топливных суспензий и скорости капель выполнялась методом PIV (Particle Image Velocimetry, метод цифровой трассерной визуализации). Это техника измерений, которая позволяет улавливать мгновенные поля скорости [107,108]. Принцип данного метода заключается в том, что происходит захват двух изображений с определенной задержкой. Скорость капель определяется путем деления полученного смещения на известное время движения [109]. Время проведения

эксперимента составляло 120 с, что является достаточным для формирования стабильной структуры струи. Размеры области регистрации: 0,2 м в направлении распыла, 0,2 м перпендикулярно оси факела. Экспериментальные исследования струи суспензионного топлива после распыления производились с помощью программного обеспечения (ПО) ActualFlow. Обработка полученных изображений выполнена в том же ПО. Для определения скорости капель суспензионного топлива использовался стандартный кросскорреляционный метод (функция Standard CCF). Расчет проведен методом прямого вычисления свертки с целью избежать нежелательных эффектов, присущих преобразованию Фурье (в частности, систематическую ошибку определения смещения капель).

Для определения размеров капель распыленного потока использовался метод IPI (Interferometric Particle Imaging, Интерферометрический метод измерения диаметров капель) [110]. В данном методе используется специальная оптика, которая преломляет свет лазера, создавая интерференционные полосы [111,112]. При определении размеров капель также использовалась экспериментальная установка, представленная на рисунке 2.3. Для этого перед объективом камеры добавлялось специальное устройство для получения интерференционных полос – блок оптического сжатия интерференционных картин (БОС) [110]. Обработка полученных данных также осуществлялась с помощью специализированного программного обеспечения ActualFlow (функция IPI Reconstruction).

2.3 Оценка погрешностей измерений

Согласно [113], при измерении вязкости с помощью ротационного вискозиметра может возникать погрешность из-за некачественного контроля температуры (около 3-4%). Данная погрешность была минимизирована путем контроля температуры в помещении и поддержания ее с помощью внешнего обогревателя $25 \pm 0,1^\circ\text{C}$. Погрешность измерений вискозиметра Brookfield RVDV-II+ Pro составляет до 1%. Погрешность измерений ареометра АОН-1 составляет ± 1 кг/м³. Погрешность измерений тензиометра KRUSS К6 составляет до 1%.

Известно, что источниками погрешности метода PIV могут выступать локальный градиент скорости; размер, концентрация и смещение капель; оптические эффекты и т.д. [114]. Однако погрешность данной техники измерения профилей скорости не превышает 8% [107,115,116].

По различным оценкам погрешность метода PIV в идеальном случае может составлять 1,5-2% [112,117,118]. Оценка данной погрешности автором составила 2%.

Алгоритм расчёта случайных погрешностей разработан в соответствии с математическим аппаратом теории ошибок [119,120]. Для оценки случайных погрешностей для каждого состава суспензионного топлива проводилось несколько экспериментов в одинаковых условиях. За наиболее вероятное значение исследуемой величины принималось среднее арифметическое значение результатов измерений:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i. \quad (1)$$

Среднеквадратическое отклонение (СКО) результатов измерений рассчитывалось по формуле:

$$S_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{(N - 1)}}, \quad (2)$$

где N – число экспериментов.

Известно [119,120], что случайные погрешности являются следствием неконтролируемых малозначимых процессов. Поэтому точно определить интервал изменения измеряемой величины затруднительно. Его можно вычислить только с некоторой доверительной вероятностью P_3 . Для оценки погрешностей результатов измерений в экспериментах принята доверительная вероятность $P_3=0,95$. При такой доверительной вероятности можно считать, что истинное значение величины x не отличается от величины среднего арифметического значения больше, чем на $\pm\Delta x$. Значение коэффициента Стьюдента выбиралось из таблиц [119].

Доверительный интервал случайной погрешности измерений:

$$\Delta x_{\text{сл}} = \tau_{\alpha}(n) \cdot S_{\bar{x}}. \quad (3)$$

Абсолютная погрешность измерений с учетом случайной и инструментальной погрешностей:

$$\Delta x = \sqrt{\left(\frac{2}{3} \Delta x_{\text{сист}}\right)^2 + \Delta x_{\text{сл}}^2}. \quad (4)$$

Множитель $2/3$ используется для учета доверительных вероятностей определения случайной и инструментальной погрешностей. Случайная погрешность рассчитывалась для доверительной вероятности $P_3=0,95$, а инструментальная погрешность прибора – для доверительной вероятности $P_3=1$.

Относительная погрешность измерений:

$$\varepsilon = \frac{\Delta x}{\bar{x}} \cdot 100\%. \quad (5)$$

Конечный результат измерений:

$$x = \bar{x} \pm \Delta x. \quad (6)$$

2.4 Выводы по второй главе

1. Выполнен анализ существующих методик исследований реологических свойств и характеристик распыления водоугольных топлив. Выбрана методика для измерения вязкости ВУТ с помощью ротационного вискозиметра, плотности – с помощью ареометров общего назначения, коэффициента поверхностного натяжения – с помощью тензиометра.
2. Разработан и смонтирован стенд для исследования характеристик распыления суспензионных топлив. Разработанный стенд для экспериментальных исследований дает возможность определять качество распыления многокомпонентных водоугольных топлив при варьировании концентрации компонентов, вязкости, а также давления подачи суспензии и распыляющего агента. Это позволит в дальнейшем сформировать рекомендации для практического применения полученных результатов на локальных котельных.

3. Выполнен выбор и анализ компонентов для приготовления суспензионных топлив, которые целесообразно использовать для сжигания в топках котлов промышленной теплоэнергетики. Определены исследуемые составы и концентрации компонентов таких топлив.
4. Проведена оценка погрешности измерений. Установлено, что погрешность измерения вязкости сводится к погрешности инструмента измерения, т.е. вискозиметра, и составляет до 1%. Погрешность измерений ареометра АОН-1 составляет ± 1 кг/м³, а тензиометра KRUSS К6 – до 1%. Погрешность метода PIV составляет не более 8%, а метода IPI – 2%.

ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ СУСПЕНЗИОННЫХ ТОПЛИВ

3.1 Свойства водоугольных топлив с добавлением изопрпилового спирта

На рисунке 3.1-3.3 представлены зависимости динамической вязкости водоугольного топлива на основе углей марки ЗБ, Д и Т с добавлением изопрпилового спирта от скорости сдвига.

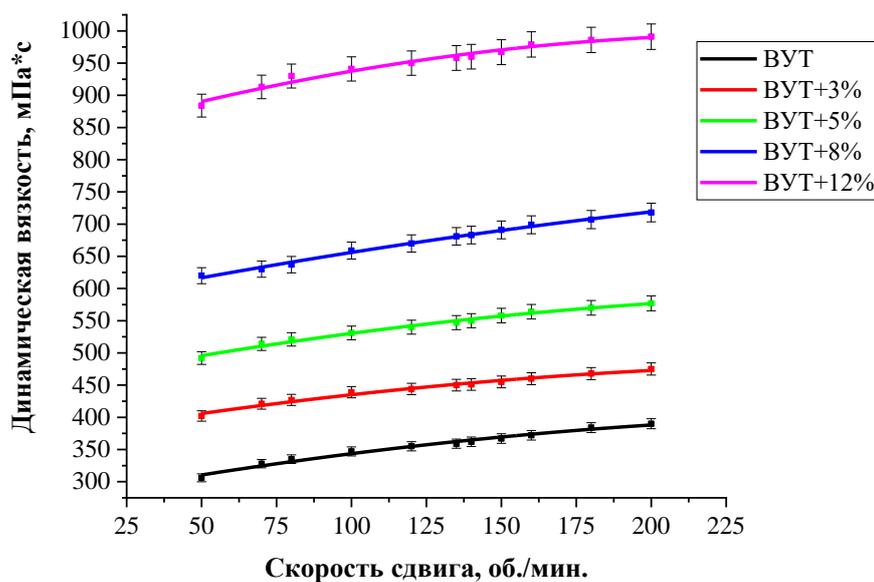


Рисунок 3.1 – Зависимости динамической вязкости водоугольного топлива на основе угля марки ЗБ с добавлением изопрпилового спирта от скорости сдвига

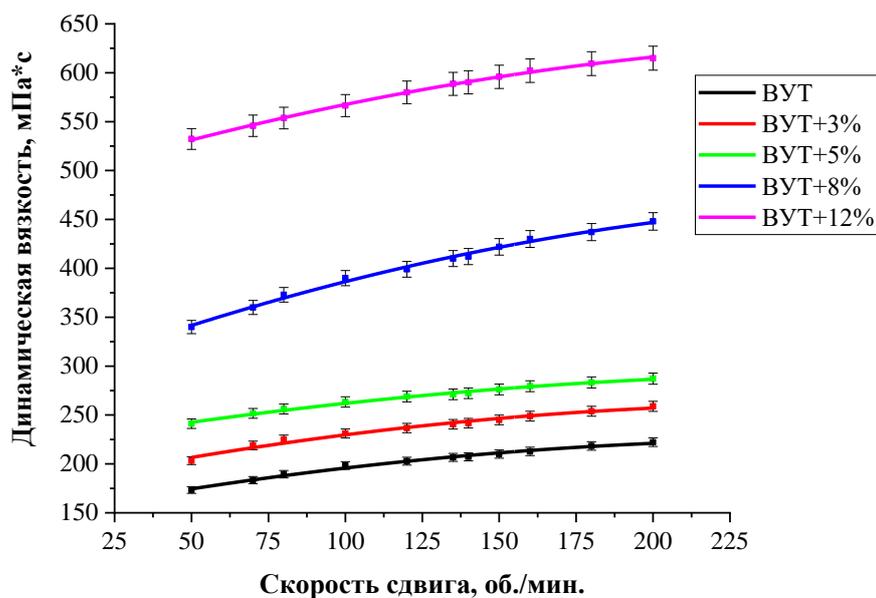


Рисунок 3.2 – Зависимости динамической вязкости водугольного топлива на основе угля марки Д с добавлением изопропилового спирта от скорости сдвига

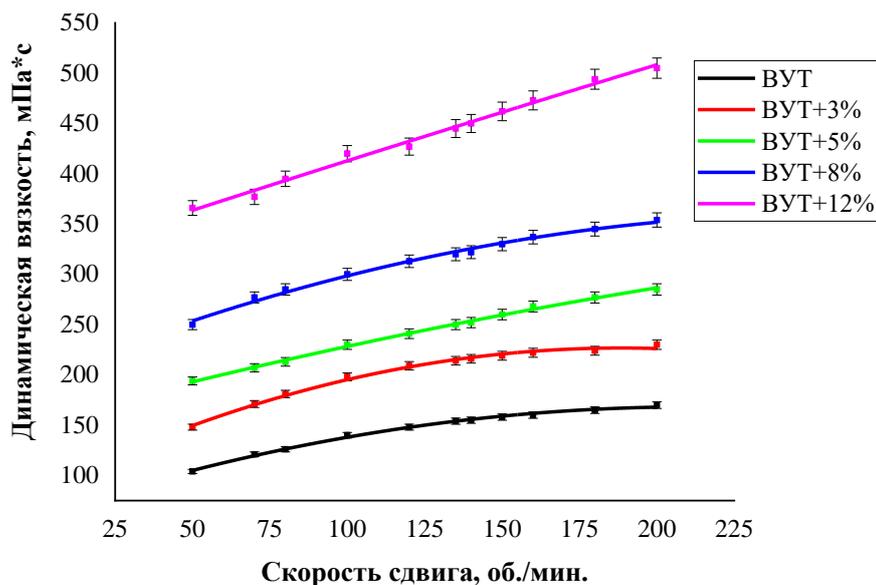


Рисунок 3.3 – Зависимости динамической вязкости водугольного топлива на основе угля марки Т с добавлением изопропилового спирта от скорости сдвига

На рисунке 3.4 представлены зависимости вязкости исследовавшихся составов от доли изопропилового спирта. Сравнение вязкости образцов выполнено при одинаковой скорости сдвига – 100 об./мин.

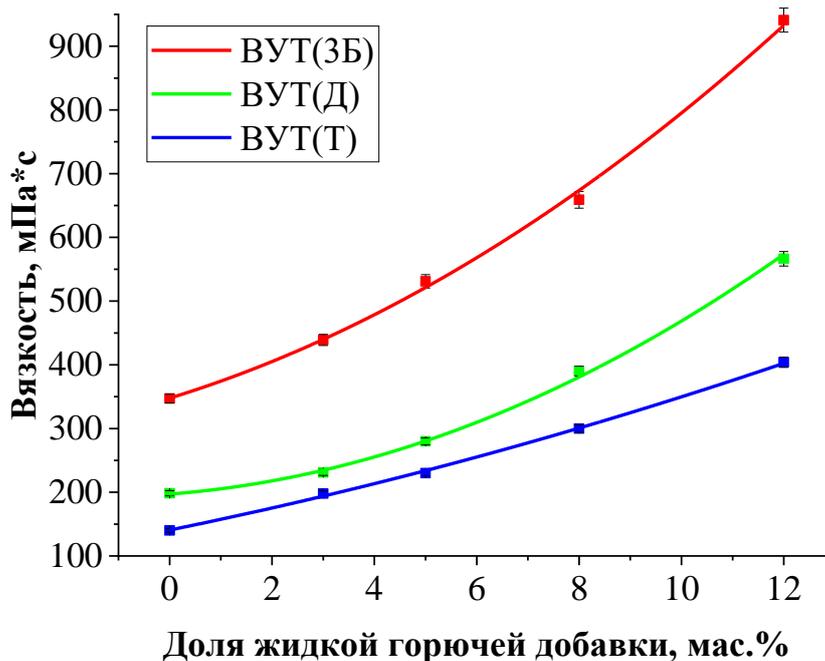


Рисунок 3.4 – Влияние доли изопропилового спирта на динамическую вязкость суспензионного топлива на основе углей марки ЗБ, Д и Т [121]

Анализ результатов позволяет сделать вывод о том, что вязкость водоугольного топлива на основе угля марки ЗБ повышается на 20,9%, 34,6%, 47,3% и 63,1% при добавлении 3 мас.%, 5 мас.%, 8 мас.%, 12 мас.% изопропилового спирта, соответственно, относительно ВУТ без добавления жидкого горючего компонента. Установлено, что вязкость водоугольного топлива на основе угля марки Д возрастает на 14,2%, 24,7%, 49,1% и 64,9% при добавлении 3 мас.%, 5 мас.%, 8 мас.%, 12 мас.% изопропилового спирта, соответственно, относительно типичного ВУТ. Определено, что вязкость водоугольного топлива на основе угля марки Т увеличивается на 29,3%, 39,1%, 53,3% и 65,3% при добавлении 3 мас.%, 5 мас.%, 8 мас.%, 12 мас.% изопропилового спирта, соответственно, относительно ВУТ без добавления жидкого горючего компонента.

На рисунке 3.5 представлены зависимости плотности суспензионного топлива на основе углей марки ЗБ, Д и Т от доли изопропилового спирта.

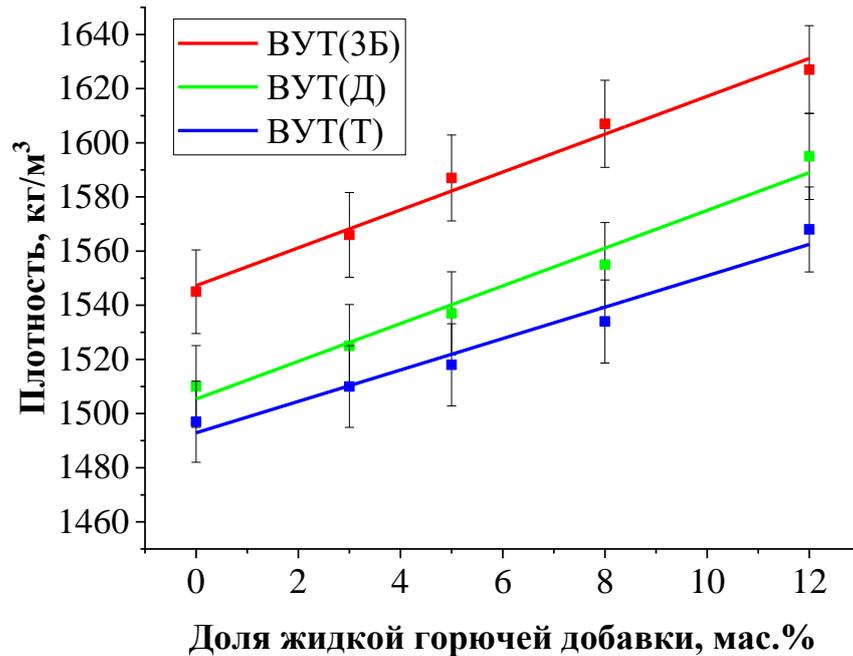


Рисунок 3.5 – Влияние доли изопропилового спирта на плотность суспензионного топлива на основе углей марки ЗБ, Д и Т

Экспериментально установлено, что плотность водоугольного топлива на основе угля марки ЗБ повышается на 1,3%, 2,6%, 3,8% и 5% при добавлении 3 мас.%, 5 мас.%, 8 мас.%, 12 мас.% изопропилового спирта, соответственно, относительно ВУТ без добавления жидкого горючего компонента. Установлено, что плотность водоугольного топлива на основе угля марки Д возрастает на 1%, 1,7%, 2,9% и 5,3% при добавлении 3 мас.%, 5 мас.%, 8 мас.%, 12 мас.% изопропилового спирта, соответственно, относительно типичного ВУТ. Определено, что плотность водоугольного топлива на основе угля марки Т увеличивается на 0,9%, 1,4%, 2,4% и 4,5% при добавлении 3 мас.%, 5 мас.%, 8 мас.%, 12 мас.% изопропилового спирта, соответственно, относительно ВУТ без добавления жидкого горючего компонента.

На рисунке 3.6 представлены зависимости коэффициента поверхностного натяжения суспензионного топлива на основе углей марки ЗБ, Д и Т от доли изопропилового спирта.

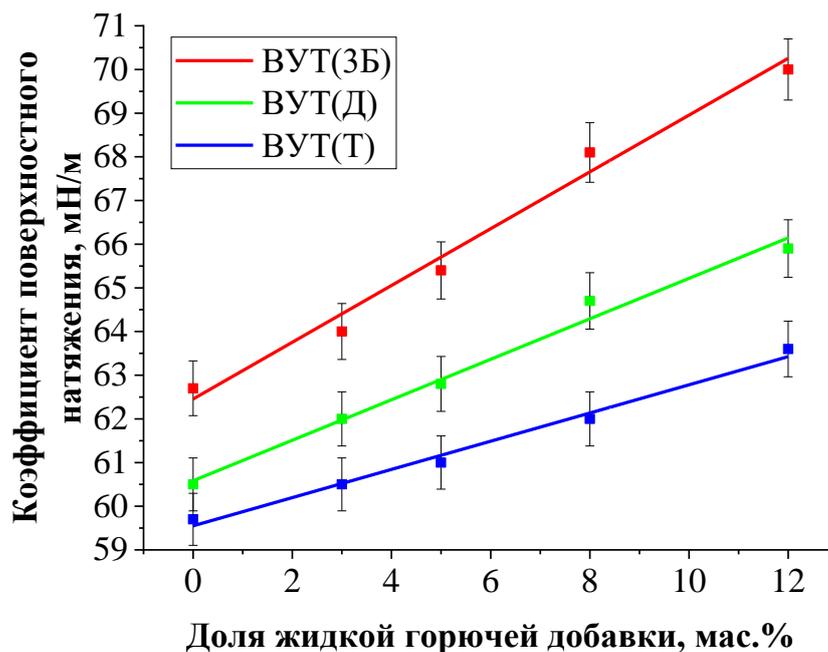


Рисунок 3.6 – Влияние доли изопропилового спирта на коэффициент поверхностного натяжения суспензионного топлива на основе углей марки 3Б, Д и Т

Экспериментально установлено, что коэффициент поверхностного натяжения водоугольного топлива на основе угля марки 3Б повышается на 2%, 4,1%, 8,3% и 10,4% при добавлении 3 мас.%, 5 мас.%, 8 мас.%, 12 мас.% изопропилового спирта, соответственно, относительно ВУТ без добавления жидкого горючего компонента. Установлено, что коэффициент поверхностного натяжения водоугольного топлива на основе угля марки Д возрастает на 2,4%, 3,7%, 6,5% и 8,2% при добавлении 3 мас.%, 5 мас.%, 8 мас.%, 12 мас.% изопропилового спирта, соответственно, относительно типичного ВУТ. Определено, что коэффициент поверхностного натяжения водоугольного топлива на основе угля марки Т увеличивается на 1,3%, 2,1%, 3,7% и 6,1% при добавлении 3 мас.%, 5 мас.%, 8 мас.%, 12 мас.% изопропилового спирта, соответственно, относительно ВУТ без добавления жидкого горючего компонента.

3.2 Свойства водоугольных топлив с добавлением жидких отходов переработки РТИ

На рисунках 3.7-3.9 представлены зависимости динамической вязкости водоугольного топлива на основе углей марки ЗБ, Д и Т с добавлением жидких отходов переработки РТИ от скорости сдвига.

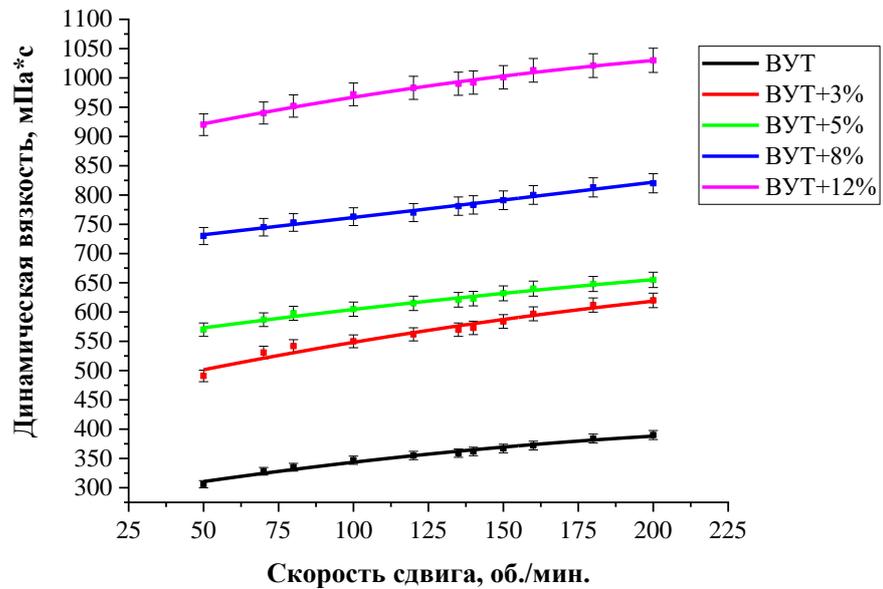


Рисунок 3.7 – Зависимости динамической вязкости водоугольного топлива на основе угля марки ЗБ с добавлением жидких отходов переработки РТИ от скорости сдвига

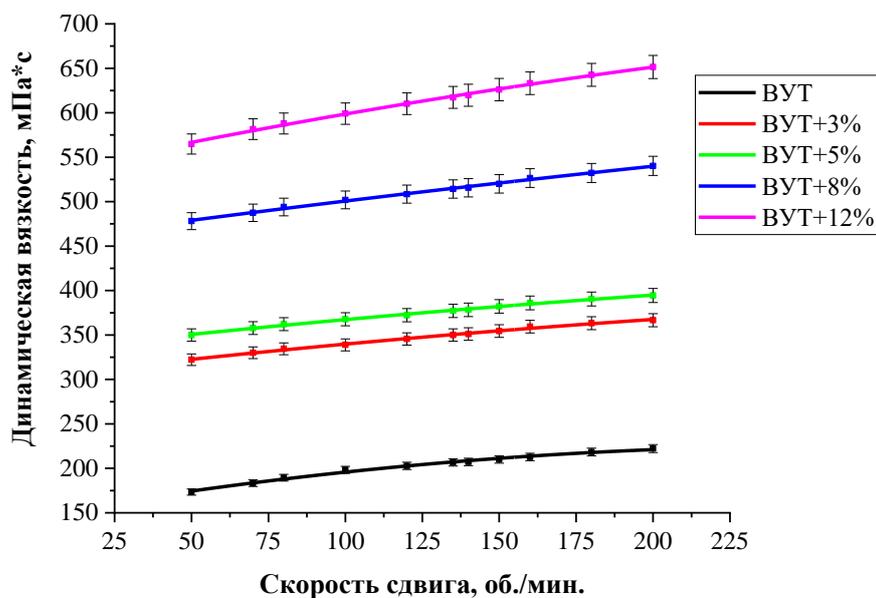


Рисунок 3.8 – Зависимости динамической вязкости водоугольного топлива на основе угля марки Д с добавлением жидких отходов переработки РТИ от скорости сдвига

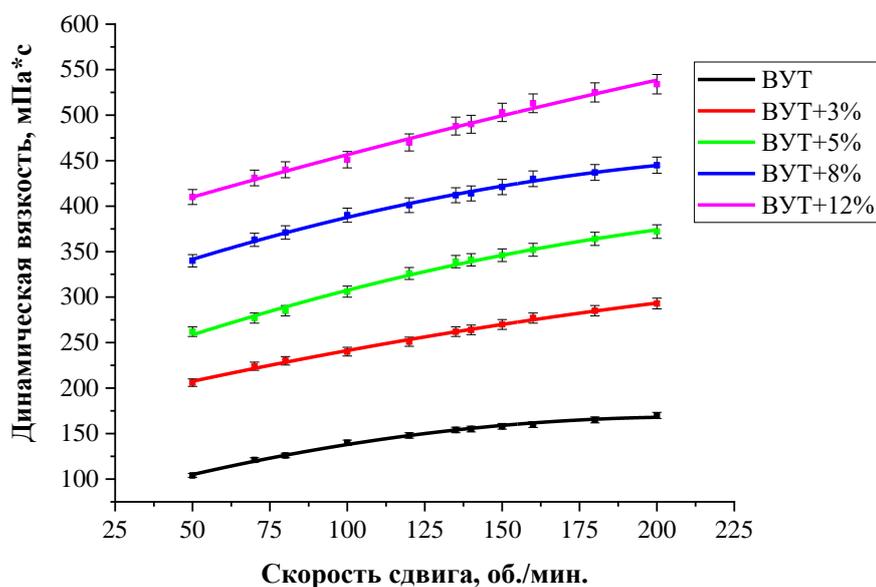


Рисунок 3.9 – Зависимости динамической вязкости водоугольного топлива на основе угля марки Т с добавлением жидких отходов переработки РТИ от скорости сдвига

На рисунке 3.10 представлены зависимости вязкости исследованных составов от доли жидких отходов переработки РТИ. Сравнение вязкости образцов выполнено при одинаковой скорости сдвига – 100 об/мин.

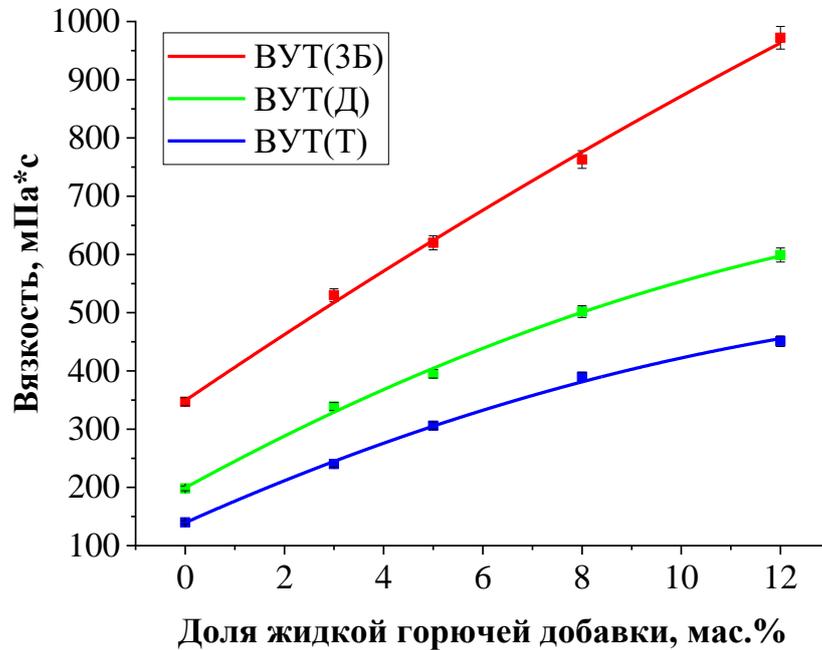


Рисунок 3.10 – Влияние доли жидких отходов переработки РТИ на динамическую вязкость суспензионного топлива на основе углей марки ЗБ, Д и Т [121]

Экспериментально определено, что вязкость водоугольного топлива на основе угля марки ЗБ повышается на 36,9%, 42,6%, 54,5% и 64,3% при добавлении 3 мас.%, 5 мас.%, 8 мас.%, 12 мас.% жидких отходов переработки РТИ, соответственно, относительно ВУТ без добавления жидкого горючего компонента. Установлено, что вязкость водоугольного топлива на основе угля марки Д возрастает на 41,5%, 46,1%, 60,5% и 66,9% при добавлении 3 мас.%, 5 мас.%, 8 мас.%, 12 мас.% жидких отходов переработки РТИ, соответственно, относительно типичного ВУТ. Определено, что вязкость водоугольного топлива на основе угля марки Т увеличивается на 41,7%, 54,2%, 64,1% и 68,9% при добавлении 3 мас.%, 5 мас.%, 8 мас.%, 12 мас.% жидких отходов переработки РТИ, соответственно, относительно ВУТ без добавления жидкого горючего компонента.

На рисунке 3.11 представлены зависимости плотности суспензионного топлива на основе углей марки ЗБ, Д и Т от доли жидких отходов переработки РТИ.

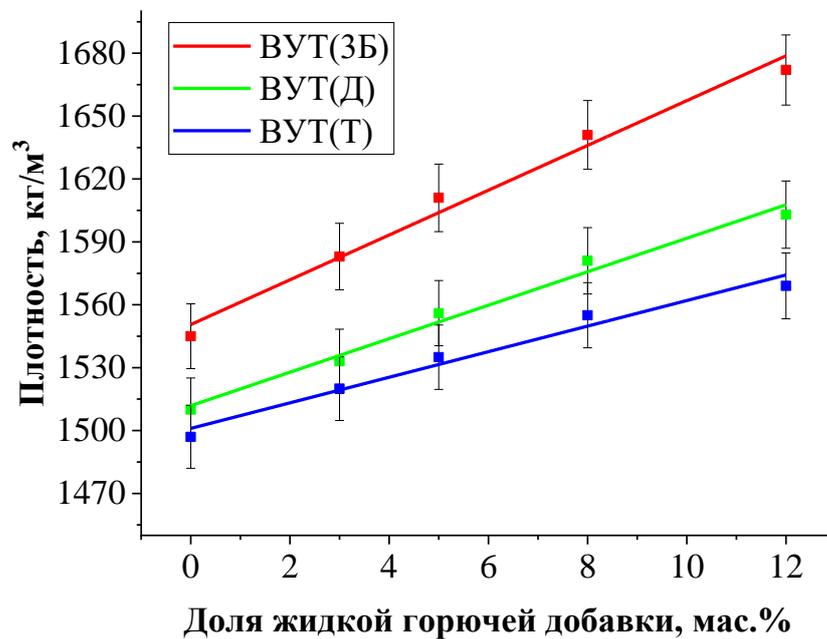


Рисунок 3.11 – Влияние доли жидких отходов переработки РТИ на плотность суспензионного топлива на основе углей марки ЗБ, Д и Т

Экспериментально установлено, что плотность водоугольного топлива на основе угля марки ЗБ повышается на 2,4%, 4,1%, 5,8% и 7,6% при добавлении 3 мас.%, 5 мас.%, 8 мас.%, 12 мас.% жидких отходов переработки РТИ, соответственно, относительно ВУТ без добавления жидкого горючего компонента. Установлено, что плотность водоугольного топлива на основе угля марки Д возрастает на 1,5%, 2,9%, 4,5% и 5,8% при добавлении 3 мас.%, 5 мас.%, 8 мас.%, 12 мас.% жидких отходов переработки РТИ, соответственно, относительно типичного ВУТ. Определено, что плотность водоугольного топлива на основе угля марки Т увеличивается на 0,9%, 1,4%, 2,4% и 4,5% при добавлении 3 мас.%, 5 мас.%, 8 мас.%, 12 мас.% жидких отходов переработки РТИ, соответственно, относительно ВУТ без добавления жидкого горючего компонента.

На рисунке 3.12 представлены зависимости коэффициента поверхностного натяжения суспензионного топлива на основе углей марки ЗБ, Д и Т от доли жидких отходов переработки РТИ.

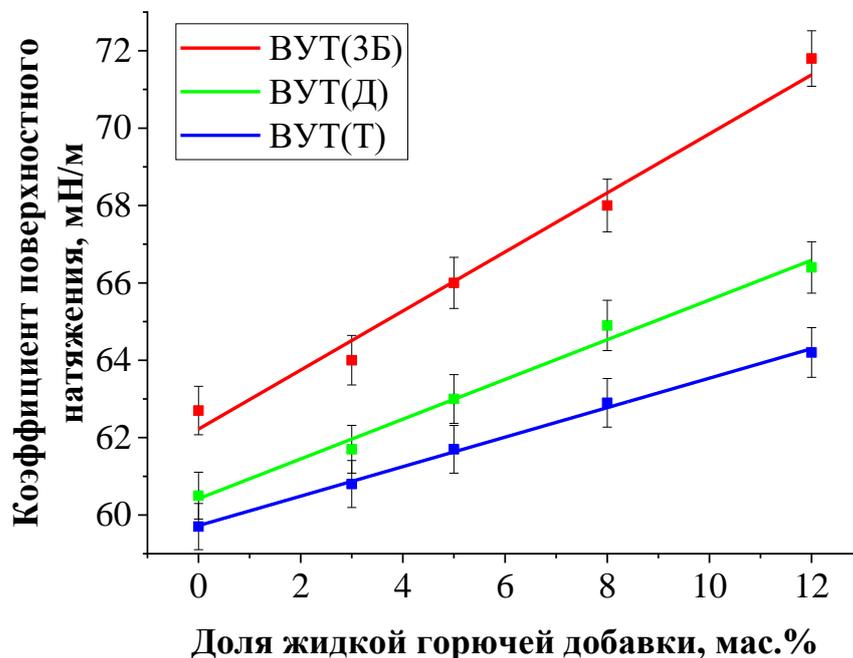


Рисунок 3.12 – Влияние доли жидких отходов переработки РТИ на коэффициент поверхностного натяжения суспензионного топлива на основе углей марки ЗБ, Д и Т

Экспериментально установлено, что коэффициент поверхностного натяжения водоугольного топлива на основе угля марки ЗБ повышается на 2,1%, 5%, 7,8% и 12,7% при добавлении 3 мас.%, 5 мас.%, 8 мас.%, 12 мас.% жидких отходов переработки РТИ, соответственно, относительно ВУТ без добавления жидкого горючего компонента. Установлено, что коэффициент поверхностного натяжения водоугольного топлива на основе угля марки Д возрастает на 1,9%, 3,9%, 6,8% и 8,9% при добавлении 3 мас.%, 5 мас.%, 8 мас.%, 12 мас.% жидких отходов переработки РТИ, соответственно, относительно ВУТ без добавления жидкого горючего компонента. Определено, что коэффициент поверхностного натяжения водоугольного топлива на основе угля марки Т увеличивается на 1,8%, 3,2%, 5,1% и 7% при добавлении 3 мас.%, 5 мас.%, 8 мас.%, 12 мас.% жидких

отходов переработки РТИ, соответственно, относительно ВУТ без добавления жидкого горючего компонента.

3.3 Свойства водоугольных топлив с добавлением отработанного моторного масла

На рисунках 3.13-3.15 представлены зависимости динамической вязкости водоугольного топлива на основе углей марки ЗБ, Д и Т с добавлением отработанного моторного масла от скорости сдвига.

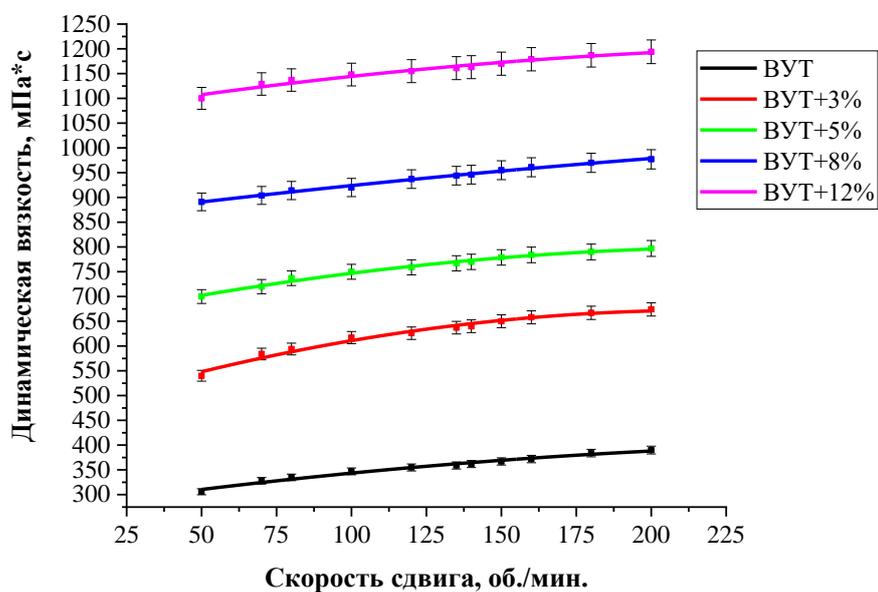


Рисунок 3.13 – Зависимости динамической вязкости водоугольного топлива на основе угля марки ЗБ с добавлением отработанного моторного масла от скорости сдвига

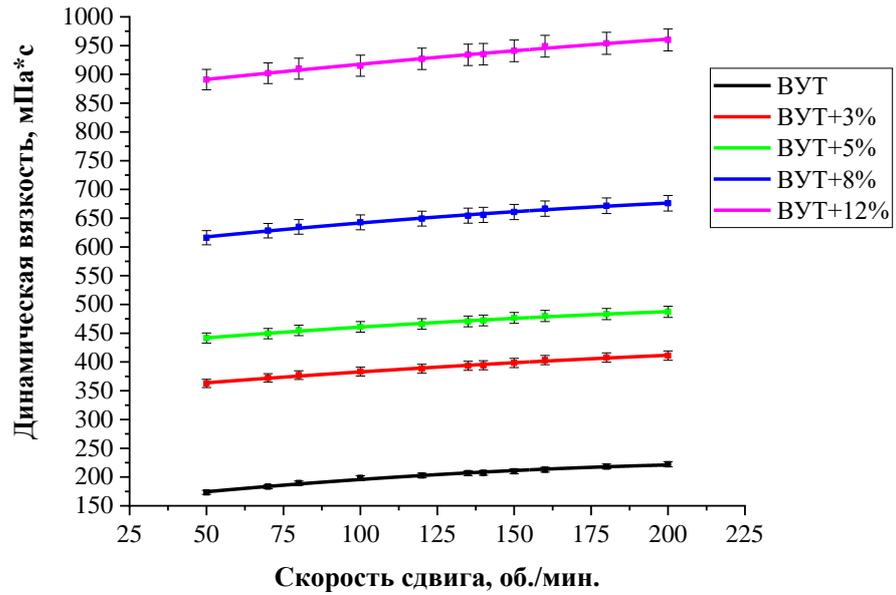


Рисунок 3.14 – Зависимости динамической вязкости водугольного топлива на основе угля марки Д с добавлением отработанного моторного масла от скорости сдвига

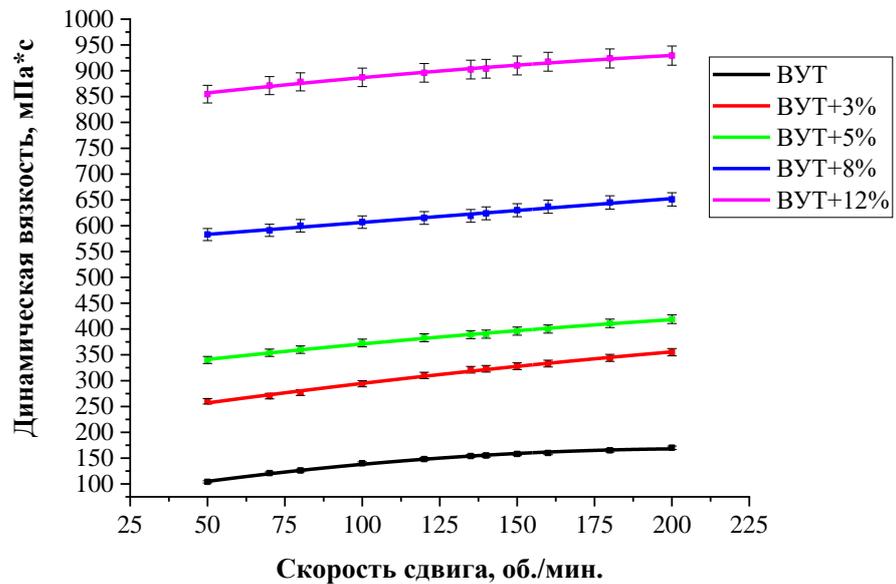


Рисунок 3.15 – Зависимости динамической вязкости водугольного топлива на основе угля марки Т с добавлением отработанного моторного масла от скорости сдвига

На рисунке 3.16 представлены зависимости вязкости исследованных составов от концентрации отработанного моторного масла. Сравнение вязкости образцов выполнено при одинаковой скорости сдвига – 100 об/мин.

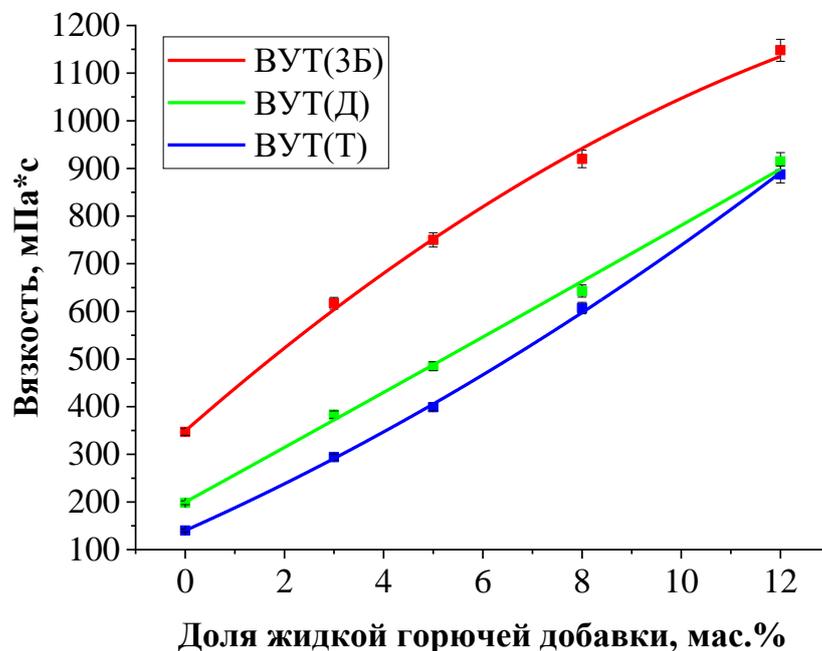


Рисунок 3.16 – Влияние доли отработанного моторного масла на динамическую вязкость суспензионного топлива на основе углей марки 3Б, Д и Т [121]

Экспериментально определено, что вязкость водоугольного топлива на основе угля марки 3Б повышается на 43,8%, 53,7%, 62,3% и 69,8% при добавлении 3 мас.%, 5 мас.%, 8 мас.%, 12 мас.% отработанного моторного масла, соответственно, относительно ВУТ без добавления жидкого горючего компонента. Установлено, что вязкость водоугольного топлива на основе угля марки Д возрастает на 48,3%, 56,9%, 69,1% и 78,3% при добавлении 3 мас.%, 5 мас.%, 8 мас.%, 12 мас.% отработанного моторного масла, соответственно, относительно типичного ВУТ. Определено, что вязкость водоугольного топлива на основе угля марки Т увеличивается на 52,4%, 62,5%, 76,9% и 84,2% при добавлении 3 мас.%, 5 мас.%, 8 мас.%, 12 мас.% отработанного моторного масла, соответственно, относительно ВУТ без добавления жидкого горючего компонента.

На рисунке 3.17 представлены зависимости плотности суспензионного топлива на основе угля марки ЗБ, Д и Т от доли отработанного моторного масла.

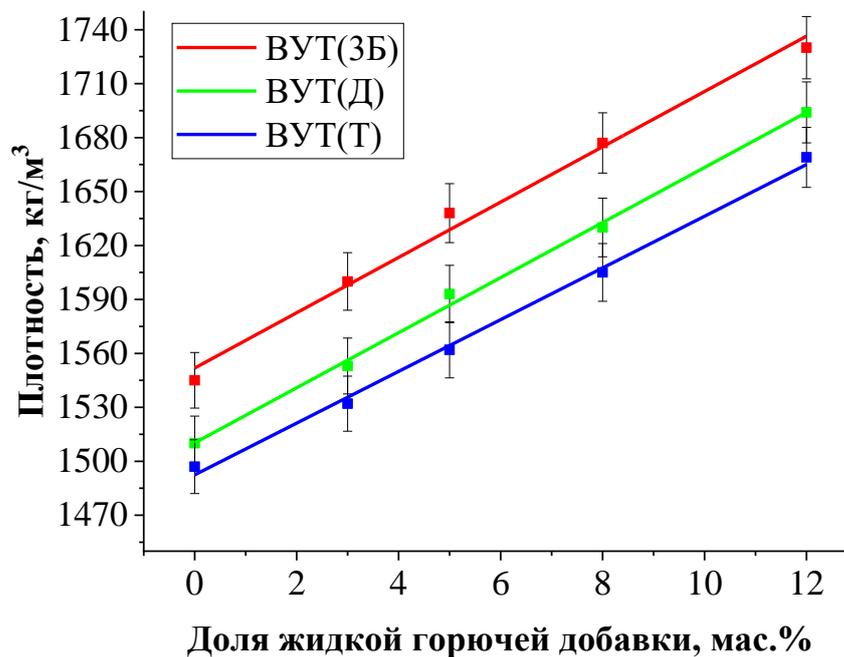


Рисунок 3.17 – Влияние доли отработанного моторного масла на плотность суспензионного топлива на основе углей марки ЗБ, Д и Т

Экспериментально установлено, что плотность водоугольного топлива на основе угля марки ЗБ повышается на 3,4%, 5,7%, 7,9% и 10,7% при добавлении 3 мас.%, 5 мас.%, 8 мас.%, 12 мас.% отработанного моторного масла, соответственно, относительно ВУТ без добавления жидкого горючего компонента. Установлено, что плотность водоугольного топлива на основе угля марки Д возрастает на 2,8%, 5,2%, 7,4% и 10,9% при добавлении 3 мас.%, 5 мас.%, 8 мас.%, 12 мас.% отработанного моторного масла, соответственно, относительно типичного ВУТ без добавления жидкого горючего компонента. Определено, что плотность водоугольного топлива на основе угля марки Т увеличивается на 2,3%, 4,2%, 6,7% и 10,3% при добавлении 3 мас.%, 5 мас.%, 8 мас.%, 12 мас.% отработанного моторного масла, соответственно, относительно ВУТ без добавления жидкого горючего компонента.

На рисунке 3.18 представлены зависимости коэффициента поверхностного натяжения суспензионного топлива на основе углей марки ЗБ, Д и Т от доли отработанного моторного масла.

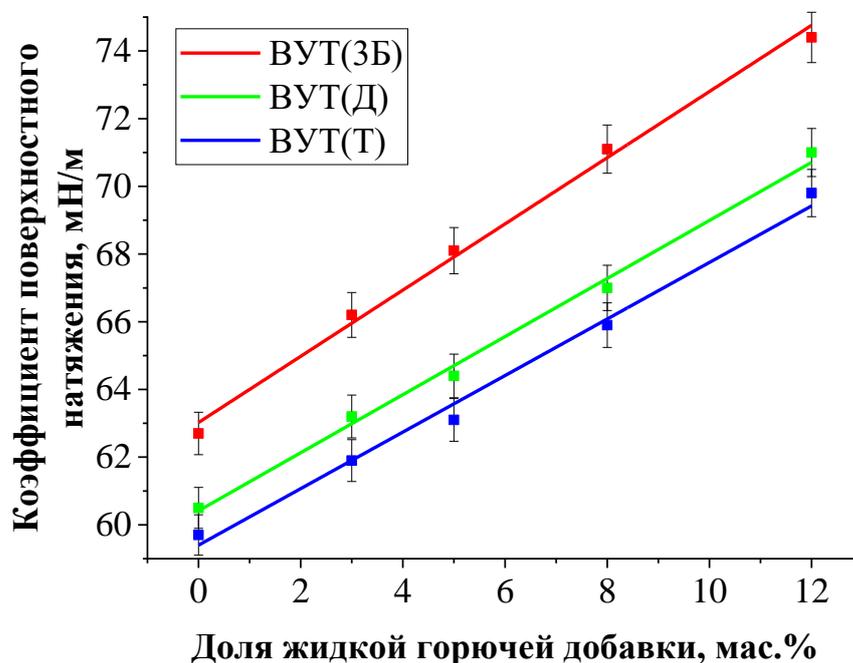


Рисунок 3.18 – Влияние доли отработанного моторного масла на коэффициент поверхностного натяжения суспензионного топлива на основе углей марки ЗБ, Д и Т

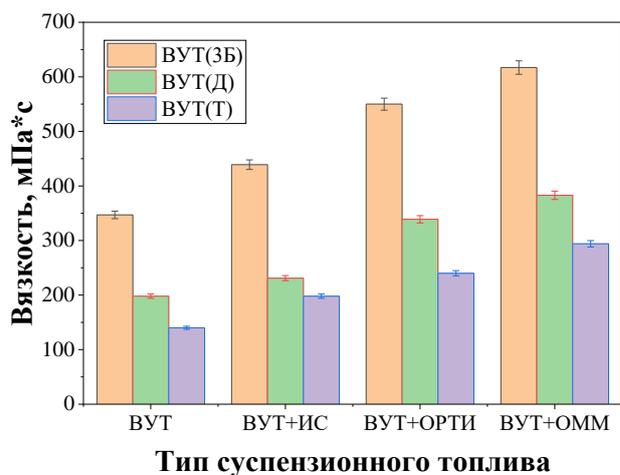
Экспериментально установлено, что коэффициент поверхностного натяжения водоугольного топлива на основе угля марки ЗБ повышается на 5,3%, 7,9%, 11,8% и 15,7% при добавлении 3 мас.%, 5 мас.%, 8 мас.%, 12 мас.% отработанного моторного масла, соответственно, относительно ВУТ без добавления жидкого горючего компонента. Установлено, что коэффициент поверхностного натяжения водоугольного топлива на основе угля марки Д возрастает на 4,3%, 6,1%, 9,7% и 14,8% при добавлении 3 мас.%, 5 мас.%, 8 мас.%, 12 мас.% отработанного моторного масла, соответственно, относительно типичного ВУТ. Определено, что коэффициент поверхностного натяжения водоугольного топлива на основе угля марки Т увеличивается на 3,6%, 5,4%, 9,4% и 14,5% при добавлении 3 мас.%, 5 мас.%, 8 мас.%, 12 мас.% отработанного

моторного масла, соответственно, относительно ВУТ без добавления жидкого горючего компонента.

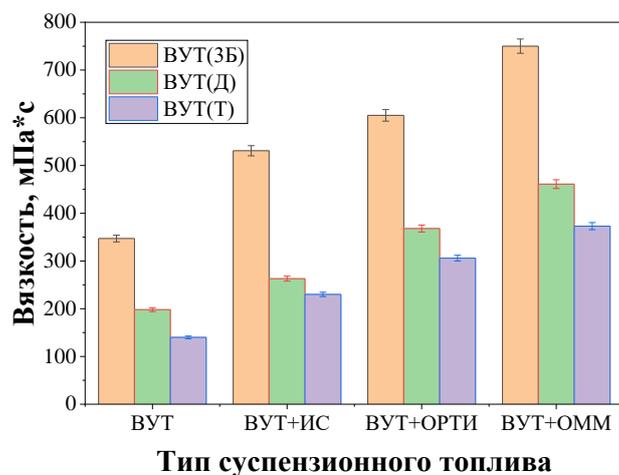
3.4 Сравнение свойств водоугольных топлив с добавлением жидких горючих компонентов

На рисунке 3.19 представлены зависимости динамической вязкости суспензионного топлива на основе углей марки ЗБ, Д и Т от типа жидкого горючего компонента при его различных концентрациях.

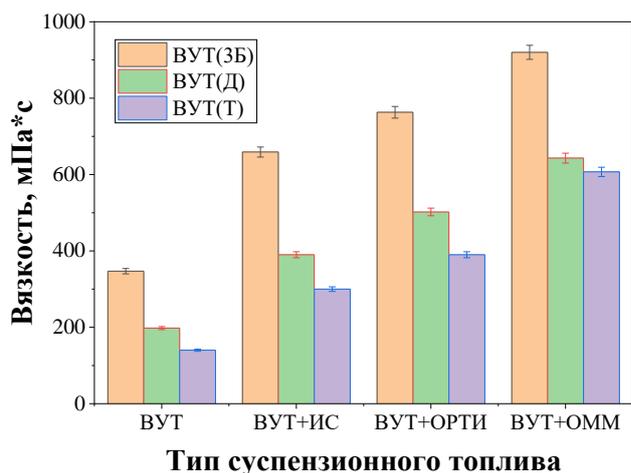
По результатам экспериментов установлено, что все исследуемые составы топлива являются псевдопластичными жидкостями, так как их вязкость увеличивается с увеличением скорости сдвига согласно модели Гершеля-Балкли. Определено, что изопропиловый спирт вызывает наименьшее увеличение вязкости ВУТ, а отработанное моторное масло приводит к наибольшему приросту.



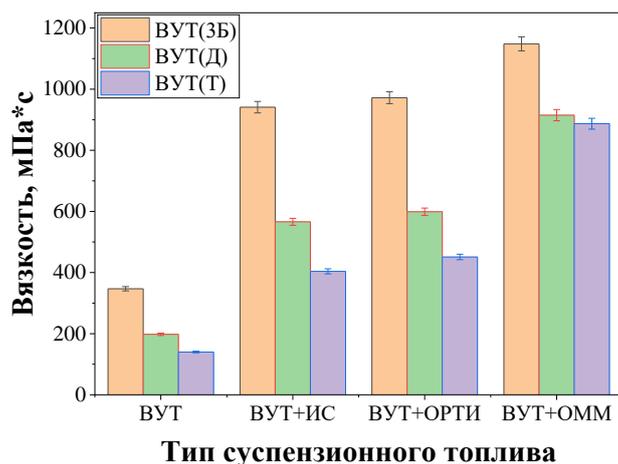
а)



б)



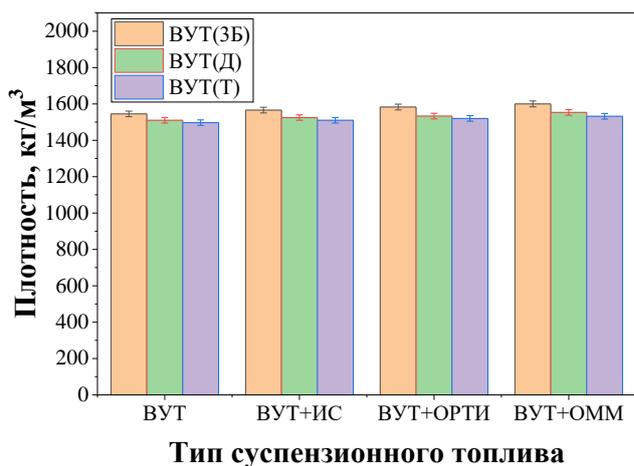
в)



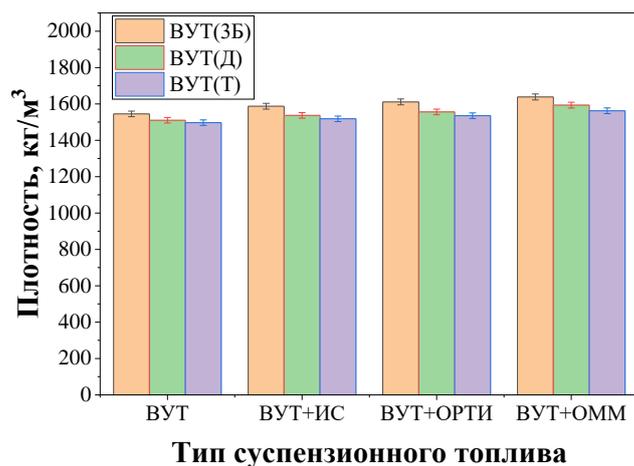
г)

Рисунок 3.19 – Зависимости динамической вязкости суспензионного топлива на основе углей марки ЗБ, Д и Т от типа жидкого горючего компонента и его концентрации: а – 3% жидкого горючего компонента; б – 5% жидкого горючего компонента; в – 8% жидкого горючего компонента; г – 12% жидкого горючего компонента

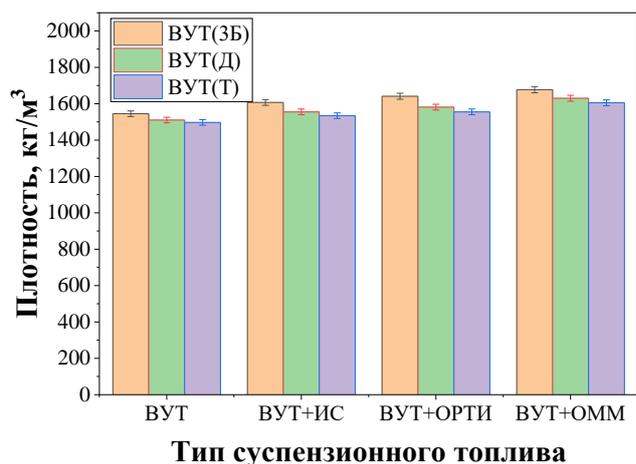
На рисунке 3.20 представлены зависимости плотности суспензионного топлива на основе углей марки ЗБ, Д и Т от типа жидкого горючего компонента при его различных концентрациях.



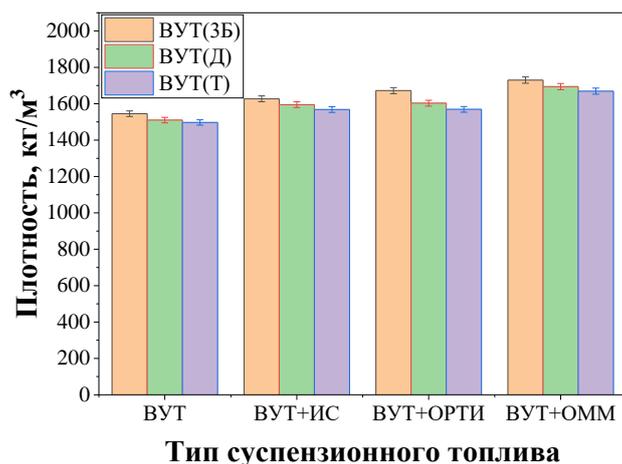
а)



б)



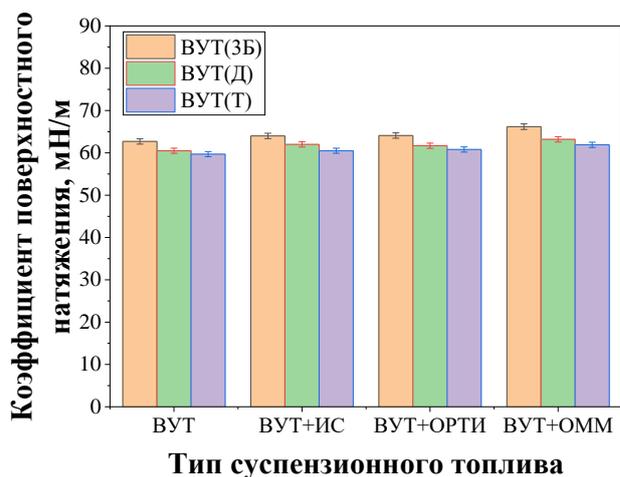
в)



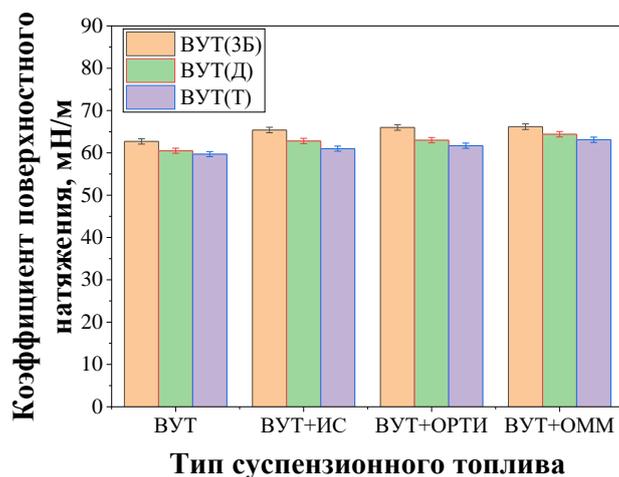
г)

Рисунок 3.20 – Зависимости плотности суспензионного топлива на основе углей марки ЗБ, Д и Т от типа жидкого горючего компонента и его концентрации: а – 3% жидкого горючего компонента; б – 5% жидкого горючего компонента; в – 8% жидкого горючего компонента; г – 12% жидкого горючего компонента

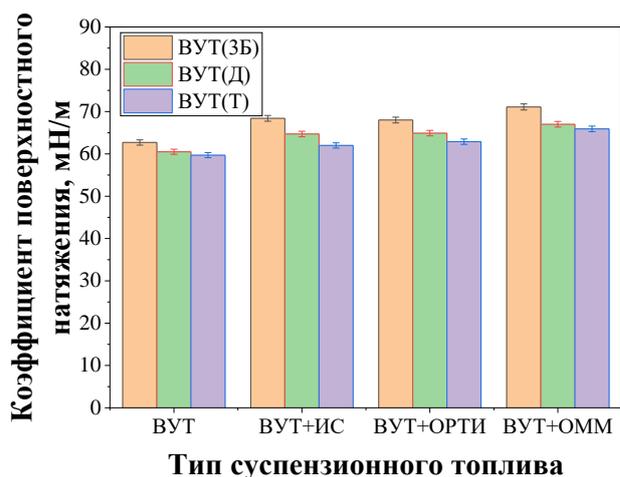
На рисунке 3.21 представлены зависимости коэффициента поверхностного натяжения суспензионного топлива на основе углей марки ЗБ, Д и Т от типа жидкого горючего компонента при его различных концентрациях.



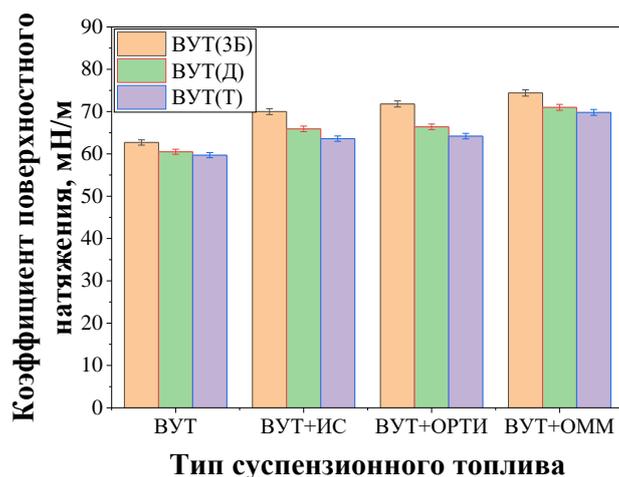
а)



б)



в)



г)

Рисунок 3.21 – Зависимости коэффициента поверхностного натяжения суспензионного топлива на основе углей марки 3Б, Д и Т от типа жидкого горючего компонента и его концентрации: а – 3% жидкого горючего компонента; б – 5% жидкого горючего компонента; в – 8% жидкого горючего компонента; г – 12% жидкого горючего компонента

Установлено, что добавление исследовавшихся жидких горючих компонентов приводит к повышению вязкости, плотности и коэффициента поверхностного натяжения получаемого суспензионного 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 суспензионного топлива на основе углей марки 3Б, Д и Т при добавлении исследовавшихся жидких горючих компонентов остается в допустимых пределах при их концентрации не более 8 мас. %.

3.5 Выводы по третьей главе:

1. Установлено, что вязкость суспензионного топлива на основе углей марки ЗБ, Д и Т повышается от 14,2% до 84,2% при добавлении от 3 мас.% до 12 мас.% исследовавшихся жидких горючих компонентов относительно типичного ВУТ.
2. 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.
3. Результаты исследования показали, что при добавлении от 3 мас.% до 12 мас.% исследовавшихся жидких горючих компонентов отмечается повышение плотности от 1% до 10,9%.
4. Установлено, что при добавлении от 3 мас.% до 12 мас.% исследовавшихся жидких горючих компонентов коэффициент поверхностного натяжения суспензионного топлива увеличивается от 1,3% до 15,7%.

ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА РАСПЫЛЕНИЯ СУСПЕНЗИОННЫХ ТОПЛИВ

4.1 Скорость распыленной струи суспензионного топлива

На рисунке 4.1 показан типичный кадр распыленной струи суспензионного топлива с обозначением исследовавшихся сечений.

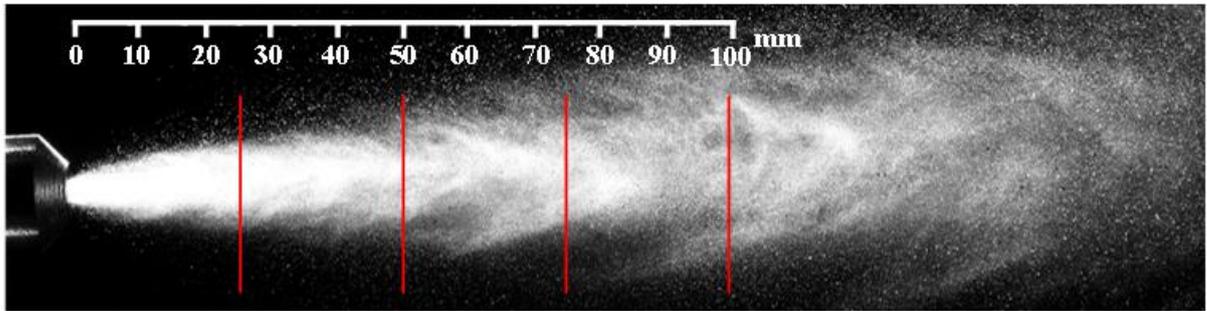
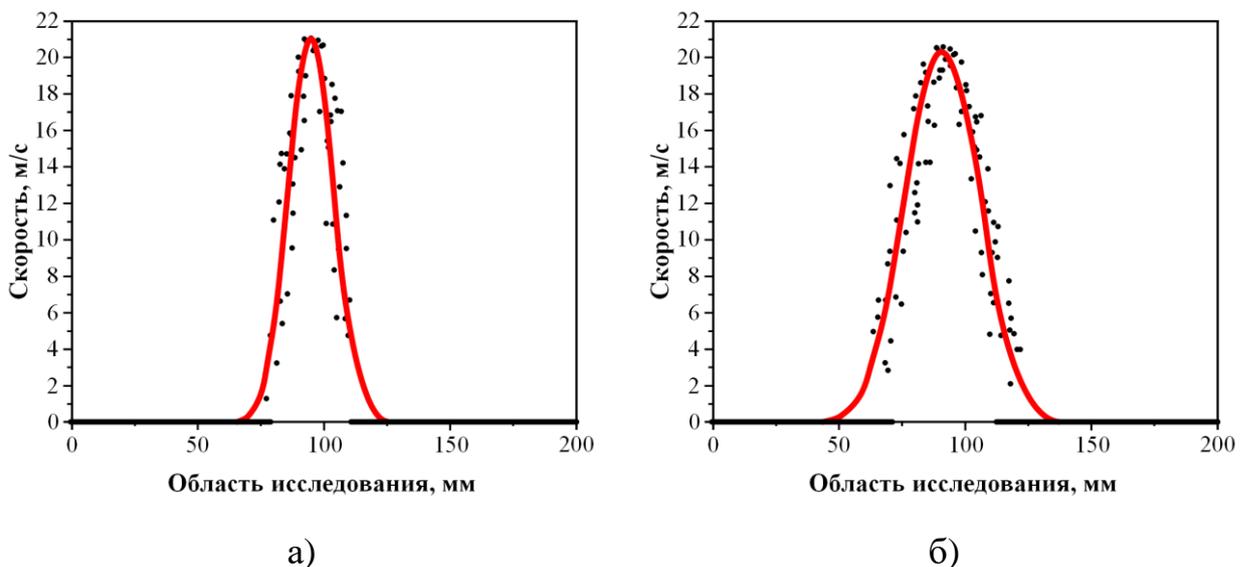


Рисунок 4.1 – Типичный кадр распыленной струи суспензионного топлива с обозначением исследовавшихся сечений

Анализ литературы показал, что наиболее важным для изучения является начальный участок струи, так называемая зона воспламенения [122]. Поэтому для исследования были выбраны сечения распыленной струи суспензионного топлива, находящиеся на расстоянии 25 мм, 50 мм, 75 мм и 100 мм от устья форсунки.

На рисунке 4.2 представлено типичное распределение скорости в струе водоугольного топлива на основе угля марки ЗБ в исследовавшихся сечениях.



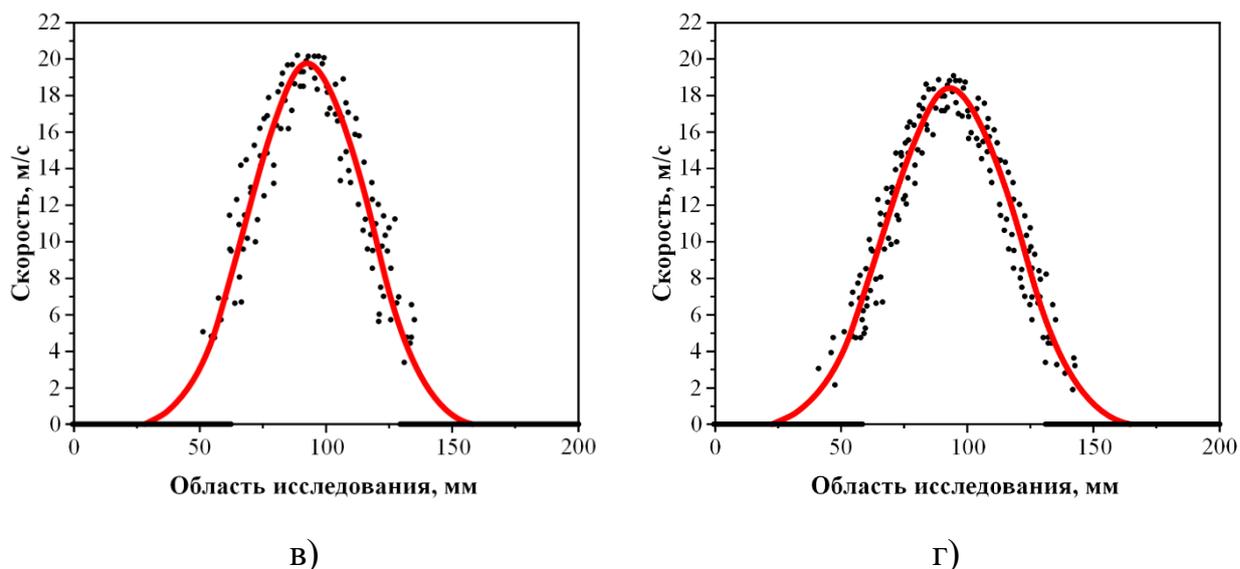


Рисунок 4.2 – Распределение скорости в струе водоугольного топлива на основе угля марки ЗБ на расстоянии 25 мм (а), 50 мм (б), 75 мм (в) и 100 мм (г) от устья форсунки

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 [122].

4.1.1 Скорость распыленной струи водоугольного топлива без добавления жидких горючих компонентов

На рисунке 4.3 представлены зависимости скорости в ядре струи на различном расстоянии от устья форсунки для водоугольного топлива на основе углей марки ЗБ, Д и Т без добавления жидких горючих компонентов.

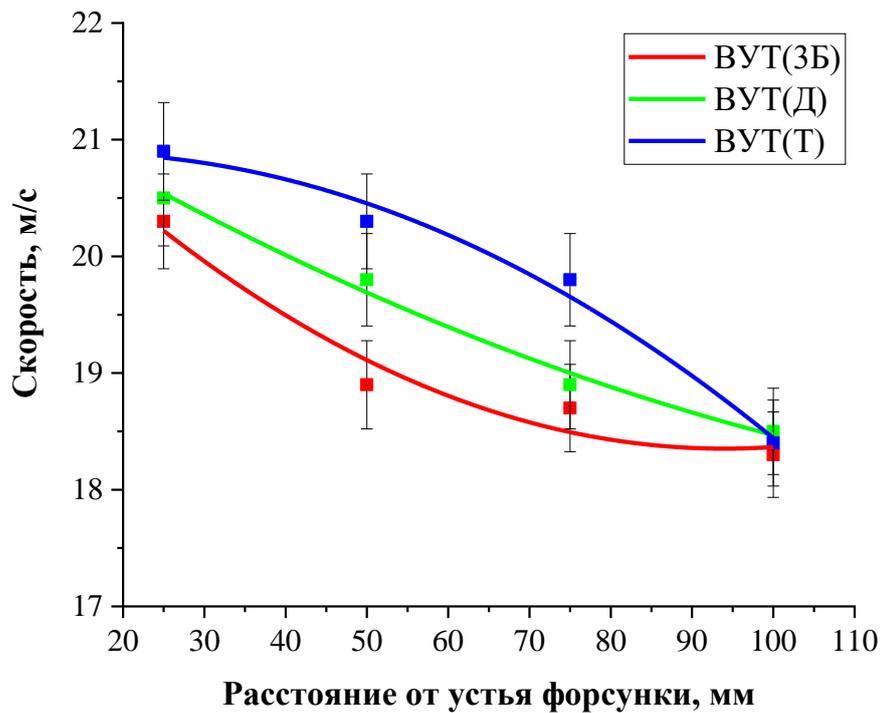


Рисунок 4.3 – Скорость в ядре струи на различном расстоянии от устья форсунки для водоугольного топлива на основе углей марки ЗБ, Д и Т без добавления жидких горючих компонентов [123]

Полученные результаты скорости в ядре струи водоугольного топлива на основе угля марки ЗБ, Д и Т представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Скорость в ядре струи водоугольного топлива без добавления жидких горючих компонентов

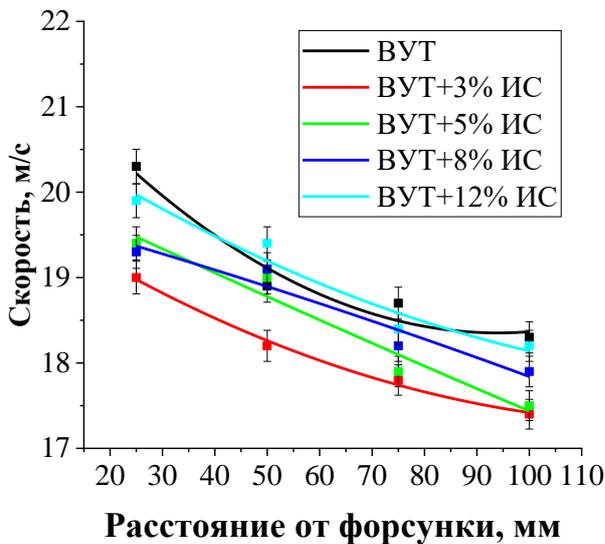
Вид топлива	Скорость в ядре струи, м/с			
	25 мм	50 мм	75 мм	100 мм
ВУТ(ЗБ)	20,3	18,9	18,7	18,3
ВУТ(Д)	20,5	19,8	18,9	18,5
ВУТ(Т)	20,9	20,3	19,8	18,4

Полученные результаты показывают, что капли водоугольного топлива на основе угля марки Т в среднем обладают наибольшей скоростью, в то время как капли ВУТ на основе угля марки ЗБ – наименьшей.

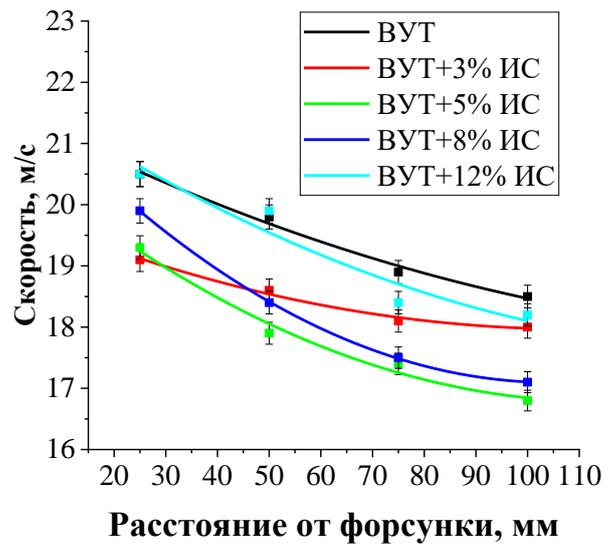
4.1.2 Скорость распыленной струи водоугольного топлива с добавлением изопропилового спирта

По результатам экспериментальных исследований получено распределение скорости в струе водоугольного топлива с добавлением 3%, 5%, 8% и 12% изопропилового спирта на расстоянии 25 мм, 50 мм, 75 мм и 100 мм от устья форсунки при начальном давлении топливо/воздух 0,3/0,28 МПа.

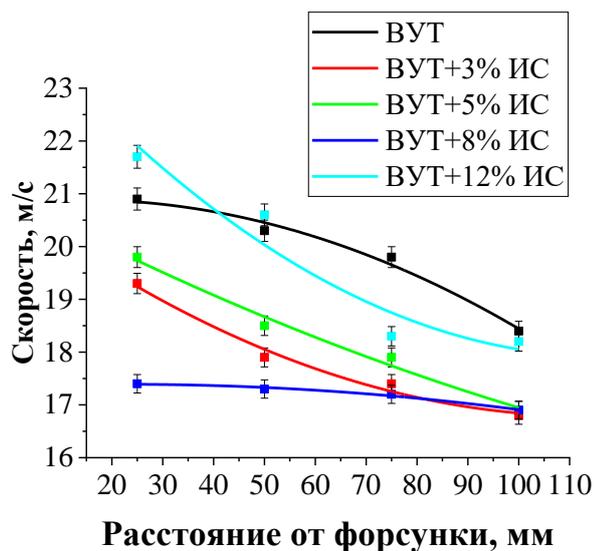
На рисунке 4.4 представлена скорость в ядре струи на различном расстоянии от устья форсунки для водоугольного топлива на основе углей марки ЗБ, Д и Т с добавлением различного количества изопропилового спирта и без него.



а)



б)



в)

Рисунок 4.4 – Скорость в ядре струи на различном расстоянии от устья форсунки для водоугольного топлива на основе углей марки ЗБ (а), Д (б) и Т (в) с добавлением 3%, 5%, 8%, 12% изопрпилового спирта

Полученные результаты скорости в ядре струи водоугольного топлива на основе углей марки ЗБ, Д и Т с добавлением от 3 до 12 мас.% изопрпилового спирта представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Скорость в ядре струи водоугольного топлива с добавлением изопрпилового спирта

Вид топлива	Доля изопрпилового спирта, мас.%	Скорость в ядре струи, м/с			
		25 мм	50 мм	75 мм	100 мм
ВУТ(ЗБ)	3	19	18,2	17,8	17,4
	5	19,4	19	17,9	17,5
	8	19,3	19,1	18,2	17,9
	12	19,9	19,4	18,4	18,2
ВУТ(Д)	3	19,1	18,6	18,1	18
	5	19,3	17,9	17,4	16,8

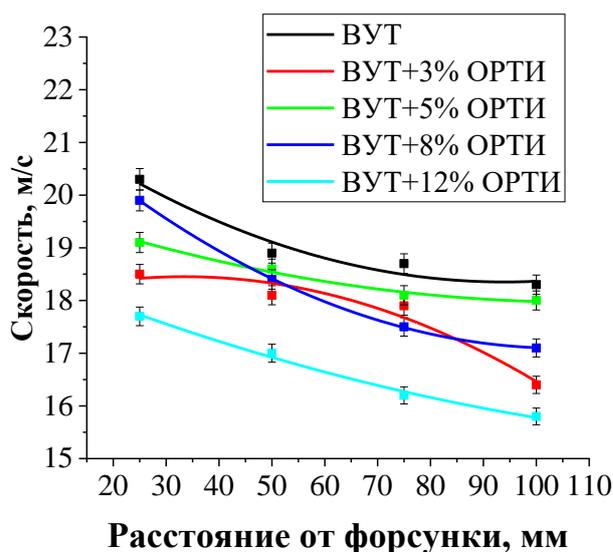
Продолжение таблицы 4.2

	8	19,9	18,4	17,5	17,1
	12	20,3	19,8	18,5	18,1
ВУТ(Т)	3	19,3	17,9	17,4	16,8
	5	19,8	18,5	17,9	16,9
	8	17,4	17,3	17,2	16,9
	12	21,7	20,6	18,3	18,2

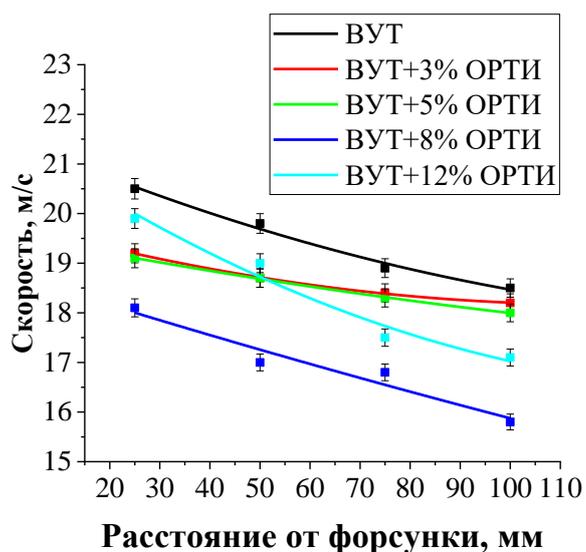
4.1.3 Скорость распыленной струи водоугольного топлива с добавлением жидких отходов переработки РТИ

По результатам экспериментальных исследований получено распределение скорости в струе водоугольного топлива с добавлением 3%, 5%, 8% и 12% жидких отходов переработки РТИ на расстоянии 25 мм, 50 мм, 75 мм и 100 мм от устья форсунки при начальном давлении топливо/воздух 0,3/0,28 МПа.

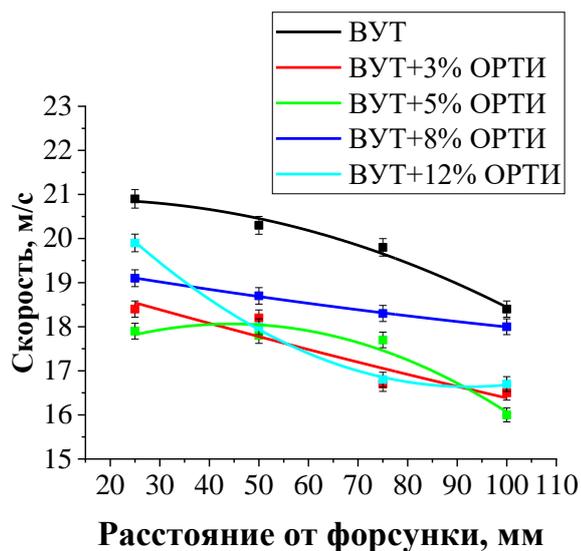
На рисунке 4.5 представлена скорость в ядре струи на различном расстоянии от устья форсунки для водоугольного топлива на основе углей марки ЗБ, Д и Т с добавлением различного количества жидких отходов переработки РТИ и без них.



а)



б)



в)

Рисунок 4.5 – Скорость в ядре струи на различном расстоянии от устья форсунки для водоугольного топлива на основе углей марки ЗБ (а), Д (б) и Т (в) с добавлением 3%, 5%, 8%, 12% жидких отходов переработки РТИ

Полученные результаты скорости в ядре струи водоугольного топлива на основе углей марки ЗБ, Д и Т с добавлением от 3 до 12 мас.% жидких отходов переработки РТИ представлены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Скорость в ядре струи водоугольного топлива с добавлением жидких отходов переработки РТИ

Вид топлива	Доля жидких отходов переработки РТИ, мас.%	Скорость в ядре струи, м/с			
		25 мм	50 мм	75 мм	100 мм
ВУТ(ЗБ)	3	18,5	18,1	17,9	16,4
	5	19,1	18,6	18,1	18
	8	19,9	18,4	17,5	17,1
	12	17,7	17	16,2	15,8
ВУТ(Д)	3	19,2	18,7	18,4	18,2

Продолжение таблицы 4.3

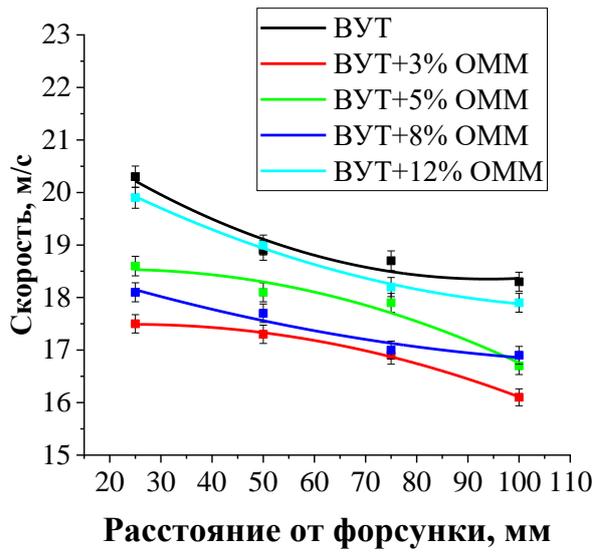
	5	19,1	18,7	18,3	18
	8	18,1	17	16,8	15,8
	12	19,9	19	17,5	17,1
ВУТ(Т)	3	18,4	18,2	16,7	16,5
	5	17,9	17,8	17,7	16
	8	19,1	18,7	18,3	18
	12	19,9	18	16,8	16,7

4.1.4 Скорость распыленной струи водоугольного топлива с добавлением отработанного моторного масла

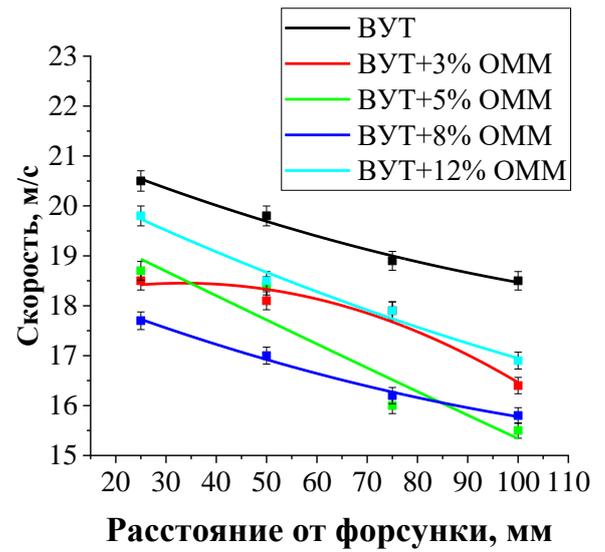
По результатам экспериментальных исследований получено распределение скорости в струе водоугольного топлива с добавлением 3%, 5%, 8% и 12% отработанного моторного масла на расстоянии 25 мм, 50 мм, 75 мм и 100 мм от устья форсунки при начальном давлении топливо/воздух 0,3/0,28 МПа.

На рисунке 4.6 представлена скорость в ядре струи на различном расстоянии от устья форсунки для водоугольного топлива на основе углей марки ЗБ, Д и Т с добавлением различного количества отработанного моторного масла и без него.

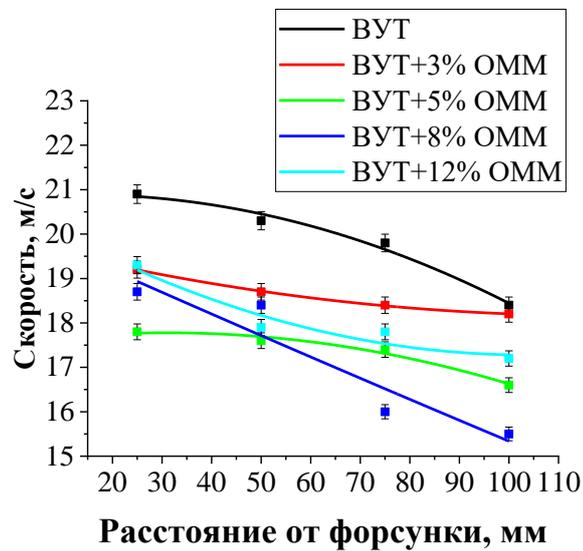
Полученные результаты скорости в ядре струи водоугольного топлива на основе углей марки ЗБ, Д и Т с добавлением от 3 до 12 мас.% отработанного моторного масла представлены в таблице 4.4.



а)



б)



в)

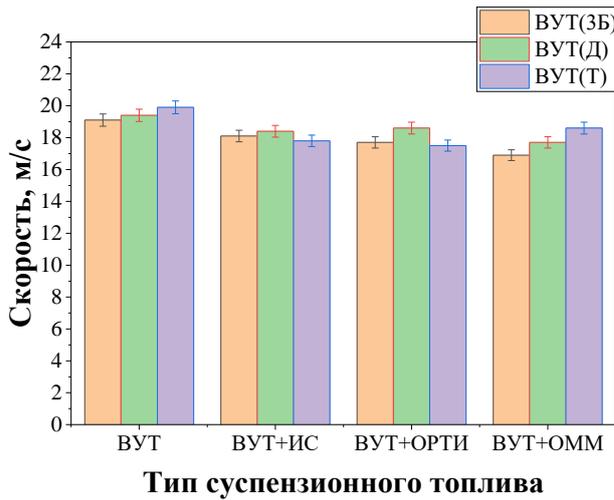
Рисунок 4.6 – Скорость в ядре струи на различном расстоянии от устья форсунки для водоугольного топлива на основе углей марки ЗБ (а), Д (б) и Т (в) с добавлением 3%, 5%, 8%, 12% отработанного моторного масла

Таблица 4.4 – Скорость в ядре струи водоугольного топлива с добавлением отработанного моторного масла

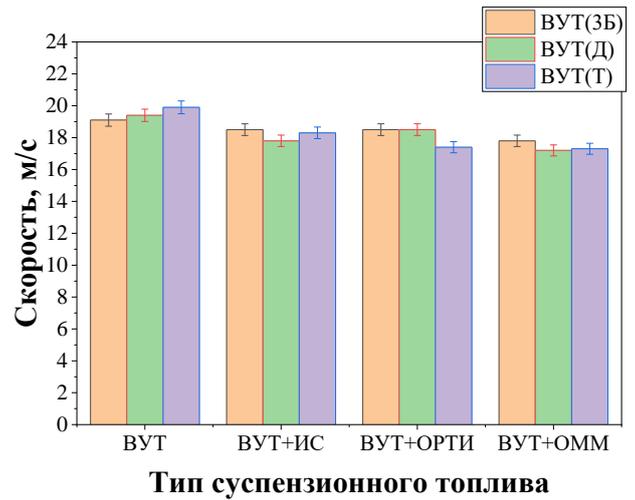
Вид топлива	Доля отработанного моторного масла, мас.%	Скорость в ядре струи, м/с			
		25 мм	50 мм	75 мм	100 мм
ВУТ(ЗБ)	3	17,5	17,3	16,9	16,1
	5	18,6	18,1	17,9	16,7
	8	18,1	17,7	17	16,9
	12	19,9	19	18,2	17,9
ВУТ(Д)	3	18,5	18,1	17,9	16,4
	5	18,7	18,4	16	15,5
	8	17,7	17	16,2	15,8
	12	19,8	18,5	17,9	16,9
ВУТ(Т)	3	19,2	18,7	18,4	18,2
	5	17,8	17,6	17,4	16,6
	8	18,7	18,4	16	15,5
	12	19,3	17,9	17,8	17,2

4.1.5 Сравнение скоростей распыленной струи водоугольного топлива с добавлением жидких горючих компонентов

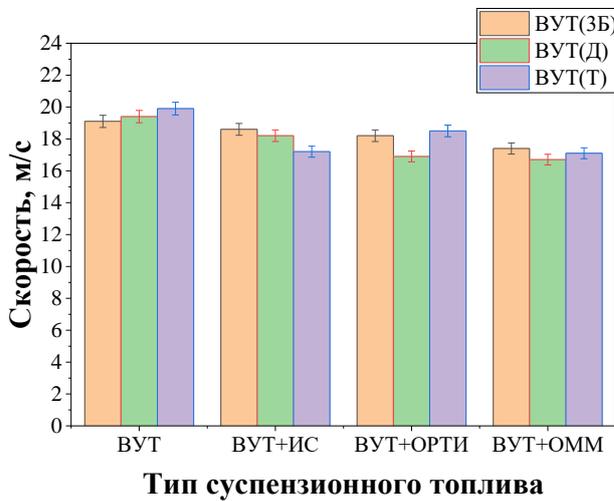
На рисунке 4.7 представлены зависимости средней скорости в ядре струи от типа жидкого горючего компонента для суспензионного топлива на основе углей марки ЗБ, Д и Т при его различных концентрациях.



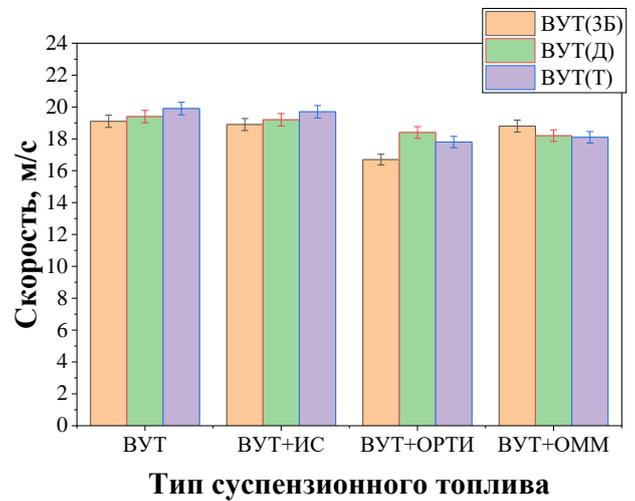
а)



б)



в)



г)

Рисунок 4.7 – Зависимости средней скорости струи суспензионного топлива на основе углей марки ЗБ, Д и Т от типа жидкой горючей добавки и ее концентрации: а – 3% жидкого горючего компонента; б – 5% жидкого горючего компонента; в – 8% жидкого горючего компонента; г – 12% жидкого горючего компонента

Полученные результаты показывают, что средняя скорость в ядре струи после распыления водоугольного топлива на основе угля марки ЗБ с добавлением 3%, 5%, 8% и 12% изопропилового спирта снижается на 4,9%, 3,1%, 2,2% и 0,4%, соответственно.

Определено, что средняя скорость в ядре струи после распыления водоугольного топлива на основе угля марки Д с добавлением 3%, 5%, 8% и 12% изопропилового спирта снижается на 5,1%, 8,3%, 6,3% и 1,3%, соответственно.

Экспериментально установлено, что средняя скорость в ядре струи после распыления водоугольного топлива на основе угля марки Т с добавлением 3%, 5%, 8% и 12% изопропилового спирта снижается на 10,5%, 8,3%, 13,9% и 0,8%, соответственно.

Полученные результаты показывают, что средняя скорость в ядре струи после распыления водоугольного топлива на основе угля марки ЗБ с добавлением 3%, 5%, 8% и 12% отходов переработки РТИ снижается на 6,9%, 3,1%, 4,3% и 12,5%, соответственно.

Экспериментально установлено, что средняя скорость в ядре струи после распыления водоугольного топлива на основе угля марки Д с добавлением 3%, 5%, 8% и 12% отходов переработки РТИ снижается на 4,2%, 4,7%, 13,1% и 5,5%, соответственно.

Определено, что средняя скорость в ядре струи после распыления водоугольного топлива на основе угля марки Т с добавлением 3%, 5%, 8% и 12% отходов переработки РТИ снижается на 12,6%, 13,1%, 6,9% и 10,5%, соответственно.

Полученные результаты показывают, что средняя скорость в ядре струи после распыления водоугольного топлива на основе угля марки ЗБ с добавлением 3%, 5%, 8% и 12% отработанного моторного масла снижается на 11%, 6,4%, 8,5% и 1,6%, соответственно.

Определено, что средняя скорость в ядре струи после распыления водоугольного топлива на основе угля марки Д с добавлением 3%, 5%, 8% и 12% отработанного моторного масла снижается на 8,9%, 11,9%, 14,4% и 6%, соответственно.

Экспериментально установлено, что средняя скорость в ядре струи после распыления водоугольного топлива на основе угля марки Т с добавлением 3%, 5%,

8% и 12% отработанного моторного масла снижается на 6,4%, 13,1%, 14,2% и 9,4%, соответственно.

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.

4.2 Распределение по размерам капель распыленной струи водоугольного топлива

4.2.1 Распределение по размерам капель распыленной струи водоугольного топлива без добавления жидких горючих компонентов

На рисунке 4.8 представлено распределение капель по размерам после распыления водоугольного топлива на основе углей марки ЗБ, Д и Т без добавления жидких горючих компонентов. Для каждого состава была проведена серия из 50 экспериментов. Обработка осуществлялась с использованием общего распределения капель на всех изображениях, нормализованного к общему количеству идентифицированных капель. Капли условно разделены на три диапазона размеров: мелкие (до 300 мкм), средние (300-600 мкм) и крупные (более 600 мкм).

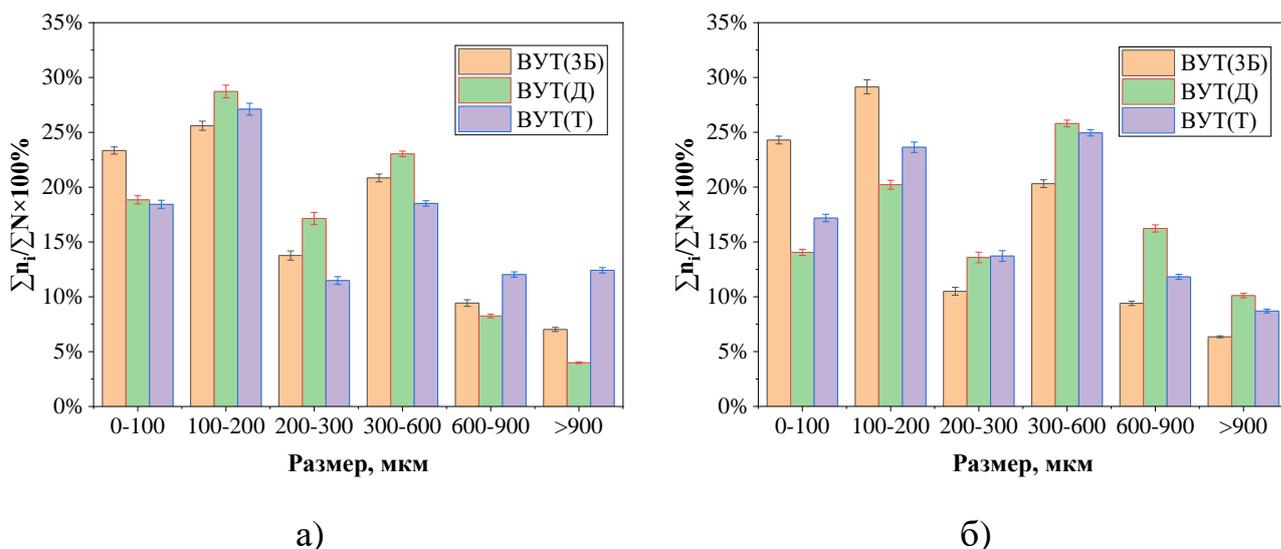


Рисунок 4.8 – Распределение капель по размерам после распыления водоугольного топлива на основе углей марки ЗБ, Д и Т без добавления жидких горючих компонентов на расстоянии 25-50 мм (а) и 75-100 мм (б) от устья форсунки

Установлено, что при распылении водоугольного топлива на основе угля марки ЗБ на расстоянии 25-50 мм от устья форсунки образуется 62,7% капель размером до 300 мкм, 20,8% капель размером 300-600 мкм и 16,5% капель более 600 мкм. Результаты экспериментов показывают, что на расстоянии 75-100 мм от устья форсунки образуется 63,9% капель размером до 300 мкм, 20,3% капель размером 300-600 мкм и 15,7% капель более 600 мкм. Таким образом, при удалении от устья форсунки распыленного потока водоугольного топлива на основе угля марки ЗБ образуется больше мелких капель (до 300 мкм).

Определено, что при распылении водоугольного топлива на основе угля марки Д на расстоянии 25-50 мм от устья форсунки образуется 64,7% капель размером до 300 мкм, 23% капель размером 300-600 мкм и 12,2% капель более 600 мкм. Результаты экспериментов показывают, что на расстоянии 75-100 мм от устья форсунки образуется 47,9% капель размером до 300 мкм, 25,8% капель размером 200-600 мкм и 26,3% капель более 600 мкм. Таким образом, при удалении от устья

форсунки распыленного потока водоугольного топлива на основе угля марки Д образуется больше средних и крупных капель.

Установлено, что при распылении водоугольного топлива на основе угля марки Т на расстоянии 25-50 мм от устья форсунки образуется 57% капель размером до 300 мкм, 18,5% капель размером 300-600 мкм и 24,5% капель более 600 мкм. Результаты экспериментов показывают, что на расстоянии 75-100 мм от устья форсунки образуется 54,5% капель размером до 300 мкм, 24,9% капель размером 300-600 мкм и 20,5% капель более 600 мкм. Таким образом, при удалении от устья форсунки распыленного потока водоугольного топлива на основе угля марки Т образуется больше средних капель (300-600 мкм).

4.2.2 Распределение по размерам капель распыленной струи водоугольного топлива с добавлением изопропилового спирта

На рисунках 4.9-4.11 представлено распределение капель по размерам после распыления водоугольного топлива на основе углей марки ЗБ, Д и Т с добавлением изопропилового спирта.

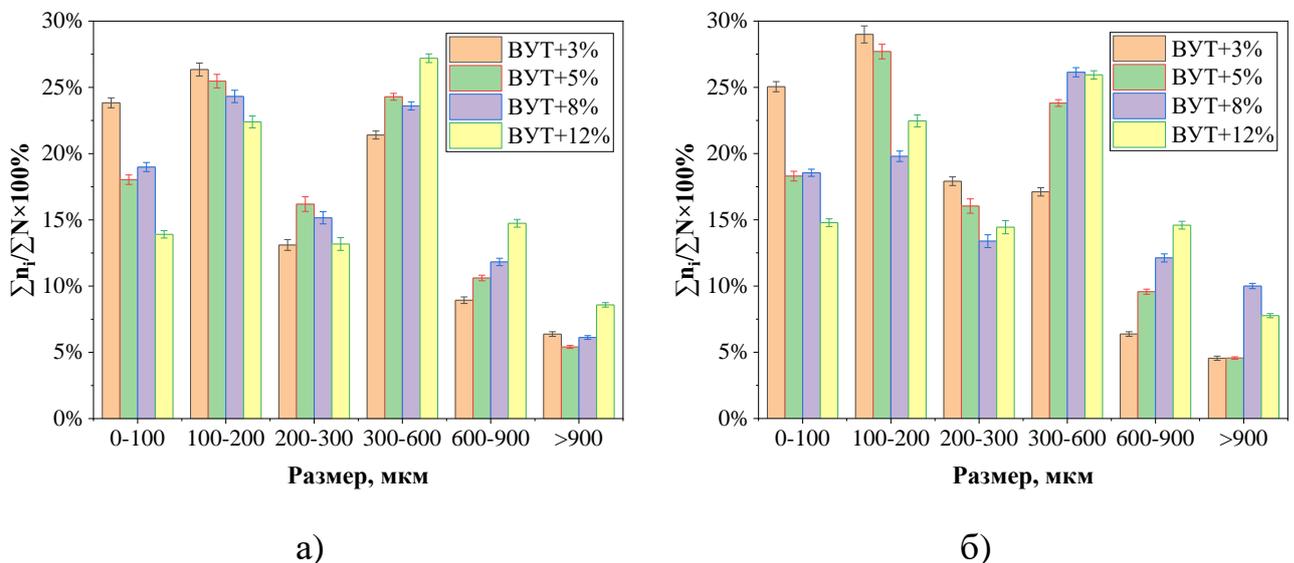


Рисунок 4.9 – Распределение капель по размерам после распыления водоугольного топлива на основе угля марки ЗБ с добавлением изопропилового спирта на расстоянии 25-50 мм (а) и 75-100 мм (б) от устья форсунки

По результатам экспериментов установлено, что при удалении от устья форсунки распыленной струи водоугольного топлива на основе угля марки ЗБ с добавлением 3%, 5% и 12% изопропилового спирта количество мелких капель (до 300 мкм) увеличивается на 8,7%, 2,4% и 2,2%, соответственно. При удалении от устья форсунки струи ВУТ с добавлением 8% изопропилового спирта происходит уменьшение количества таких капель на 6,7%.

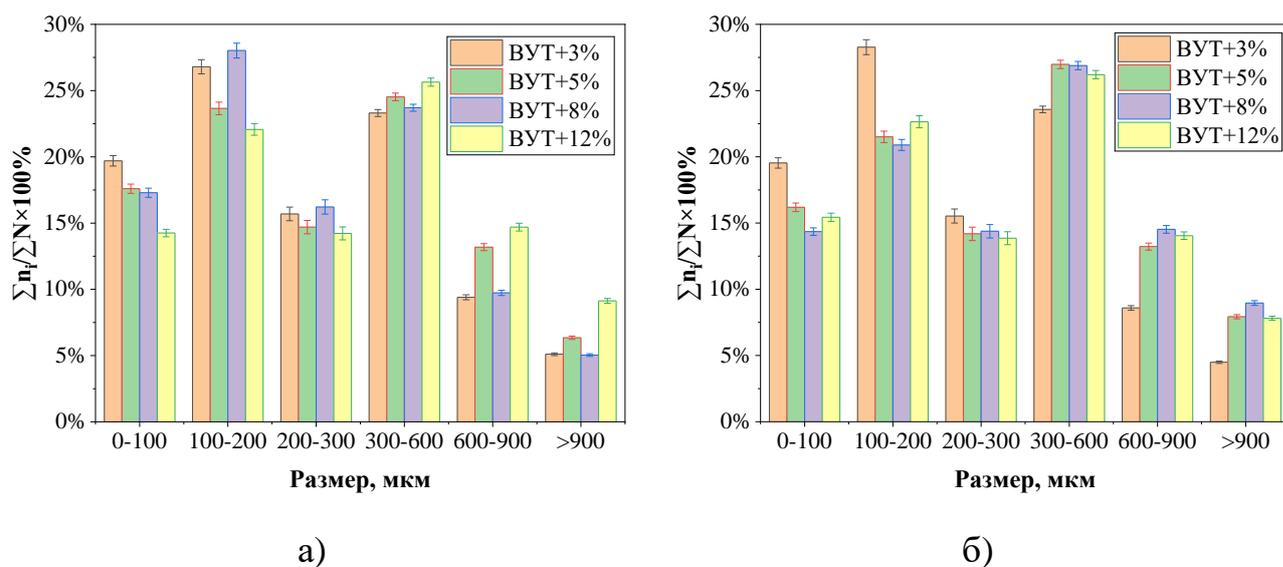


Рисунок 4.10 – Распределение капель по размерам после распыления водоугольного топлива на основе угля марки Д с добавлением изопропилового спирта на расстоянии 25-50 мм (а) и 75-100 мм (б) от устья форсунки

Установлено, что при удалении от устья форсунки распыленной струи водоугольного топлива на основе угля марки Д с добавлением 3% и 12% изопропилового спирта количество мелких капель (до 300 мкм) увеличивается на 1,2% и 1,4%, соответственно. При удалении от устья форсунки струи ВУТ с добавлением 5% и 8% изопропилового спирта происходит снижение количества таких капель на 4,1% и 11,9%, соответственно.

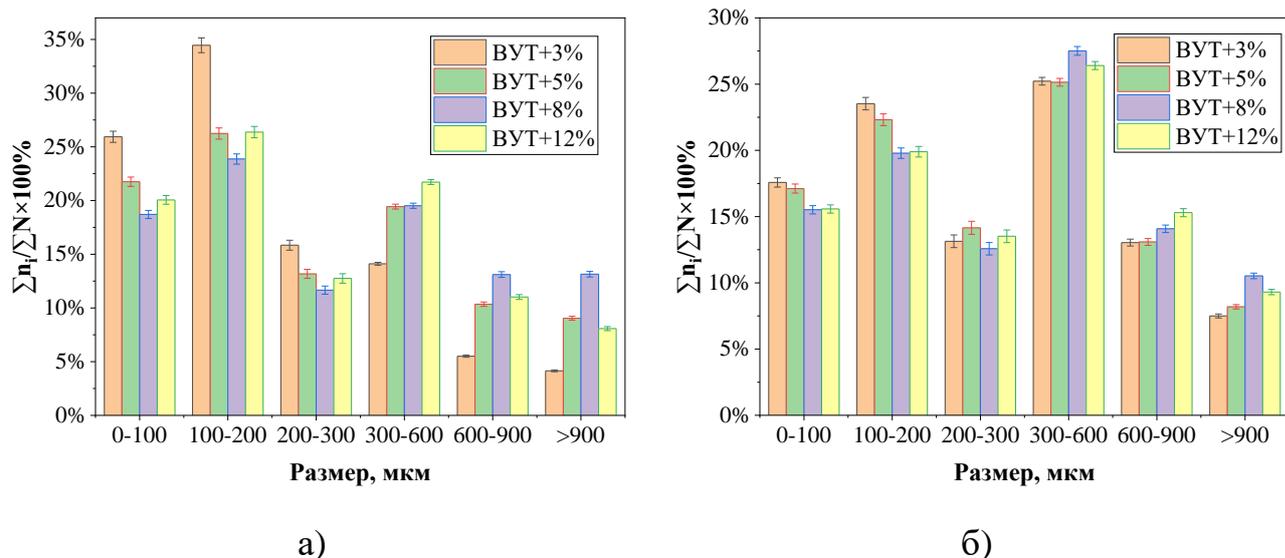


Рисунок 4.11 – Распределение капель по размерам после распыления водоугольного топлива на основе угля марки Т с добавлением изопропилового спирта на расстоянии 25-50 мм (а) и 75-100 мм (б) от устья форсунки

Установлено, что при удалении от устья форсунки распыленной струи водоугольного топлива на основе угля марки Т с добавлением 3%, 5%, 8% и 12% изопропилового спирта количество мелких капель (до 300 мкм) снижается на 21,9%, 7,6%, 6,3% и 10,2%, соответственно.

На рисунке 4.12 представлены зависимости количества капель в области исследования (25-100 мм от устья форсунки) после распыления суспензионного топлива на основе углей марки ЗБ, Д и Т от доли изопропилового спирта.

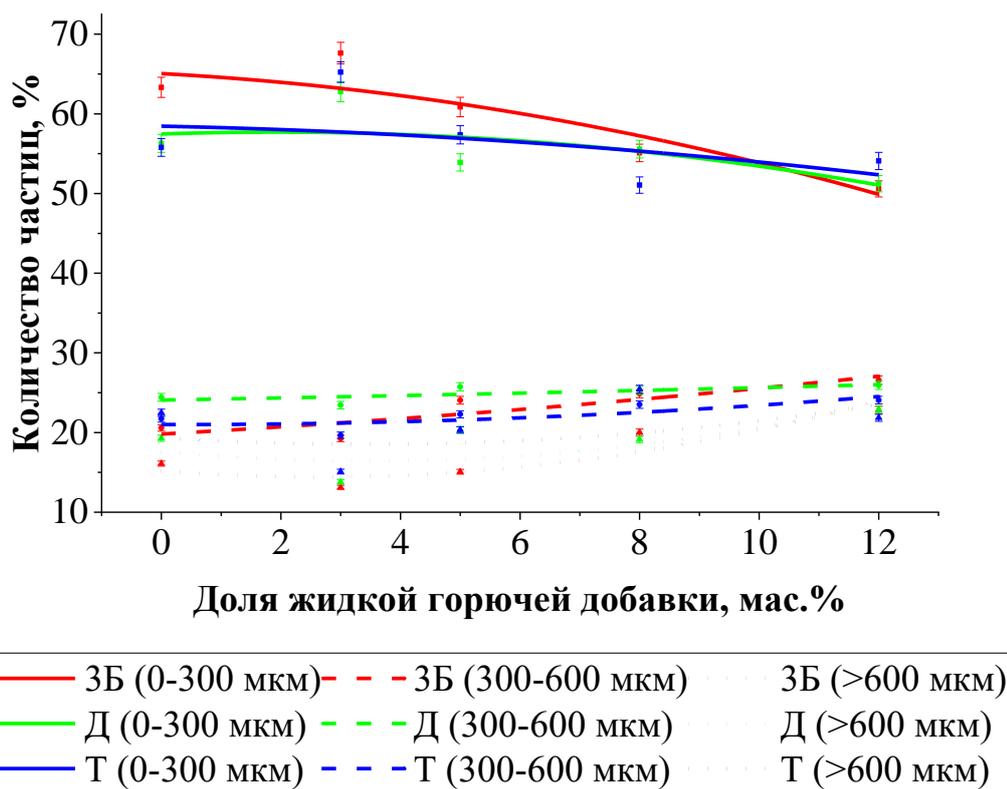


Рисунок 4.12 – Зависимости количества капель разных размеров после распыления суспензионного топлива на основе углей марки ЗБ, Д и Т от доли изопропилового спирта [124]

Полученные результаты показывают, что добавление изопропилового спирта в состав водоугольного топлива на основе углей марки ЗБ, Д и Т снижает количество капель размером до 300 мкм. Для суспензионного топлива на основе угля марки ЗБ такое снижение составляет 1,9%, 3,8%, 7,8% и 15,1% при введении 3%, 5%, 8% и 12% изопропилового спирта, соответственно, для суспензионного топлива на основе угля марки Д – 0,2%, 0,6%, 2,3% и 6,6%, для суспензионного топлива на основе угля марки Т – 0,7%, 1,5%, 3,1% и 6,1%. При этом количество средних и/или крупных капель увеличивается на соответствующую величину.

4.2.3 Распределение по размерам капель распыленной струи водоугольного топлива с добавлением жидких отходов переработки РТИ

На рисунках 4.13-4.15 представлено распределение капель по размерам после распыления водоугольного топлива на основе углей марки ЗБ, Д и Т с добавлением жидких отходов переработки РТИ.

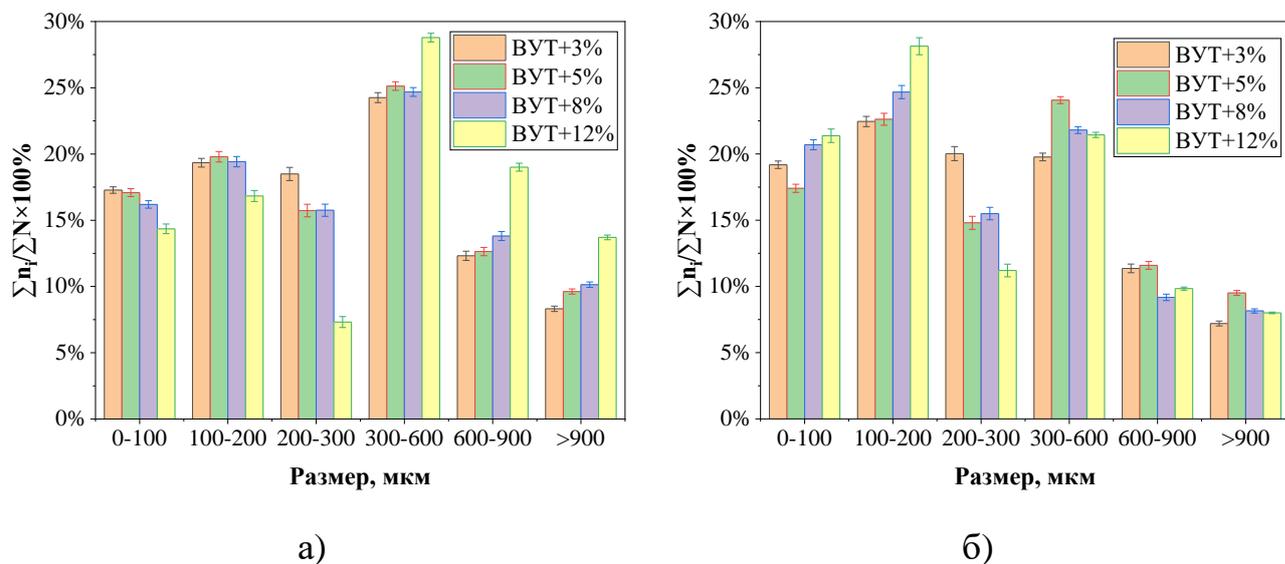


Рисунок 4.13 – Распределение капель по размерам после распыления водоугольного топлива на основе угля марки ЗБ с добавлением жидких отходов переработки РТИ на расстоянии 25-50 мм (а) и 75-100 мм (б) от устья форсунки

Установлено, что при удалении от устья форсунки распыленной струи водоугольного топлива на основе угля марки ЗБ с добавлением 3%, 5%, 8% и 12% жидких отходов переработки РТИ количество мелких капель (до 300 мкм) увеличивается на 6,6%, 2,2%, 9,5% и 22,2%, соответственно.

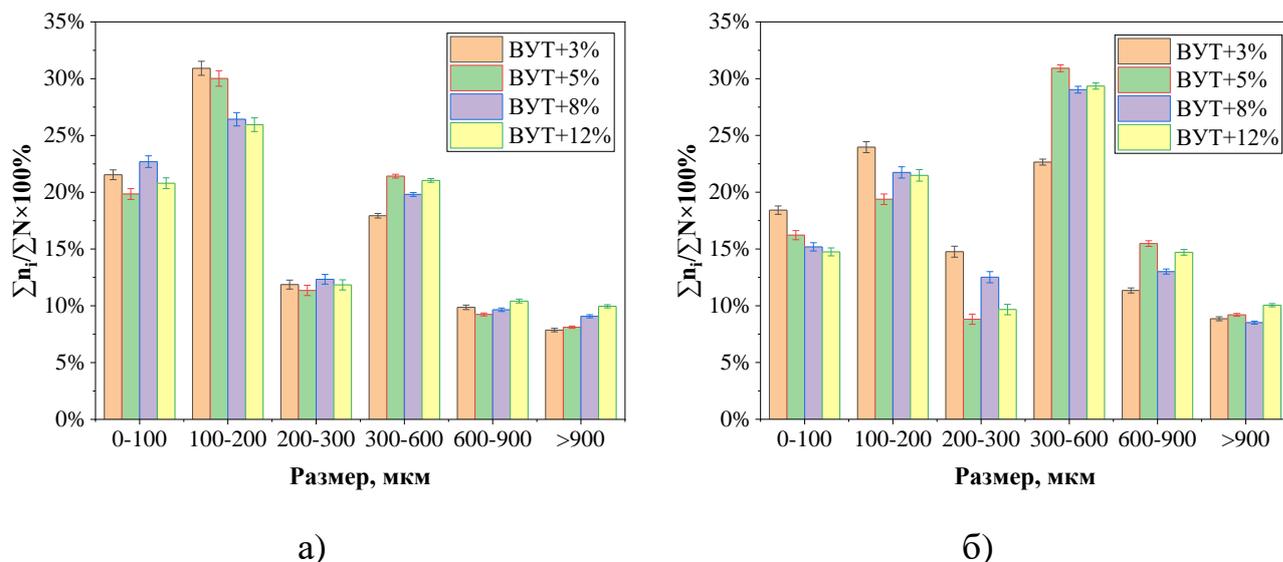


Рисунок 4.15 – Распределение капель по размерам после распыления водоугольного топлива на основе угля марки Т с добавлением жидких отходов переработки РТИ на расстоянии 25-50 мм (а) и 75-100 мм (б) от устья форсунки

Установлено, что при удалении от устья форсунки распыленной струи водоугольного топлива на основе угля марки Т с добавлением 3%, 5%, 8% и 12% жидких отходов переработки РТИ количество мелких капель (до 300 мкм) уменьшается на 7,2%, 16,8%, 12% и 12,7%, соответственно.

На рисунке 4.16 представлены зависимости количества капель в области исследования (25-100 мм) после распыления суспензионного топлива на основе углей марки ЗБ, Д и Т от доли жидких отходов переработки РТИ.

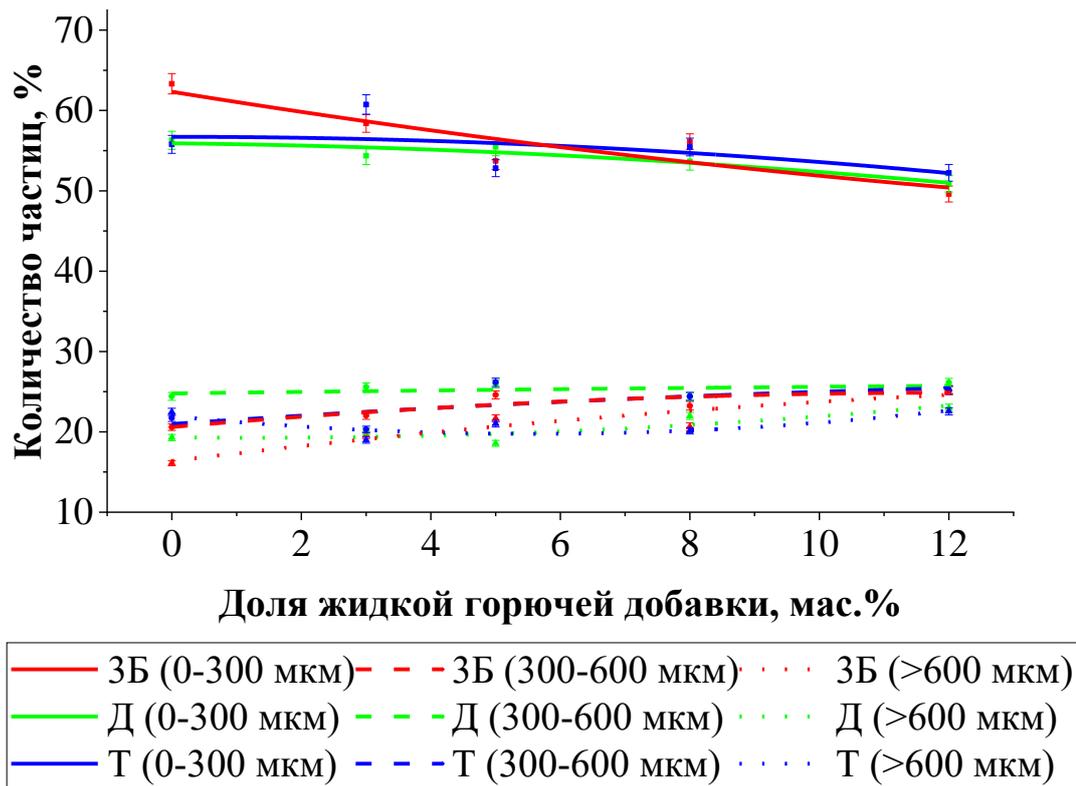


Рисунок 4.16 – Зависимости количества капель разных размеров после распыления суспензионного топлива на основе углей марки 3Б, Д и Т от доли жидких отходов переработки РТИ [125]

При добавлении жидких отходов переработки РТИ в состав ВУТ на основе углей марки 3Б, Д и Т отмечается снижение количества мелких капель (до 300 мкм). Для суспензионного топлива на основе угля марки 3Б такое снижение составляет 3,7%, 5,9%, 8,8% и 11,9% при введении 3%, 5%, 8% и 12% жидких отходов переработки РТИ, соответственно, для суспензионного топлива на основе угля марки Д – 0,5%, 1,1%, 2,4% и 4,9%, для суспензионного топлива на основе угля марки Т – 0,3%, 0,8%, 3,1% и 6,2%. При этом количество средних и/или крупных капель увеличивается на соответствующую величину.

4.2.4 Распределение по размерам капель распыленной струи водоугольного топлива с добавлением отработанного моторного масла

На рисунках 4.17-4.19 представлено распределение капель по размерам после распыления водоугольного топлива на основе углей марки ЗБ, Д и Т с добавлением отработанного моторного масла.

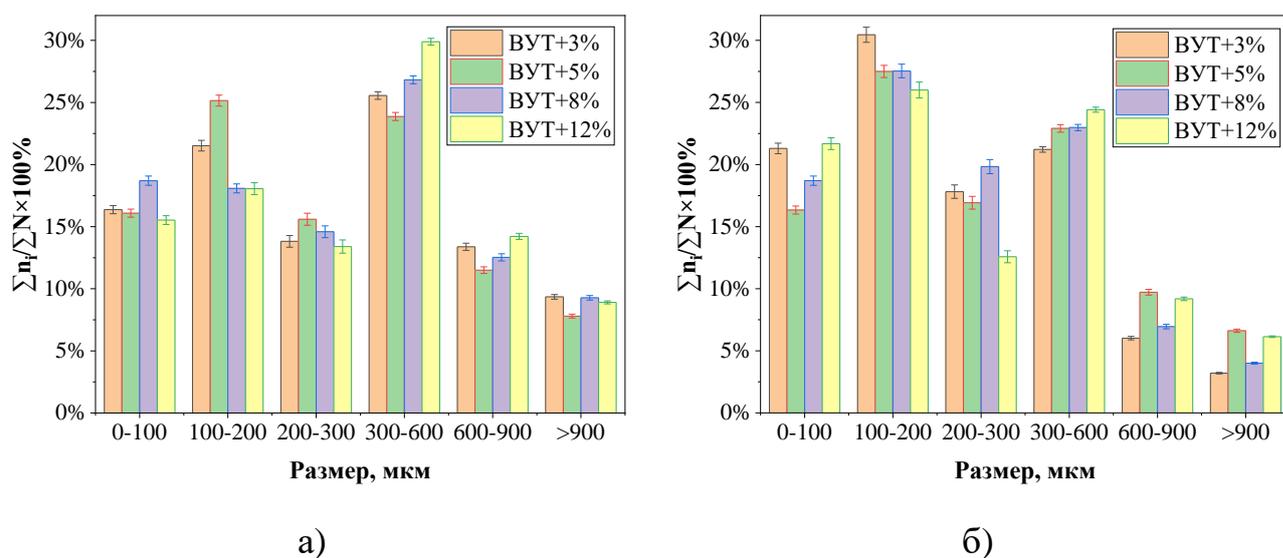


Рисунок 4.17 – Распределение капель по размерам после распыления водоугольного топлива на основе угля марки ЗБ с добавлением отработанного моторного масла на расстоянии 25-50 мм (а) и 75-100 мм (б) от устья форсунки

Установлено, что при удалении от устья форсунки распыленной струи водоугольного топлива на основе угля марки ЗБ с добавлением 3%, 5%, 8% и 12% отработанного моторного масла количество мелких капель (до 300 мкм) увеличивается на 17,9%, 3,9%, 14,7% и 13,3%, соответственно.

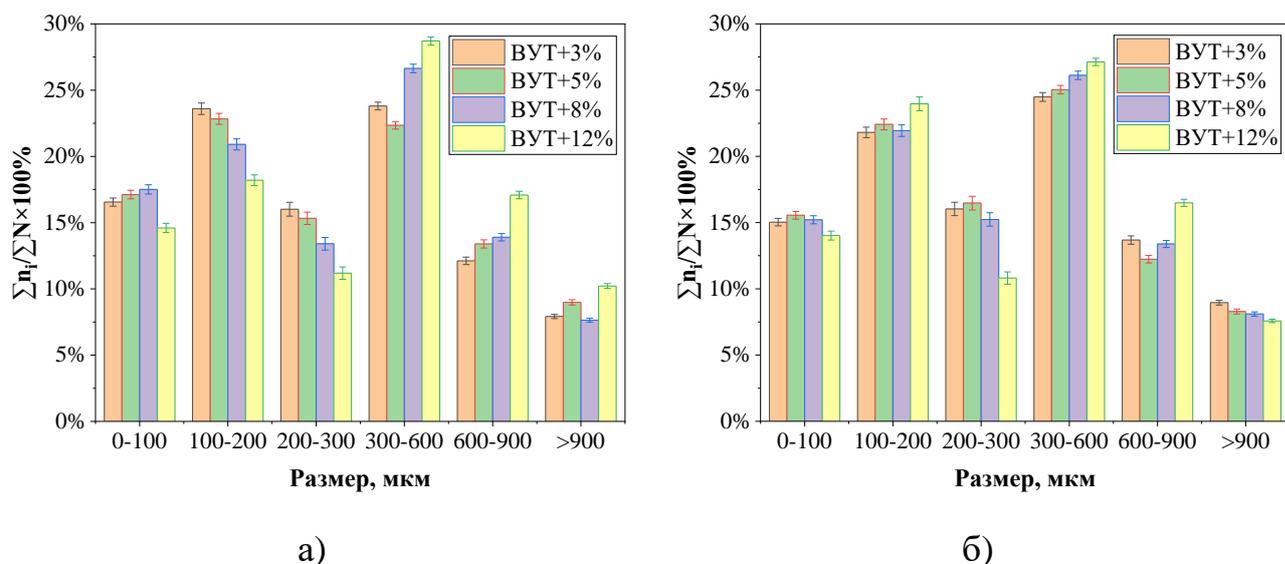


Рисунок 4.18 – Распределение капель по размерам после распыления водоугольного топлива на основе угля марки Д с добавлением отработанного моторного масла на расстоянии 25-50 мм (а) и 75-100 мм (б) от устья форсунки

Установлено, что при удалении от устья форсунки распыленной струи водоугольного топлива на основе угля марки Д с добавлением 3% и 5% отработанного моторного масла количество мелких капель (до 300 мкм) уменьшается на 3,3% и 0,8%, соответственно. При удалении от устья форсунки струи ВУТ с добавлением 8% и 12% отработанного моторного масла происходит увеличение количества таких капель на 0,6% и 4,8%, соответственно.

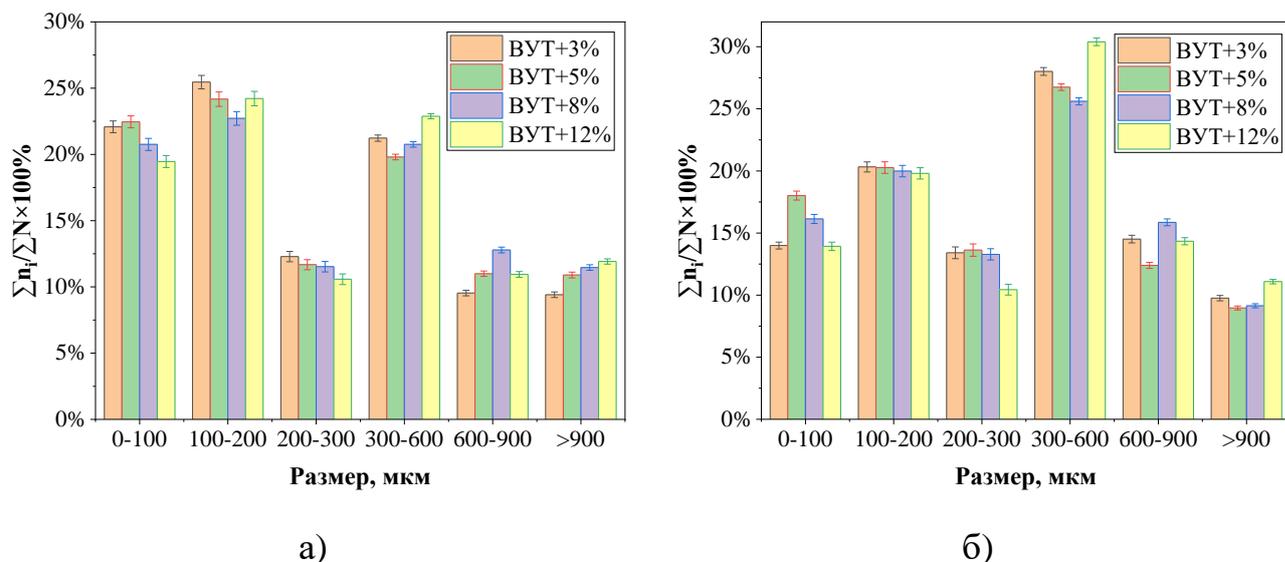


Рисунок 4.19 – Распределение капель по размерам после распыления водоугольного топлива на основе угля марки Т с добавлением отработанного моторного масла на расстоянии 25-50 мм (а) и 75-100 мм (б) от устья форсунки

Установлено, что при удалении от устья форсунки распыленной струи водоугольного топлива на основе угля марки Т с добавлением 3%, 5%, 8% и 12% отработанного моторного масла количество мелких капель (до 300 мкм) уменьшается на 12,1%, 6,4%, 5,6% и 10,1%, соответственно.

На рисунке 4.20 представлены зависимости количества капель в области исследования (25-100 мм) после распыления водоугольного топлива на основе углей марки ЗБ, Д и Т от доли отработанного моторного масла.

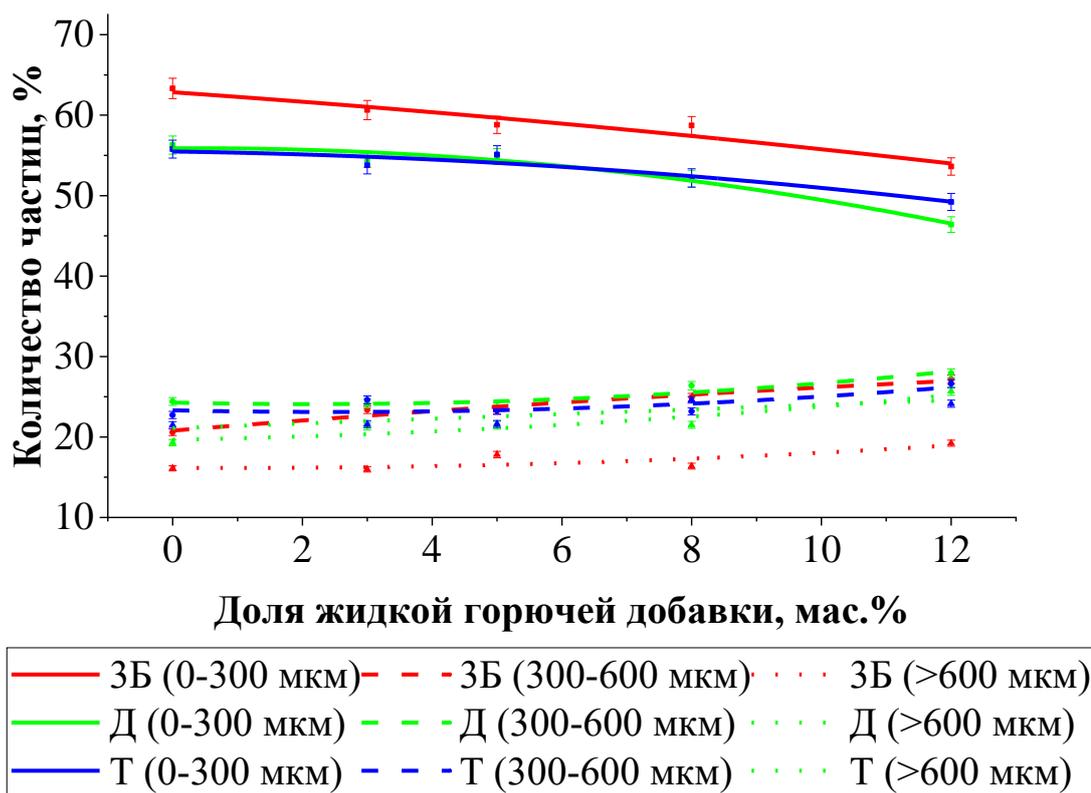


Рисунок 4.20 – Зависимости количества капель разных размеров после распыления суспензионного топлива на основе углей марки 3Б, Д и Т от доли отработанного моторного масла

При добавлении отработанного моторного масла в состав ВУТ на основе углей марки 3Б, Д и Т отмечается снижение количества мелких капель (до 300 мкм). Для суспензионного топлива на основе угля марки 3Б 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.

4.2.5 Сравнение распределения по размерам капель распыленной струи водоугольного топлива с добавлением жидких горючих компонентов

На рисунке 4.21 представлены зависимости количества мелких капель (до 300 мкм) в области исследования (25-100 мм) от типа жидкого горючего компонента для суспензионного топлива на основе углей марки ЗБ, Д и Т при его различных концентрациях.

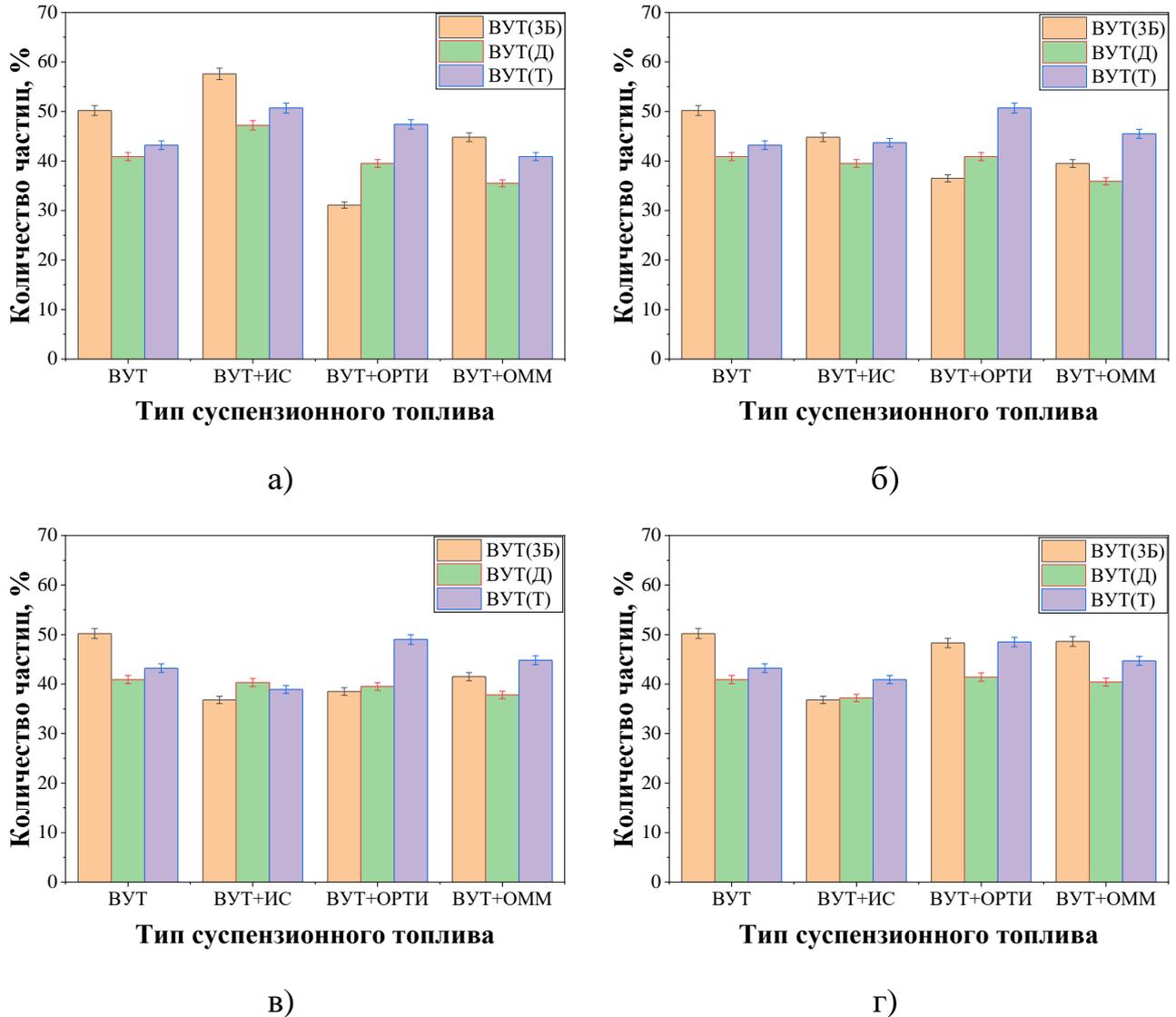


Рисунок 4.21 – Зависимости количества мелких капель (до 300 мкм) после распыления суспензионного топлива на основе углей марки ЗБ, Д и Т от типа жидкого горючего компонента и его концентрации: а – 3% жидкого горючего компонента; б – 5% жидкого горючего компонента; в – 8% жидкого горючего компонента; г – 12% жидкого горючего компонента

По результатам проведенных экспериментов установлено, что при одинаковых концентрациях исследовавшихся жидких горючих компонентов в составе ВУТ на основе угля марки ЗБ изопропиловый спирт приводит к наименьшему снижению количества мелких капель (до 300 мкм), а жидкие отходы переработки РТИ – к наибольшему. При этом на водоугольное топливо на основе углей марки Д и Т наибольший эффект оказывает отработанное моторное масло.

4.3 Угол раскрытия струи

4.3.1 Угол раскрытия распыленной струи водоугольного топлива без добавления жидких горючих компонентов

На рисунке 4.22 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.

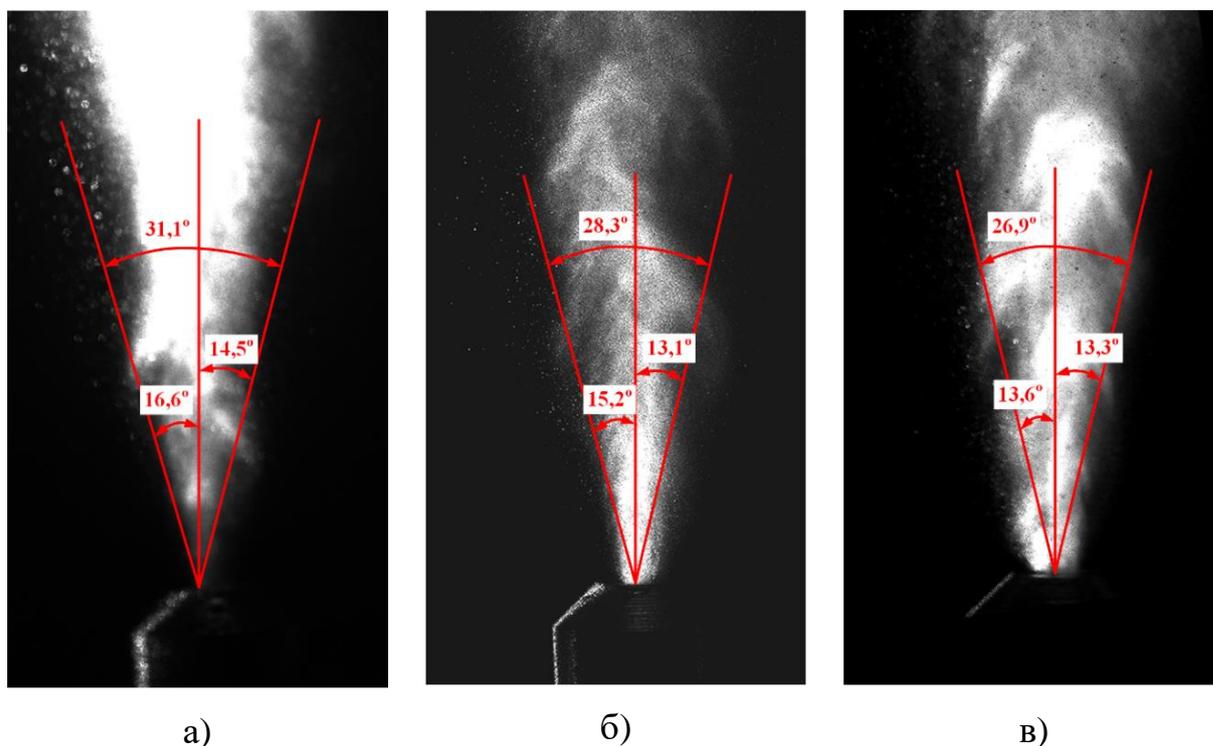


Рисунок 4.22 – Угол раскрытия струи после распыления водоугольного топлива на основе углей марки ЗБ (а), Д (б) и Т (в) без добавления жидких горючих компонентов [126]

Обработка заключалась в определении угла раскрытия струи по 20 кадрам для одного состава топлива. Далее полученные значения усреднялись, и найденное число принималось за угол раскрытия струи.

Полученные результаты показывают, что при распылении водоугольного топлива на основе угля марки ЗБ формируется струя с наибольшим углом раскрытия, а при распылении водоугольного топлива на основе угля марки Т – с наименьшим.

4.3.2 Угол раскрытия распыленной струи водоугольного топлива с добавлением изопропилового спирта

На рисунках 4.23-4.25 представлены типичные кадры, иллюстрирующие процесс распыления водоугольного топлива на основе углей марки ЗБ, Д и Т с добавлением изопропилового спирта с обозначением угла раскрытия струи.

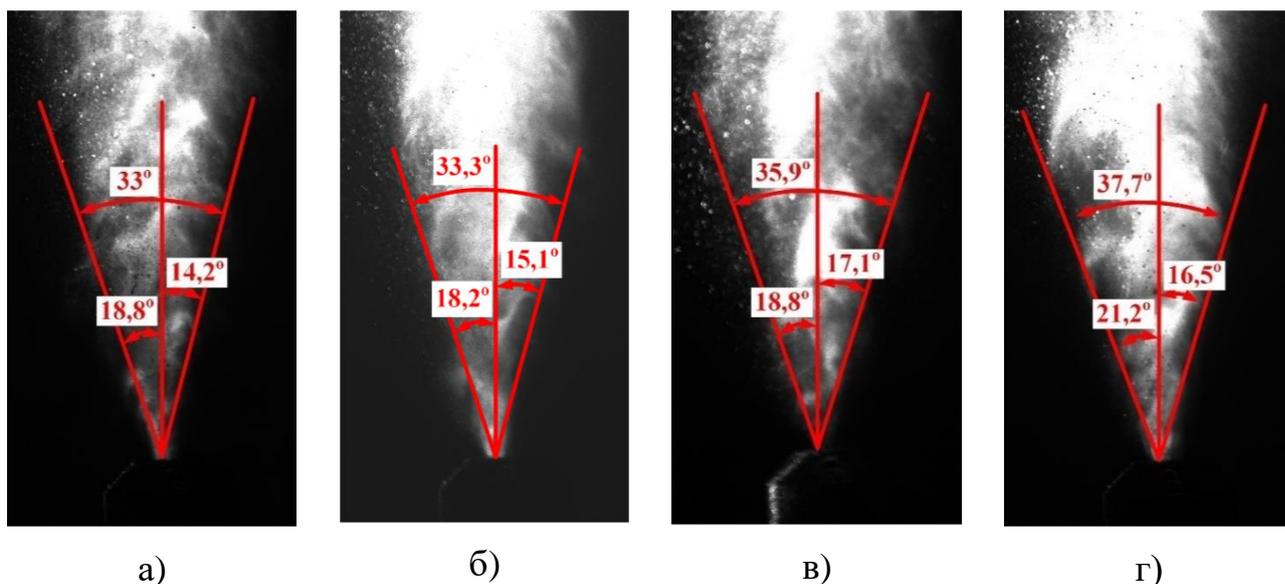


Рисунок 4.23 – Угол раскрытия струи после распыления водоугольного топлива на основе угля марки ЗБ с добавлением 3% (а), 5% (б), 8% (в) и 12% (г) изопропилового спирта

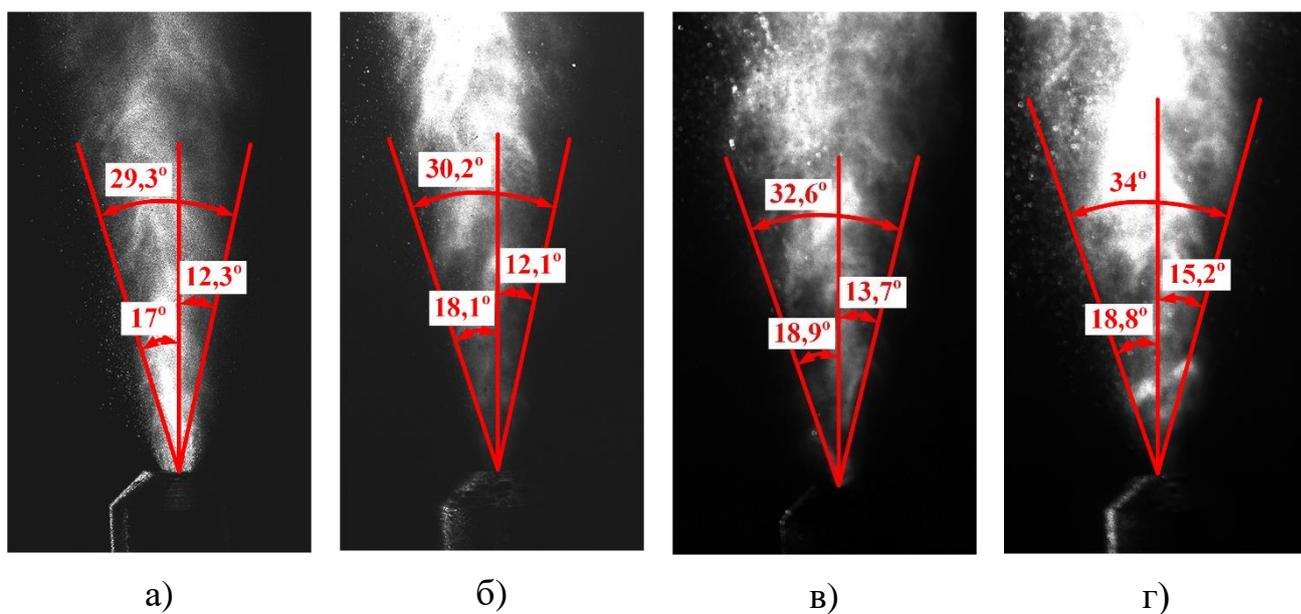


Рисунок 4.24 – Угол раскрытия струи после распыления водоугольного топлива на основе угля марки Д с добавлением 3% (а), 5% (б), 8% (в) и 12% (г) изопропилового спирта

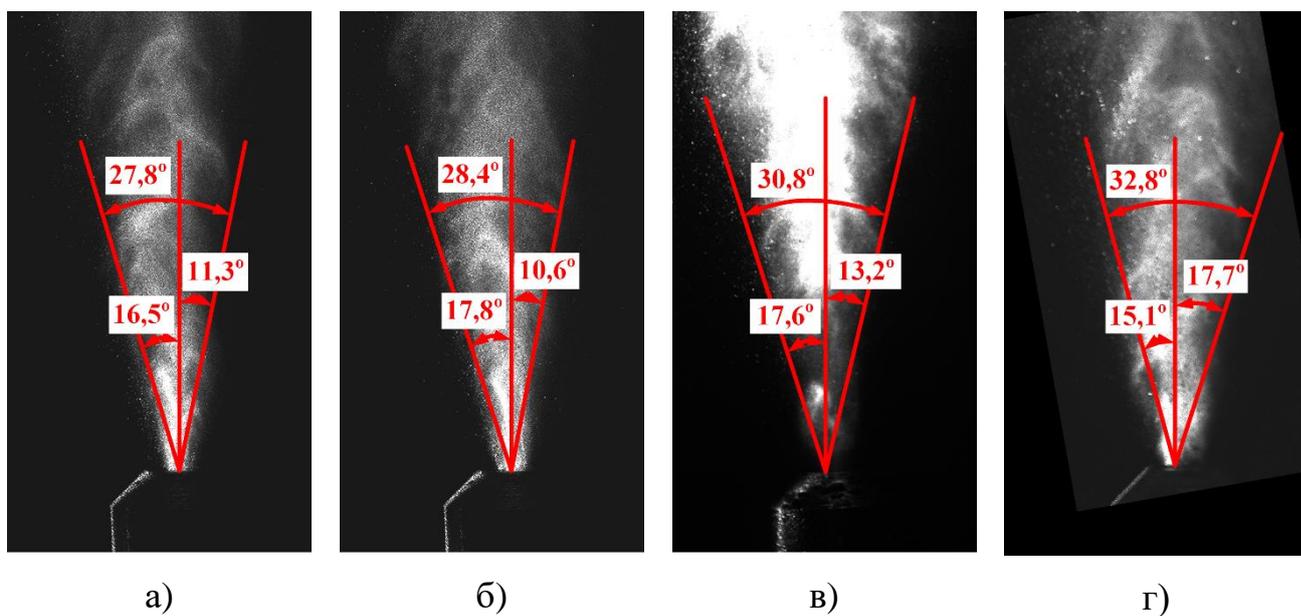


Рисунок 4.25 – Угол раскрытия струи после распыления водоугольного топлива на основе угля марки Т с добавлением 3% (а), 5% (б), 8% (в) и 12% (г) изопропилового спирта

На рисунке 4.26 представлены зависимости угла раскрытия струи после распыления суспензионного топлива на основе углей марки ЗБ, Д и Т от доли

изопропилового спирта. Так, при увеличении доли изопропилового спирта в составе суспензионного топлива на основе угля марки ЗБ до 12 мас.% угол раскрытия струи увеличивается на 17,5% относительно типичного ВУТ. Повышение доли изопропилового спирта в составе суспензионного топлива на основе угля марки Д до 12 мас.% приводит к увеличению угла раскрытия струи на 16,8%. Рост доли изопропилового спирта в составе суспензионного топлива на основе угля марки Т до 12% приводит к повышению угла раскрытия струи на 17,9%.

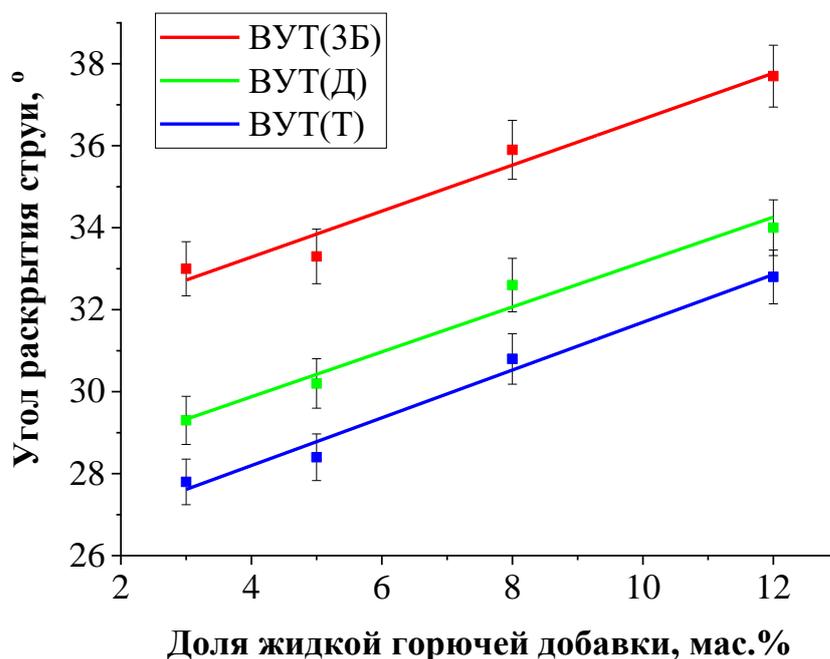


Рисунок 4.26 – Зависимости угла раскрытия струи после распыления водоугольного топлива на основе углей марки ЗБ, Д и Т от доли изопропилового спирта

4.3.3 Угол раскрытия распыленной струи водоугольного топлива с добавлением жидких отходов переработки РТИ

На рисунках 4.27-4.29 представлены типичные кадры, иллюстрирующие процесс распыления водоугольного топлива на основе углей марки ЗБ, Д и Т с добавлением жидких отходов переработки РТИ с обозначением угла раскрытия струи.

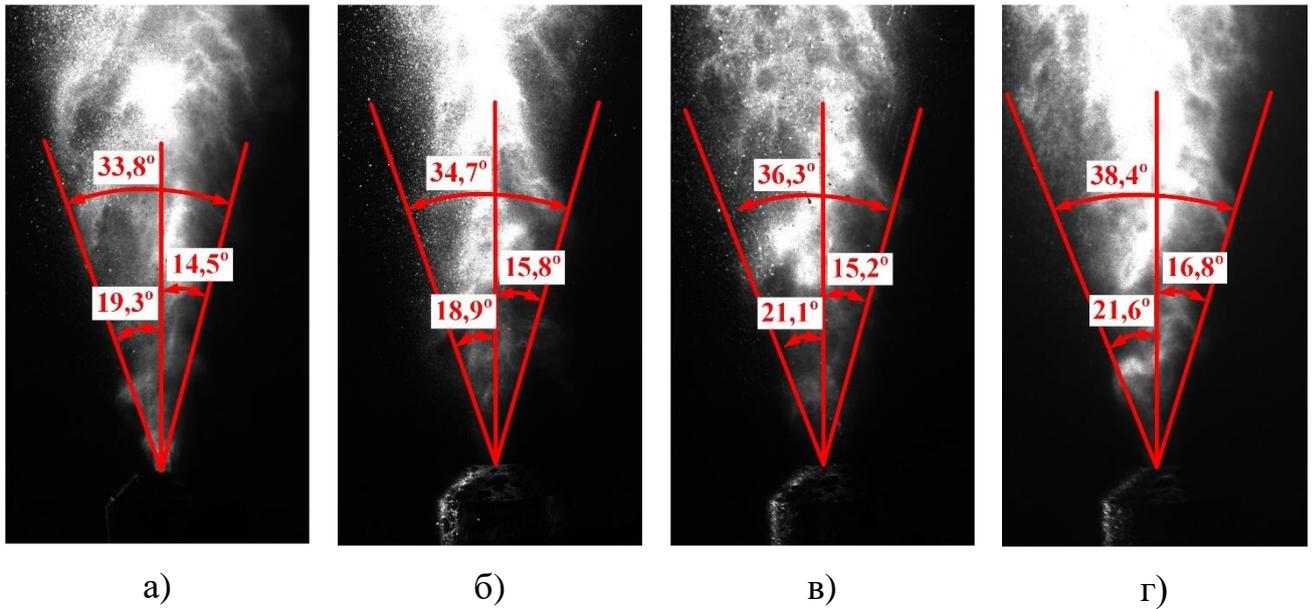


Рисунок 4.27 – Угол раскрытия струи после распыления водоугольного топлива на основе угля марки ЗБ с добавлением 3% (а), 5% (б), 8% (в) и 12% (г) жидких отходов переработки РТИ [125]

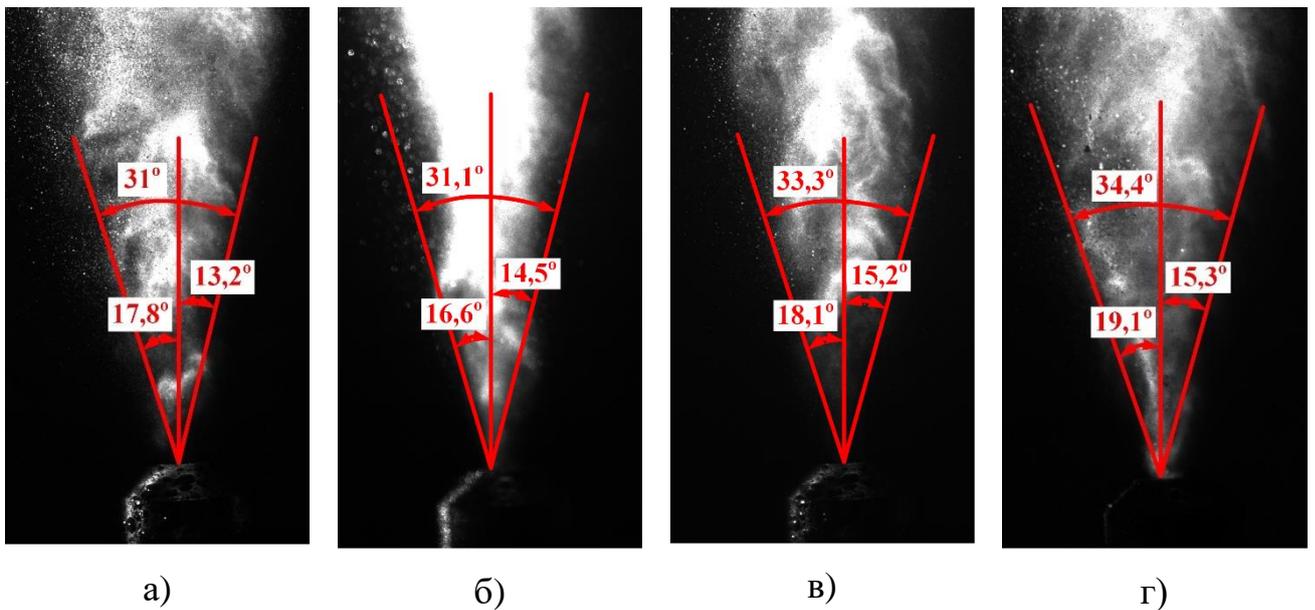


Рисунок 4.28 – Угол раскрытия струи после распыления водоугольного топлива на основе угля марки Д с добавлением 3% (а), 5% (б), 8% (в) и 12% (г) жидких отходов переработки РТИ [125]

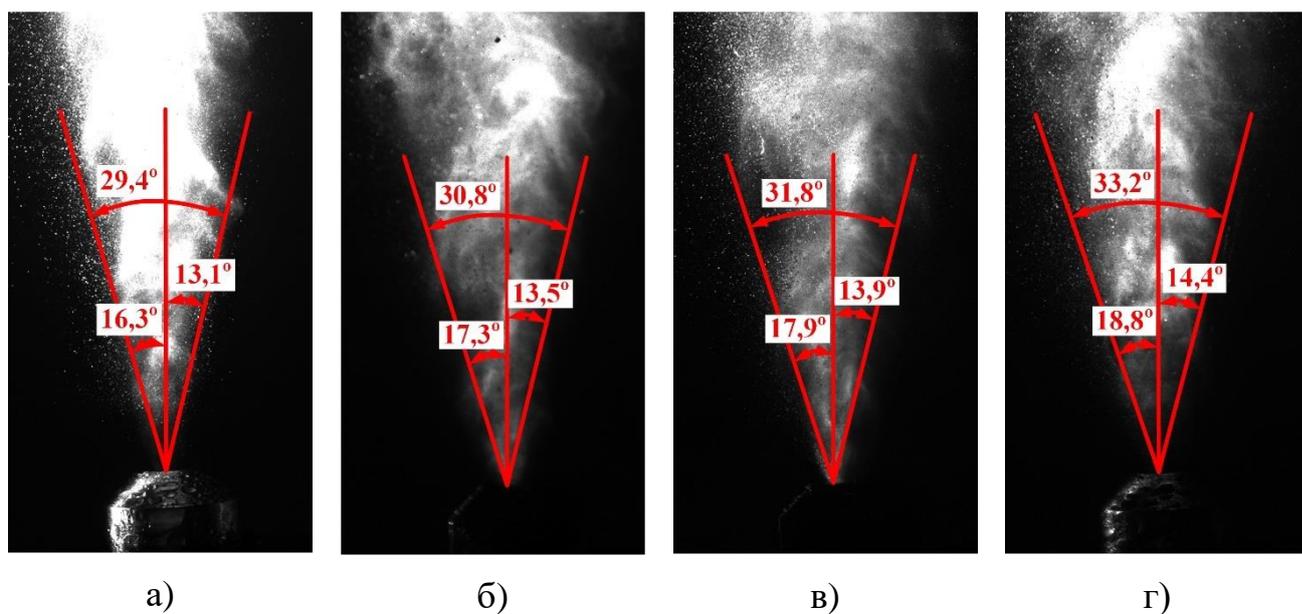


Рисунок 4.29 – Угол раскрытия струи после распыления водоугольного топлива на основе угля марки Т с добавлением 3% (а), 5% (б), 8% (в) и 12% (г) жидких отходов переработки РТИ [125]

На рисунке 4.30 представлены зависимости угла раскрытия струи после распыления суспензионного топлива на основе углей марки ЗБ, Д и Т от содержания жидких отходов переработки РТИ. Повышение доли отходов переработки РТИ в составе суспензионного топлива на основе угля марки ЗБ до 12 мас.% приводит к увеличению угла раскрытия струи на 19% относительно типичного ВУТ. При увеличении доли отходов переработки РТИ в составе суспензионного топлива на основе угля марки Д до 12 мас.% происходит увеличение угла раскрытия струи на 17,7%. Рост доли отходов переработки РТИ в составе суспензионного топлива на основе угля марки Т до 12 мас.% приводит к повышению угла раскрытия струи на 22,9%.

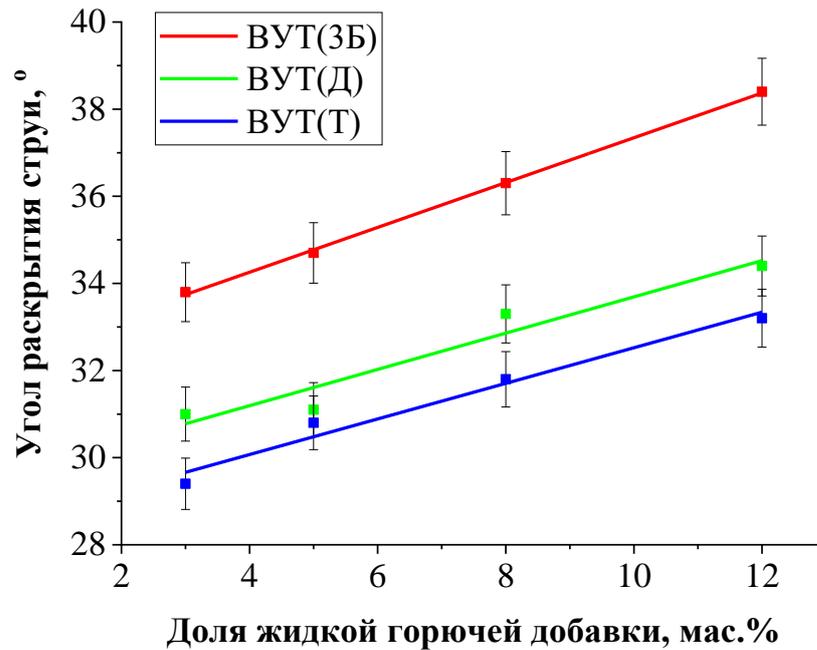


Рисунок 4.30 – Зависимости угла раскрытия струи после распыления водоугольного топлива на основе углей марки 3Б, Д и Т от содержания жидких отходов переработки РТИ

4.3.4 Угол раскрытия распыленной струи водоугольного топлива с добавлением отработанного моторного масла

На рисунках 4.31-4.33 представлены типичные кадры, иллюстрирующие процесс распыления водоугольного топлива на основе углей марки 3Б, Д и Т с добавлением отработанного моторного масла с обозначением угла раскрытия струи.

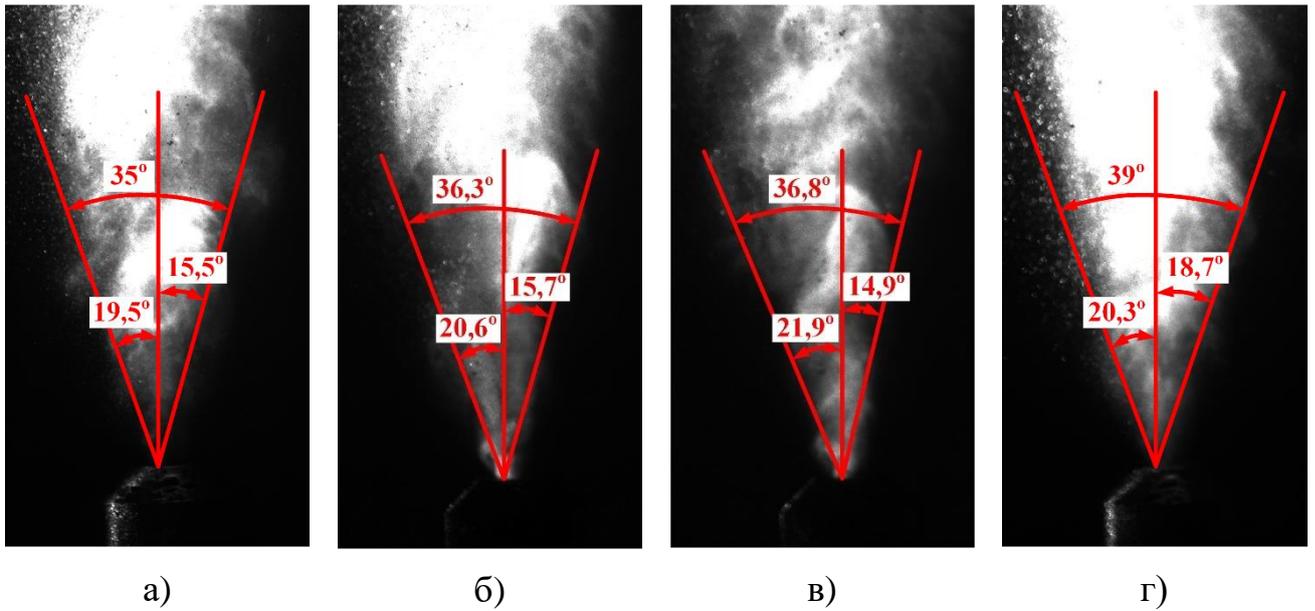


Рисунок 4.31 – Угол раскрытия струи после распыления водоугольного топлива на основе угля марки ЗБ с добавлением 3% (а), 5% (б), 8% (в) и 12% (г) отработанного моторного масла

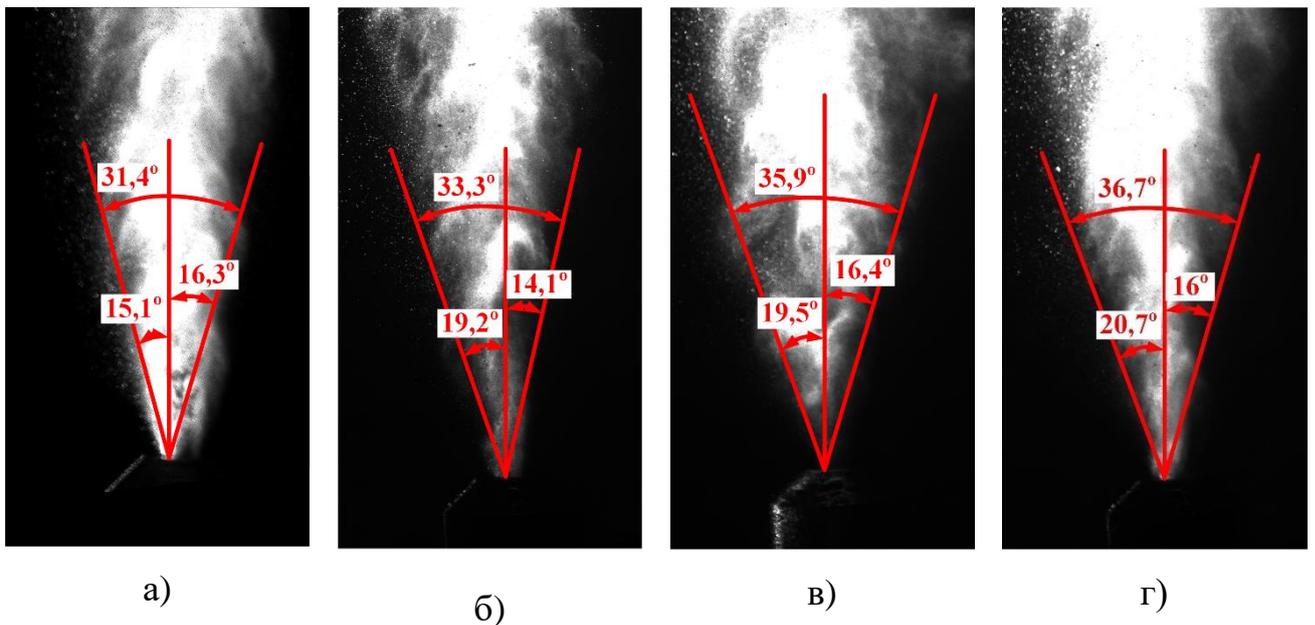


Рисунок 4.32 – Угол раскрытия струи после распыления водоугольного топлива на основе угля марки Д с добавлением 3% (а), 5% (б), 8% (в) и 12% (г) отработанного моторного масла

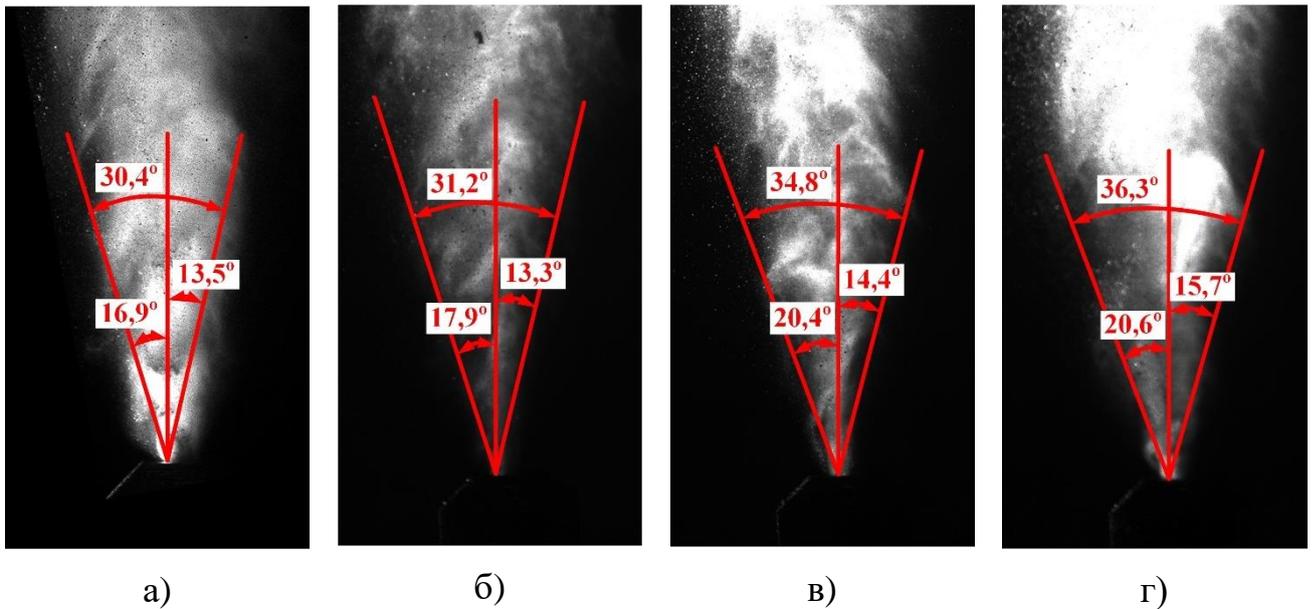


Рисунок 4.33 – Угол раскрытия струи после распыления водоугольного топлива на основе угля марки Т с добавлением 3% (а), 5% (б), 8% (в) и 12% (г) отработанного моторного масла

Согласно результатам, представленным на рисунке 4.34 рост доли отработанного моторного масла в составе суспензионного топлива на основе угля марки 3Б до 12 мас.% приводит к повышению угла раскрытия струи на 20,3% относительно типичного ВУТ. При увеличении доли отработанного моторного масла в составе суспензионного топлива на основе угля марки Д до 12 мас.% угол раскрытия струи увеличивается на 22,9%. Повышение доли отработанного моторного масла в составе суспензионного топлива на основе угля марки Т до 12 мас.% приводит к росту угла раскрытия струи на 25,9%.

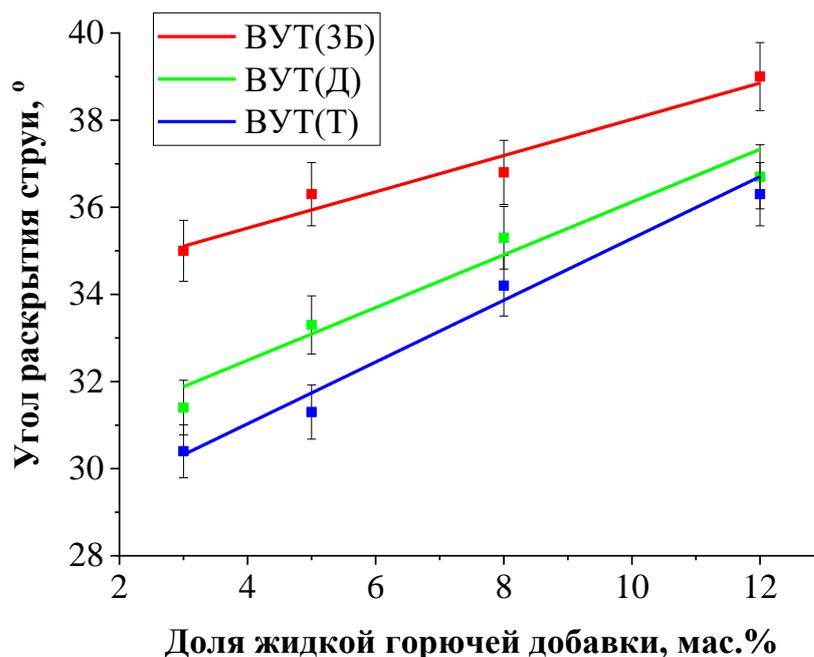


Рисунок 4.34 – Зависимости угла раскрытия струи после распыления водоугольного топлива на основе углей марки 3Б, Д и Т от доли отработанного моторного масла

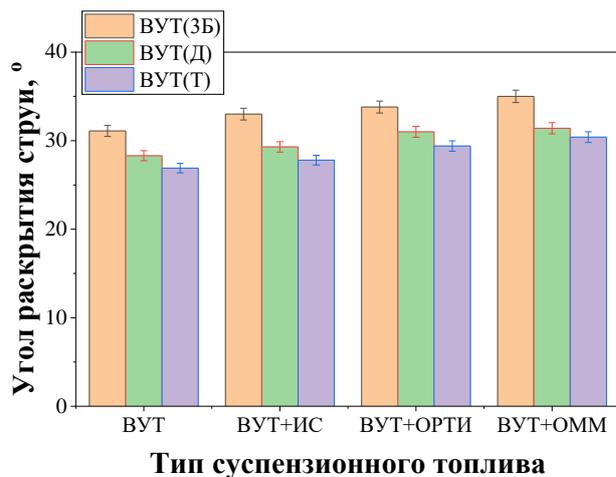
4.3.5 Сравнение угла раскрытия распыленной струи водоугольного топлива с добавлением жидких горючих компонентов

На рисунке 4.35 показаны зависимости угла раскрытия струи после распыления суспензионного топлива на основе углей марки 3Б, Д и Т от доли и типа жидкого горючего компонента. Введение в состав ВУТ жидких горючих компонентов приводит к изменению угла раскрытия струи при постоянных значениях давления распыляющего агента и топлива.

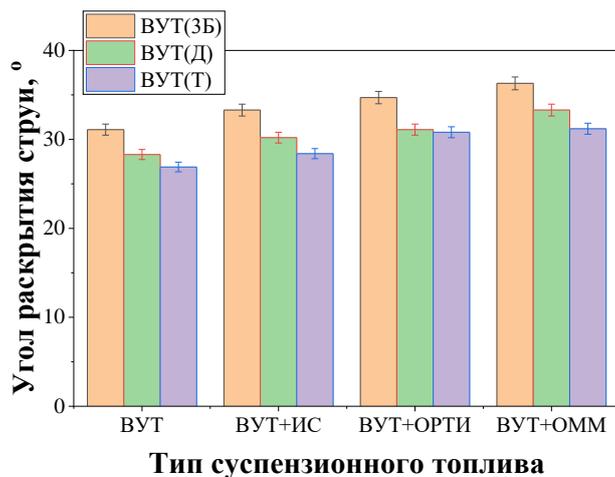
Увеличение массовой концентрации жидкого горючего компонента в составе суспензионного топлива приводит к росту его вязкости. Объясняется это замещением части воды в ВУТ на более вязкое вещество. Установлено, что значение вязкости суспензии оказывает влияние на структуру струи.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что при добавлении одинакового количества изопропилового спирта, жидких отходов переработки РТИ и отработанного моторного масла наименьший угол раскрытия

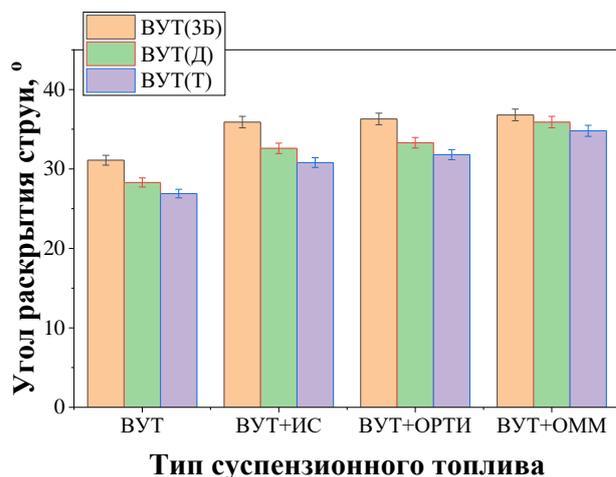
струи будет соответствовать первой добавке, а наибольший – последней, соответственно.



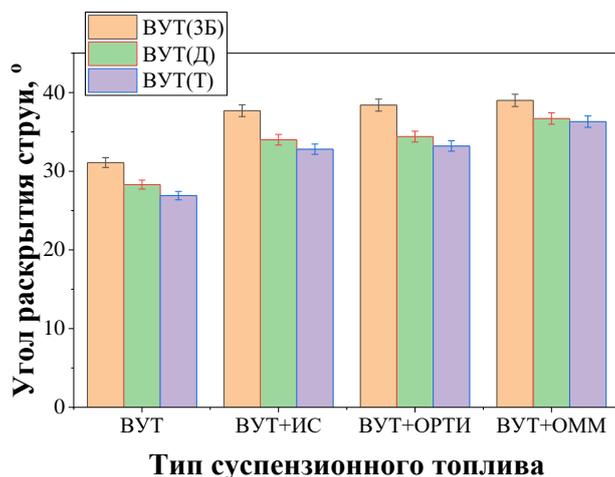
а)



б)



в)



г)

Рисунок 4.35 – Зависимости угла раскрытия струи распыленного суспензионного топлива на основе углей марки ЗБ, Д и Т от типа жидкого горючего компонента и его концентрации: а – 3% жидкого горючего компонента; б – 5% жидкого горючего компонента; в – 8% жидкого горючего компонента; г – 12% жидкого горючего компонента

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. Это объясняется тем, что высокая вязкость суспензии, в сравнении с типичным водоугольным топливом, препятствует деформации капель за счет аэродинамического сопротивления окружающей среды (воздух). 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.

4.4 Выводы по четвертой главе:

1. Установлено, что введение в состав типичного водоугольного топлива изопропилового спирта, жидких отходов переработки РТИ и отработанного моторного масла приводит к снижению средней скорости струи ВУТ на основе исследуемых марок угля (до 13,9%, 13,1% и 14,4%, соответственно). Таким образом, использование жидкой горючей компоненты оказывает положительное влияние на среднюю скорость струи, так как снижение скорости частиц означает увеличение времени их пребывания в камере сгорания, что в свою очередь приведет к снижению недожога и, соответственно, повышению эффективности работы котельного оборудования.
2. Введение в состав типичного водоугольного топлива от 3 до 12 мас.% изопропилового спирта, жидких отходов переработки РТИ и отработанного моторного масла приводит к уменьшению числа мелких частиц (до 300 мкм) после распыления от 1 до 15%.

3. Определено, что введение в состав типичного водоугольного топлива на основе угля марки ЗБ, Д и Т от 3 до 12 мас.% изопропилового спирта, жидких отходов переработки резинотехнических изделий и отработанного моторного масла приводит к росту угла раскрытия струи от 3 до 25%.
4. Полученные зависимости показывают неоднозначное воздействие жидких горючих компонентов на количество капель малого размера при удалении распыленной струи ВУТ на основе углей марки ЗБ, Д и Т от устья форсунки, а также на скорость в ядре струи. Такое поведение характерно для исследований в области вязких топлив, например [127–129]. На поверхности раздела струй со средой возникают вихри, беспорядочно движущиеся вдоль и поперек потока. Между средой и окружающей средой происходит обмен конечными массами газа (молями), чем одновременно осуществляется поперечный перенос количества движения. Моли из прилегающих слоев окружающего газа увлекаются в струю, а моли самой струи затормаживаются, масса струи и ее ширина увеличиваются, а скорость у границ падает. По мере удаления от устья сопла это возмущение распространяется на все большее количество слоев окружающего газа. С другой стороны, все глубже в струю проникают частицы окружающего газа и в некотором месте они достигают оси струи. Дальнейшее смешивание струи с газом из окружающего пространства происходит по всему сечению струи [122].
5. Экспериментально установлено, что применение водоугольного топлива с добавлением небольшого количества исследованных жидких горючих компонентов возможно в котлах локальных котельных, работающих на ВУТ.

ГЛАВА 5. ОБОСНОВАНИЕ ПРЕДЕЛЬНЫХ КОНЦЕНТРАЦИЙ ЖИДКИХ ГОРЮЧИХ ДОБАВОК В СОСТАВЕ ВОДОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА И РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

5.1 Обоснование предельных концентраций жидких горючих добавок в составе водоугольного топлива

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 (таблица 5.1). 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%).

Таблица 5.1 – Увеличение стоимости и низшей теплоты сгорания суспензионного топлива с введением жидкой горючей добавки

Добавка	Доля добавки, мас.%	Увеличение стоимости суспензионного топлива, %	Увеличение низшей теплоты сгорания суспензионного топлива, %
Изопропиловый спирт	3	8,3	8,2
	5	13,0	13,0
	8	19,4	19,3
	12	26,5	26,4

Продолжение таблицы 5.1

Жидкие отходы переработки РТИ	3	-	9,9
	5	-	15,5
	8	-	22,7
	12	-	30,5
Отработанное моторное масло	3	-	10,2
	5	-	15,9
	8	-	23,2
	12	-	31,1

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 (рисунок 5.1) после распыления [130], что, как известно, влечет за собой увеличение времени задержки зажигания топлива [131]. 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.

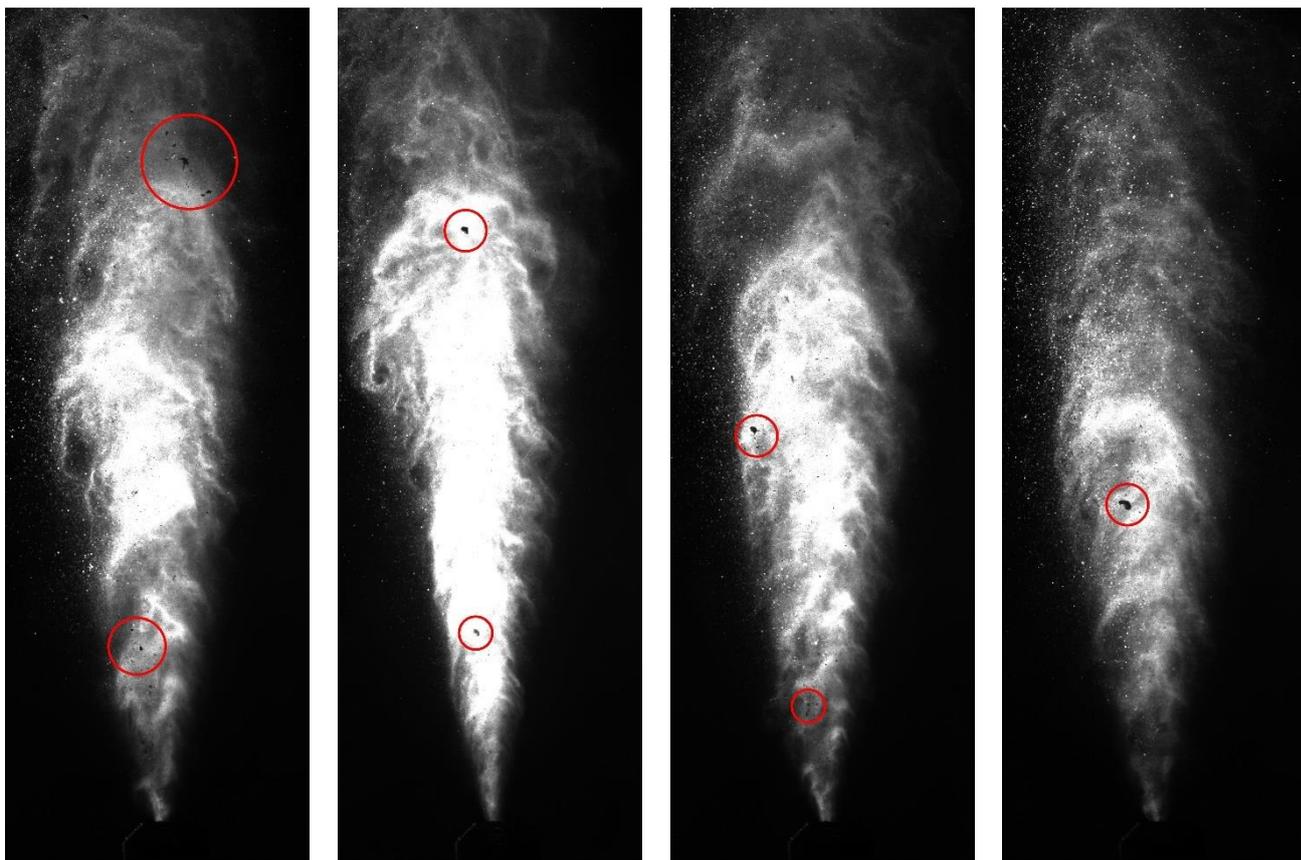


Рисунок 5.1 – Пример агломерации капель суспензионного топлива после распыления

5.2 Рекомендации по использованию результатов исследования

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 [132].

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 исследованных марок углей с добавлением исследованных жидких горючих компонентов и характеристики их распыления могут использоваться при проектировании локальных котельных или при переводе мазутных и угольных котельных на суспензионное топливо.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрены вопросы распыления водоугольных топлив на основе углей марки ЗБ, Д и Т с добавлением жидких горючих компонентов (изопропиловый спирт, жидкие отходы переработки РТИ, отработанное моторное масло) для повышения теплотворной способности по сравнению с типичными водоугольными топливами.

На основании аналитического обзора охарактеризовано состояние области исследований, сформулирована цель и поставлены задачи настоящей работы.

По результатам экспериментов получены зависимости вязкости, плотности, коэффициента поверхностного натяжения, скорости капель, угла раскрытия струи от доли и типа жидких горючих компонентов в составе суспензионного топлива, а также распределение капель по размерам после распыления таких топлив.

Сформулированы следующие 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 исследованных 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.%.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

БОС – блок оптического сжатия;

ВИЭ – возобновляемые источники энергии;

ВУТ – водоугольное топливо;

ИГИ – Институт горючих ископаемых;

ИС – изопропиловый спирт;

РТИ – резинотехнические изделия;

ОВУТ – органо-водоугольное топливо;

ОММ – отработанное моторное масло;

ОРТИ – отходы переработки резинотехнических изделий

ПК – персональный компьютер;

ПО – программное обеспечение;

ТЭС – тепловая электрическая станция;

ТЭЦ – теплоэлектроцентраль;

ЭНИИ – Энергетический Институт имени Кржижановского;

HELE – high-efficiency low emission;

IPI – Interferometric Particle Imaging;

PIV – Particle Image Velocimetry.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ФГБУ «РЭА» Минэнерго России. Теплоэнергетика и централизованное теплоснабжение России в 2014-2018 годах. Информационно-аналитический доклад. Москва, 2020. 110 с.
2. British Petroleum. BP Statistical Review of World Energy. London: BP, 2018. 56 p.
3. Liu, F. Influencing factors of public support for modern coal-fired power plant projects: An empirical study from China / F. Liu, T. Lyu, L. Pan, F. Wang // Energy Policy. – 2017. – V. 105. – P. 398-406.
4. Мариничева, О. Уголь возвращается в генерацию / О. Мариничева // Энергетика и промышленность России. – 2012. – Т. 11, № 199. – С. 1–4.
5. International Energy Agency. World Energy Outlook 2016. Paris: IEA, 2016. 670 p.
6. British Petroleum. BP Statistical Review of World Energy 2019. London: BP, 2019. 64 p.
7. British Petroleum. BP Statistical Review of World Energy 2020. London: BP, 2020. 66 p.
8. Институт энергетических исследований РАН. Прогноз развития энергетики мира и России 2019. Москва, 2019. 211 с.
9. Win, M.M. Characteristics of gas from the fluidized bed gasification of refuse paper and plastic fuel (RPF) and wood biomass / M.M. Win, M. Asari, R. Hayakawa, H. Hosoda, J. Yano, S. Sakai // Waste Management. – 2019. – V. 87. – P. 173-182.
10. Martus, E. Russian industry responses to climate change: the case of the metals and mining sector / E. Martus // Climate Policy. – 2019. – V. 19, № 1. – P. 17–29.
11. Министерство Энергетики Российской Федерации. Долгосрочная программа развития угольной промышленности России на период до 2030 года. Москва, 2014. 86 с.

12. Oberschelp, C. Global emission hotspots of coal power generation / C. Oberschelp, S. Pfister, C.E. Raptis, S. Hellweg // *Nature Sustainability*. – 2019. – V. 2, № 2. – P. 113–121.

13. Dai, S. Coal as a promising source of critical elements: Progress and future prospects / S. Dai, R.B. Finkelman // *International Journal of Coal Geology*. – 2018. – V. 186. – P. 155–164.

14. UNFCCC. Adoption of the Paris Agreement - Conference of the Parties COP 21. Paris, 2015. 32 p.

15. International Energy Agency. Global Energy & CO2 Status Report 2017. Paris: IEA, 2018. 14 p.

16. Franco, A. The future challenges for “clean coal technologies”: Joining efficiency increase and pollutant emission control / A. Franco, A.R. Diaz // *Energy*. – 2009. – V. 34, № 3. – P. 348–354.

17. Sandor, R.L. The Case for Coal / R.L. Sandor. – How I Saw It. New Jersey: World Scientific, 2001. P. 61–65.

18. Larionov, K.B. The influence of nanoxide additives on the characteristics of thermal decomposition of ammonium nitrate / K.B. Larionov, I.V. Mishakov, A.A. Gromov, A.V. Zenkov // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2018. – V. 1128, № 1. – 012065.

19. Larionov, K.B. Research of thermal destruction dynamics of coal particles in oxidizing medium with copper nitrate / K.B. Larionov, I.V. Mishakov, A.A. Gromov // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2018. – V. 1128, № 1. – 012070.

20. Kuznetsov, G. V. Mechanism of sulfur and nitrogen oxides suppression in combustion products of mixed fuels based on coal and wood / G.V. Kuznetsov, S.A. Jankovsky, A.A. Tolokolnikov, A.V. Zenkov // *Combustion Science and Technology*. – 2019. – V. 191, № 11. – P. 2071–2081.

21. Yankovsky, S.A. Applying composite fuels based on coal and finely dispersed wood in heat power engineering / S.A. Yankovsky, G.V. Kuznetsov, A.V. Zenkov // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2018. – V. 1128, № 1. – P. 012064.

22. Долгушин, И.А. Исследование и совершенствование схемы ТЭС с котлом ЦКС для повышения эффективности и улучшения экологических показателей : дис. ... канд. тех. наук : 05.14.14 / Долгушин Илья Александрович. – М., 2014. 166 с.

23. Marchand, D.J. Rheological modifiers for petroleum coke–water slurry / D.J. Marchand, A. Abrams, B.R. Heiser, Y. Kim, J Kim, S.H. Kim // *Fuel Processing Technology*. – 2016. – V. 144. – P. 290–298.

24. Садовский, Д.Ю. Получение композиционного водоугольного топлива с применением глицерина / Д.Ю. Садовский, А.С. Макаров, Д.П. Савицкий, Р.Р. Масляк // *Вопросы химии и химической технологии*. – 2017. – Т. 1, № 110. – С. 59–63.

25. Phasukarratchai, N. Phase behavior and biofuel properties of waste cooking oil-alcohol-diesel blending in microemulsion form / N. Phasukarratchai // *Fuel*. – 2019. – V. 243. – P. 125–132.

26. Vershinina, K.Y. Characteristics of the ignition of the drops of organic coal–water fuels based on waste oils and industrial oils / K.Y. Vershinina, D.O. Glushkov, P.A. Strizhak // *Solid Fuel Chemistry*. – 2017. – V. 51, № 3. – P. 188–194.

27. Бородуля, В.А. Некоторые особенности сжигания в кипящем слое водоугольного топлива из белорусских бурых углей / В.А. Бородуля, Э.К. Бучилко, Л.М. Виноградов // *Теплоэнергетика*. – 2014. – № 7. – С. 36–41.

28. Хронология развития работ по ВУТ в СССР и РФ [Электронный ресурс]. – <https://vodougol.ru>.

29. Khodakov, G.S. Coal-water suspensions in power engineering / G.S. Khodakov // *Thermal Engineering*. – 2007. – V. 54, № 1. – P. 36–47.

30. Саламатин, А.Г. О состоянии и перспективах использования водоугольного топлива в России / А.Г. Саламатин // *Уголь*. – 2000. – Т. 3. – С. 10–15.

31. Долинский, А.А. Водугольное топливо: перспективы использования в теплоэнергетике / А.А. Долинский, А.А. Халатов // Коммунальная и промышленная теплоэнергетика. – 2007. – Т. 29, № 5. – С. 70–79.

32. Kurgankina, M.A. Prospects of thermal power plants switching from traditional fuels to coal-water slurries containing petrochemicals / M.A. Kurgankina, G.S. Nyashina, P.A. Strizhak // Science of The Total Environment. – 2019. – V. 671. – P. 568–577.

33. Baranova, M.P. Nature of stabilization of water-coal fuel suspensions / M.P. Baranova, V.A. Kulagin, V.E. Taraban'ko // Russian Journal of Applied Chemistry. – 2011. – V. 84, № 6. – P. 939–944.

34. Zhang, Y. Study on properties of coal-sludge-slurry prepared by sludge from coal chemical industry / Y. Zhang, Z. Xu, Y. Tu, J. Wang, J. Li // Powder Technology. – 2020. – V. 366. – P. 552–559.

35. Shukla, S.C. Coal–oil–water multiphase fuel: Rheological behavior and prediction of optimum particle size / S.C. Shukla, S. Kukade, S.K. Mandal, G. Kundu // Fuel. – 2008. – V. 87, № 15-16. – P. 3428–3432.

36. Staroń, A. Analysis of the useable properties of coal-water fuel modified with chemical compounds / A. Staroń, Z. Kowalski, P. Staroń, M. Banach // Fuel Processing Technology. – 2016. – V. 152. – P. 183–191.

37. Делягин, Г.Н. Экологически чистое топливо ЭКОВУТ – путь резкого улучшения экологической ситуации в энергетике России / Г.Н. Делягин // Материалы Международной научно-практической конференции «Экология энергетики 2000». – 2000. – С. 320–323.

38. Parres-Esclapez, S. On the importance of the catalyst redox properties in the N₂O decomposition over alumina and ceria supported Rh, Pd and Pt / S. Parres-Esclapez, M.J. Illán-Gómez, C.S.-M. de Lecea, A. Bueno-López // Applied Catalysis B: Environmental. – 2010. – V. 96, № 3-4. – P. 370–378.

39. Няшина, Г.С. Исследование способов снижения влияния тепловых электрических станций на окружающую среду при сжигании суспензионных

ТОПЛИВ ИЗ ОТХОДОВ УГЛЕБОГАЩЕНИЯ И БИОМАССЫ : дис. ... канд. тех. наук : 05.14.14 / Няшина Галина Сергеевна. – М., 2018. – 201 с.

40. Glushkov, D.O. Organic coal-water fuel: Problems and advances (Review) / D.O. Glushkov, P.A. Strizhak, M.Y. Chernetskii // *Thermal Engineering*. – 2016. – V. 63, № 10. – P. 707–717.

41. Dmitrienko, M.A. Technoeconomic Analysis of Prospects of Use of Organic Coal-Water Fuels of Various Component Compositions / M.A. Dmitrienko, P.A. Strizhak, Y.S. Tsygankova // *Chemical and Petroleum Engineering*. – 2017. – V. 53, № 3-4. – P. 195–202.

42. Nyashina, G.S. Energy efficiency and environmental aspects of the combustion of coal-water slurries with and without petrochemicals / G.S. Nyashina, G.V. Kuznetsov, P.A. Strizhak // *Journal of Cleaner Production*. – 2018. – V. 172. – P. 1730–1738.

43. Nyashina, G.S. Effects of plant additives on the concentration of sulfur and nitrogen oxides in the combustion products of coal-water slurries containing petrochemicals / G.S. Nyashina, G.V. Kuznetsov, P.A. Strizhak // *Environmental Pollution*. – 2020. – V. 258. – 113682.

44. Kalam, M. Biodiesel from palmoil – an analysis of its properties and potential / M. Kalam, H. Masjuki // *Biomass and Bioenergy*. – 2002. – V. 23, № 6. – P. 471–479.

45. Karaosmanoğlu, F. Long term CI engine test of sunflower oil / F. Karaosmanoğlu, G. Kurt, T. Özaktaş // *Renewable Energy*. – 2000. – V. 19, № 1-2. – P. 219–221.

46. Zhao, H. Breakup and atomization of a round coal water slurry jet by an annular air jet / H. Zhao, H.-F. Liu, J.-L. Xu, W.-F. Li, W. Cheng // *Chemical Engineering Science*. – 2012. – V. 78. – P. 63–74.

47. Rahimi, S. Wall friction effects and viscosity reduction of gel propellants in conical extrusion / S. Rahimi, D. Durban, S. Khosid // *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*. – 2010. – V. 165, № 13-14. – P. 782–792.

48. Tsai, S.C. Viscometry and rheology of coal water slurry / S.C. Tsai, E.W. Knell // *Fuel*. – 1986. – V. 65, № 4. – P. 566–571.
49. Vitolo, S. Rheology of coal-water mixtures containing petroleum coke / S. Vitolo, R. Belli, M. Mazzanti, G. Quattroni // *Fuel*. – 1996. – V. 75, № 3. – P. 259–261.
50. Ahmed, S.F. Rheology of low-rank coal-water slurries at both high and low shear rates / S.F. Ahmed, A.R. Hasan // *Fuel*. – 1993. – V. 72, № 6. – P. 763–769.
51. Shaheen, E.I. Rheological study of viscosities and pipeline flow of concentrated slurries / E.I. Shaheen // *Powder Technology*. – 1972. – V. 5, № 4. – P. 245–256.
52. Atesok, G. The effect of coal properties on the viscosity of coal–water slurries / G. Atesok, F. Boylu, A.A. Sirkeci, H. Dincer // *Fuel*. – 2002. – V. 81, № 14. – P. 1855–1858.
53. Zhou, M. Evaluation of treated black liquor used as dispersant of concentrated coal–water slurry / M. Zhou, Q. Kong, B. Pan, X. Qiu, D. Yang, H. Lou // *Fuel*. – 2010. – V. 89, № 3. – P. 716–723.
54. Xu, R. Effects of chemical structure on the properties of carboxylate-type copolymer dispersant for coal-water slurry / R. Xu, W. Zhuang, Q. He, J. Cai, B. Hu, J. Shen // *AIChE Journal*. – 2009. – V. 55, № 9. – P. 2461–2467.
55. Liu, J. Rheology and thixotropic properties of slurry fuel prepared using municipal wastewater sludge and coal / J. Liu, R. Wang, F. Gao, J. Zhou, K. Cen // *Chemical Engineering Science*. – 2012. – V. 76. – P. 1–8.
56. Lu, P. Rheology of coal–water paste / P. Lu, M. Zhang // *Powder Technology*. – 2005. – V. 150, № 3. – P. 189–195.
57. Zhang, W. Synthesis of a novel dispersant with topological structure by using humic acid as raw material and its application in coal water slurry preparation / W. Zhang, J. Luo, Y. Huang, C. Zhang, L. Du, J. Guo, J. Wu, X. Zhang, J. Zhu, G. Zhang // *Fuel*. – 2020. – V. 262. – 116576.

58. Qian, C. Influence of dispersants on coal-water slurry prepared from the solid residue of plasma pyrolysis of coal / C. Qian, L. Zhao, X. Ge, X. Chen // Chinese Journal of Chemical Engineering. – 2019. – V. 28, №2. – P. 566-570.

59. Zhou, M. Development and evaluation of polycarboxylic acid hyper-dispersant used to prepare high-concentrated coal–water slurry / M. Zhou, K. Huang, D. Yang, X. Qiu // Powder Technology. – 2012. – V. 229. – P. 185–190.

60. Konduri, M.K.R. Alteration in interfacial properties and stability of coal water slurry by lignosulfonate / M.K.R. Konduri, P. Fatehi // Powder Technology. – 2019. – V. 356. – P. 920–929.

61. Mukherjee, A. Effect of additives on interfacial interactions for viscosity reduction of carbonaceous solid–water slurries / A. Mukherjee, S.V. Pisupati // Fuel. – 2016. – V. 180. – P. 50–58.

62. Li, L. Novel Dispersant with a Three-Dimensional Reticulated Structure for a Coal–Water Slurry / L. Li, L. Zhao, Y. Wang, J. Wu, G. Meng, Z. Liu, J. Zhang, B. Hu, Q. He, X. Guo // Energy&Fuels. – 2018. – V. 32, № 8. – P. 8310–8317.

63. Wang, C. Influence of alkaline additive on viscosity of coal water slurry / Wang, H. Zhao, Z. Dai, W. Li, H. Liu // Fuel. – 2019. – V. 235. – P. 639–646.

64. Das, D. Improving stability of concentrated coal–water slurry using mixture of a natural and synthetic surfactants / D. Das, U. Dash, J. Meher, P.K. Misra // Fuel Processing Technology. – 2013. – V. 113. – P. 41–51.

65. Zhang, K. A novel route to utilize waste engine oil by blending it with water and coal / K. Zhang, Q. Cao, L. Jin, P. Li, X. Zhang // Journal of Hazardous Materials. – 2017. – V. 332. – P. 51–58.

66. Баранова, М.П. Влияние пластифицирующих добавок на реологические характеристики водоугольных суспензий из углей разной степени метаморфизма / М.П. Баранова // Труды КГТУ. – 2006. – Т. 2, № 3. – С. 143–147.

67. Boylu, F. Effect of coal particle size distribution, volume fraction and rank on the rheology of coal–water slurries / F. Boylu, H. Dinçer, G. Ateşok // Fuel Processing Technology. – 2004. – V. 85, № 4. – P. 241–250.

68. Mishra, S.K. Rheological Behavior of Coal-Water Slurry / S.K. Mishra, P.K. Senapati, D. Panda // *Energy Sources*. – 2002. – V. 24, № 2. – P. 159–167.
69. Zhang, J. Multiple Effects of the Second Fluid on Suspension Viscosity / J. Zhang, H. Zhao, W. Li, M. Xu, H. Liu // *Scientific Reports*. – 2015. – V. 5, № 1. – 16058.
70. Chen, X. Preparation of high concentration coal water slurry of lignite based on surface modification using the second fluid and the second particle / X. Chen, C. Wang, Z. Wang, H. Zhao, H. Liu // *Fuel*. – 2019. – V. 242. – P. 788–793.
71. Saito, M. Single droplet combustion of coal-oil/methanol/water mixtures / M. Saito, M. Sadakata, T. Sakai // *Fuel*. – 1983. – V. 62, № 12. – P. 1481–1486.
72. Burgess, A.R. Pre-ignition phenomena and their effects on overall combustion rates of coal slurry droplets / A.R. Burgess, R. Ghaffari // *Symposium (International) on Combustion*. – 1989. – V. 22, № 1. – P. 2009–2017.
73. Adiga, K.C. Coal slurries in mixed liquid fuels: rheology and ignition characteristics / K.C. Adiga, Y.K. Pithapurwala, D.O. Shah, B.M. Moudgil // *Fuel Processing Technology*. – 1988. – V. 18, № 1. – P. 59–69.
74. Zhao, H. Influence of rheological properties on air-blast atomization of coal water slurry / H. Zhao, Y.-B. Hou, H.-F. Liu, X.-S. Tian, J.-L. Xu, W.-F. Li, Y. Liu, F.-Y. Wu, J. Zhang, K.-F. Lin // *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*. – 2014. – V. 211. – P. 1–15.
75. Theofanous, T.G. The physics of aerobreakup. II. Viscous liquids / T.G. Theofanous, V.V. Mitkin, C.L. Ng, C.-H. Chang, X. Deng, S. Sushchikh // *Physics of Fluids*. – 2012. – V. 24, № 2. – 022104.
76. Theofanous, T.G. Aerobreakup of Newtonian and viscoelastic liquids / T.G. Theofanous // *Annual Review of Fluid Mechanics*. – 2011. – V. 43, № 1. – P. 661–690.
77. Li, L.K.B. Viscoelastic air-blast sprays in a cross-flow. Part 2: droplet velocities / L.K.B. Li, S.I. Green, M.H. Davy, D.T. Eadie // *Atomization and Sprays*. – 2010. – Vol. 20, № 8. – P. 721–735.

78. Thompson, J.C. The atomization of viscoelastic fluids in flat-fan and hollow-cone spray nozzles / J.C. Thompson, J.P. Rothstein // *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*. – 2007. – V. 147, № 1-2. – P. 11–22.
79. Walker, L.M. Quantifying air atomization of viscoelastic fluids through fluid relaxation times / L.M. Walker, Y. Christanti // *Atomization and Sprays*. – 2006. – V. 16, № 7. – P. 777–790.
80. Dooher, J.P. Fundamental considerations for coal slurry atomization / J.P. Dooher // *Atomization and Sprays*. – 2005. – V. 15, № 5. – P. 585–602.
81. Daviault, S.G. Atomization performance of petroleum coke and coal water slurries from a twin fluid atomizer / S.G. Daviault, O.B. Ramadan, E.A. Matida, P.M. Hughes, R. Hughes // *Fuel*. – 2012. – V. 98. – P. 183–193.
82. Ejim, C.E. Effects of liquid viscosity and surface tension on atomization in two-phase, gas/liquid fluid coker nozzles / C.E. Ejim, M.A. Rahman, A. Amirfazli, B.A. Fleck // *Fuel*. – 2010. – V. 89, № 8. – P. 1872–1882.
83. Karnawat, J. Controlled atomization using a twin-fluid swirl atomizer / J. Karnawat, A. Kushari // *Experiments in Fluids*. – 2006. – V. 41, № 4. – P. 649–663.
84. Lefebvre, A.H. Airblast atomization / A.H. Lefebvre // *Progress in Energy and Combustion Science*. – 1980. – V. 6, № 3. – P. 233–261.
85. Lal, S. Experimental study of an air assisted mist generator / S. Lal, A. Kushari, M. Gupta, J.C. Kapoor, S. Maji // *Experimental Thermal and Fluid Science*. – 2010. – V. 34, № 8. – P. 1029–1035.
86. Broukal, J. Validation of an effervescent spray model with secondary atomization and its application to modeling of a large-scale furnace / J. Broukal, J. Hájek // *Applied Thermal Engineering*. – 2011. – V. 31, № 13. – P. 2153–2164.
87. Liu, H.-F. Prediction of droplet size distribution in sprays of prefilming airblast atomizers / H.-F. Liu, X. Gong, W.-F. Li, F.-C. Wang, Z.-H. Yu // *Chemical Engineering Science*. – 2006. – V. 61, № 6. – P. 1741–1747.

88. Lasheras, J.C. Liquid jet instability and atomization in a coaxial gas stream / J.C. Lasheras, E.J. Hopfinger // *Annual Review of Fluid Mechanics*. – 2000. – V. 32, № 1. – P. 275–308.

89. Wang, Y. Similarity between the primary and secondary air-assisted liquid jet breakup mechanisms / Y. Wang, K.-S. Im, K. Fezzaa // *Physical Review Letters*. – 2008. – V. 100, № 15. – 154502.

90. Zhao, H. Interaction of two drops in the bag breakup regime by a continuous air jet / H. Zhao, Z. Wu, W. Li, J. Xu, H. Liu // *Fuel*. – 2019. – V. 236. – P. 843–850.

91. Kuznetsov, G.V. Combined techniques of secondary atomization of multi-component droplets / G.V. Kuznetsov, N.E. Shlegel, Ya. Solomatin, P.A. Strizhak // *Chemical Engineering Science*. – 2019. – V. 209. – 115199.

92. Charalampous, G. How do liquid fuel physical properties affect liquid jet development in atomisers? / G. Charalampous, Y. Hardalupas // *Physics of Fluids*. – 2016. – V. 28, № 10. – 102106.

93. Jakobs, T. Gasification of high viscous slurry R&D on atomization and numerical simulation / T. Jakobs, N. Djordjevic, S. Fleck, M. Mancini, R. Weber, T. Kolb // *Applied Energy*. – 2012. – V. 93. – P. 449–456.

94. Risberg, M. Visualizations of gas-assisted atomization of black liquor and syrup/water mixtures at elevated ambient pressures / M. Risberg, M. Marklund // *Atomization and Sprays*. – 2009. – V. 19, № 10. – P. 957–967.

95. Wang, X.F. Influence of ambient air pressure on pressure-swirl atomization / X.F. Wang, A.H. Lefebvre // *Proceedings of the ASME 1987 International Gas Turbine Conference and Exhibition*. – 1987. – V. 3. – V003T06A003.

96. Sovani, S.D. High pressure effervescent atomization: effect of ambient pressure on spray cone angle / S.D. Sovani, E. Chou, P.E. Sojka, J.P. Gore, W.A. Eckerle, J.D. Crofts // *Fuel*. – 2001. – V. 80, № 3. – P. 427–435.

97. Han, H. Effect of water supply pressure on atomization characteristics and dust-reduction efficiency of internal mixing air atomizing nozzle / H. Han, P. Wang, Y. Li, R. Liu, C. Tian // *Advanced Powder Technology*. – 2020. – V. 31, № 1. – P. 252–268.

98. Wang, P. Influence of air supply pressure on atomization characteristics and dust-suppression efficiency of internal-mixing air-assisted atomizing nozzle / P. Wang, K. Zhang, R. Liu // *Powder Technology*. – 2019. – V. 355. – P. 393–407.

99. Suh, H.K. A review on atomization and exhaust emissions of a biodiesel-fueled compression ignition engine / H.K. Suh, C.S. Lee // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2016. – V. 58. – P. 1601–1620.

100. Zeng, W. Atomization and vaporization for flash-boiling multi-hole sprays with alcohol fuels / W. Zeng, M. Xu, G. Zhang, Y. Zhang, D.J. Cleary // *Fuel*. – 2012. – V. 95. – P. 287–297.

101. Agathou, M.S. Electrostatic atomization of hydrocarbon fuels and bio-alcohols for engine applications / M.S. Agathou, D.C. Kyritsis // *Energy Conversion and Management*. – 2012. – V. 60. – P. 10–17.

102. Lujaji, F.C. Spray atomization of bio-oil/ethanol blends with externally mixed nozzles / F.C. Lujaji, A.A. Boateng, M. Schaffer, P.L. Mtui, I.S.N. Mkilaha // *Experimental Thermal and Fluid Science*. – 2016. – V. 71. – P. 146–153.

103. Министерство Энергетики Российской Федерации. Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года. Москва, 2020. 93 с.

104. Ларионов, К.Б. Интенсификация процессов окисления энергетических углей активирующими добавками солей : дис. ... канд. тех. наук : 05.17.07 / Ларионов Кирилл Борисович. – М., 2019. – 151 с.

105. Gvozdyakov, D.V. Ignition of coal-water fuel droplets with addition of isopropyl alcohol / D.V. Gvozdyakov, A.V. Zenkov, G.V. Kuznetsov // *International Journal of Energy Research*. – 2021. – Vol. 45, №2. – P. 1535-1549.

106. Kushari, A. Effect of injector geometry on the performance of an internally mixed liquid atomizer / A. Kushari // *Fuel Processing Technology*. – 2010. – V. 91, № 11. – P. 1650–1654.

107. Garafolo, N.G. Curvature correction applied to droplets subjected to natural convection for particle image velocimetry / N.G. Garafolo, J. Wittmer, S. Pathak // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. – 2020. – V. 597. –

124442.

108. Raffel, M. Particle Image Velocimetry: a practical guide / M. Raffel, C.E. Willert, F. Scarano, C.J. Kähler, S.T. Wereley, J. Kompenhans. – Cham: Springer International Publishing, 2018. – 669 p.

109. Chen, X.-X. Numerical and experimental observations of the flow field inside a selective laser melting (SLM) chamber through computational fluid dynamics (CFD) and particle image velocimetry (PIV) / X.-X. Chen, S.-J. Tzeng, W.-C. Wang // Powder Technology. – 2020. – V. 362. – P. 450–461.

110. Бильский, А.В. Интерферометрический метод измерения диаметров частиц (ИП) / А.В. Бильский, Ю.А. Ложкин, Д.М. Маркович // Теплофизика и аэромеханика. – 2013. – Т.18, №1. – С. 1-13.

111. Brunel, M. Design of ILIDS configurations for droplet characterization / M. Brunel, H. Shen // Particuology. – 2013. – V. 11, № 2. – P. 148–157.

112. Lin, Z. Development of three configurations of dual-beam interferometric particle imaging for opaque metal droplet size measurement / Z. Lin, Y. Wu, X. Wu, L. Chen, K. Cen // Optics and Lasers in Engineering. – 2020. – V. 129. – 106069.

113. Mansour, A. Air-blast atomization of non-Newtonian liquids / A. Mansour, N. Chigier // Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics. – 1995. – V. 58, № 2-3. – P. 161–194.

114. Anufriev, I.S. Study of liquid hydrocarbons atomization by supersonic air or steam jet / I.S. Anufriev, E.Yu. Shadrin, E.P. Kopyev, S.V. Alekseenko, O.V. Sharypov // Applied Thermal Engineering. – 2019. – V. 163. – P. 114400.

115. Khashehchi, M. Accuracy of tomographic particle image velocimetry data on a turbulent round jet / M. Khashehchi, Z. Harun // International Journal of Heat and Fluid Flow. – 2019. – V. 77. – P. 61–72.

116. Alekseenko, S. V. Experimental study of an impinging jet with different swirl rates / S.V. Alekseenko, A.V. Bilsky, V.M. Dulin, D.M. Markovich // International Journal of Heat and Fluid Flow. – 2007. – V. 28, № 6. – P. 1340–1359.

117. König, G. A new light-scattering technique to measure the diameter of

periodically generated moving droplets / G. König, K. Anders, A. Frohn // *Journal of Aerosol Science*. – 1986. – V. 17, № 2. – P. 157–167.

118. Qieni, L. High-accuracy particle sizing by interferometric particle imaging / L. Qieni, J. Wenhua, L. Tong, W. Xiang, Z. Yimo // *Optics Communications*. – 2014. – V. 312. – P. 312–318.

119. Шенк, Х. Теория инженерного эксперимента / Х. Шенк. – Москва: Мир, 1972. – 381 с.

120. Зайдель, А.Н. Элементарные оценки ошибок измерений / А.Н. Зайдель. – Ленинград: Наука, 1968. – 96 с.

121. Зенков, А.В. Влияние жидких горючих компонент на вязкость водоугольного топлива / А.В. Зенков, Д.В. Гвоздяков, В.Е. Губин // *Вестник ЮУрГУ. Серия: Энергетика*. – 2020. – Т. 20, №3. – С. 26–32.

122. Хзмалян, Д.М. Теория горения и топочные устройства / Д.М. Хзмалян, Я.А. Каган. – Москва: Энергия, 1976. – 488 с.

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

124. Gvozdyakov, D.V. Effect of isopropyl alcohol concentration on the size and number of droplets after coal-water fuel spraying / D.V. Gvozdyakov, A.V. Zenkov // *Journal of Energy Engineering*. – 2021. – Vol. 147, №3. – 05021001.

125. Гвоздяков, Д.В. Характеристики процесса распыления водоугольных топлив с добавками жидких отходов переработки резинотехнических изделий / Д.В. Гвоздяков, В.Е. Губин, А.В. Зенков // *Химическое и нефтегазовое машиностроение*. – 2021. – №2. – С. 37-40.

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

127. Kannaiyan, K. Experimental investigation of spray characteristics of alternative aviation fuels / K. Kannaiyan, R. Sadr // *Energy Conversion and Management*. – 2014. – Vol. 88. – P. 1060–1069.

128. Zheng, J. Characteristics of particle size and velocity of droplets of coal water slurry subjected to air-blast electrostatic atomization using a phase Doppler particle analyzer / J. Zheng, Y. Xu, Q. Wang, H. He // *Journal of Electrostatics*. – 2019. – V. 98, № 2. – P. 40–48.

129. Zhou, G. Properties effect of blending fischer-tropsch aviation fuel on spray performances / G. Zhou, J. Zhou, Y. Fang, X. Yang // *Energy*. – 2019. – V. 179. – P. 1082–1093.

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

131. Kuznetsov, G.V. Justification of the possibility of car tires recycling as part of coal-water composites / G.V. Kuznetsov, S.V. Syrodoy, M.V. Purin, A.V. Zenkov, D.V. Gvozdyakov, K.B. Larionov // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. – 2021. – Vol. 9, №1. – 104741.

132. Mohammadi, M. Performance analysis of waste-to-energy technologies for sustainable energy generation in integrated supply chains / M. Mohammadi, I. Harjunkoski // *Computers & Chemical Engineering*. – 2020. – V. 140. – 106905.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Патент на изобретение.

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2731605

ТОПЛИВНАЯ СУСПЕНЗИЯ

Патентообладатель: *федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (RU)*

Авторы: *Гвоздяков Дмитрий Васильевич (RU), Губин Владимир Евгеньевич (RU), Зенков Андрей Викторович (RU)*

Заявка № 2020105697

Приоритет изобретения 06 февраля 2020 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 04 сентября 2020 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 06 февраля 2040 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев Г.П. Ивлиев



ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Акт о внедрении.

**Общество с ограниченной ответственностью
«НПО Инноватех»**

ИНН 7801640245, КПП 780101001, ОГРН 1147847350628 ОКПО 91961739
199178, Россия, Санкт-Петербург, В.О. наб. р. Смоленки, 5-7, лит. А
тел./факс: +7 (812) 363-17-57/+7 (812) 363-17-95, <http://http://innovtch.ru>, e-mail: info@innovtch.ru

«УТВЕРЖДАЮ»

Генеральный директор ООО "НПО Инноватех"

Шинько В.С.

«15» марта 2021 г.

АКТ

**о внедрении результатов диссертационной работы
Зенкова Андрея Викторовича на тему
«Свойства водоугольных топлив с добавлением жидких горючих компонентов и
характеристики их распыления для котлов промышленной теплоэнергетики»**

Комиссия ООО "НПО Инноватех" рассмотрела вопрос об использовании результатов диссертационной работы Зенкова Андрея Викторовича и решила следующее:

Установленные по результатам экспериментальных исследований, в рамках диссертационной работы на тему «Свойства водоугольных топлив с добавлением жидких горючих компонентов и характеристики их распыления для котлов промышленной теплоэнергетики» свойства жидких горючих отходов, образующихся в процессе термической переработки (утилизации) резинотехнических изделий (автомобильных шин) используются 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.

Председатель комиссии,
главный инженер ООО "НПО Инноватех" Градов А.С.

Генеральный директор
ООО «НПО Инноватех»



Шинько В.С.