

Некоммерческое акционерное общество
«АЛМАТИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ЭНЕРГЕТИКИ И СВЯЗИ»

Кафедра Промышленной теплоэнергетика
Специальность 6М071700 - Теплоэнергетика

Допущен к защите
Зав. кафедрой

Мусабеков Р.А.
« » 2015 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ
пояснительная записка

Тема Улучшение процессов горения водо-
топливной эмульсии в котельных установках

Магистрант Сыранов Сыранов Н.К.
подпись (Ф.И.О.)

Руководитель диссертации Мусабеков Р.А.
подпись (Ф.И.О.)

Рецензент Мырзахметов Б.А.
подпись (Ф.И.О.)

Алматы, 2015 г.

Некоммерческое акционерное общество
«АЛМАТИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ЭНЕРГЕТИКИ И СВЯЗИ»

Факультет Теплоэнергетика
Специальность 6М071700 - Теплоэнергетика
Кафедра Промышленная теплоэнергетика

ЗАДАНИЕ

на выполнение магистерской диссертации

Магистранту Сыранову Исатигер Канатұлы
(фамилия, имя, отчество)

Тема диссертации Улучшение процесса горения
водо-топливной эмульсии в котельных установках
утверждена Ученым советом университета № 89 от «31» 10.2013г.

Срок сдачи законченной диссертации « »

Цель исследования Исследование процессов смещения
воды и жидкого топлива и структуры водо-топлив-
ной эмульсии. Влияние состава водо-топливной
эмульсии на процесс горения в котельной установке.
Влияние состава водо-топливной эмульсии
на выбросы и на параметры уходящих газов.

Перечень подлежащих разработке в магистерской диссертации вопросов или краткое содержание магистерской диссертации:

Обзор и анализ способов улучшения сжигания
водо-топливных эмульсий. Исследование влияния свойств
водо-топливной эмульсии на процесс горения. Разработка
роторного аппарата для сжигания водо-топливных
эмульсий и экспериментальные исследования.
Основные выводы

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)

Рисунок 1 - Роторный аппарат
Рисунок 2 - Технологическая схема подклю-
чения роторного аппарата к котельной установке
Рисунок 3 - Микрофотография исходного мазута
и после его обработки

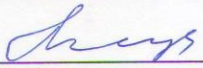
Рекомендуемая основная литература

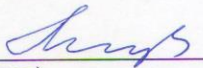
1. Балабудкин М.А. Роторно-пульсационные аппараты в химико-фармацевтической промышленности. - М. Химия, 1983. 160с.
2. Балабудкин А.М., Юзев В.Ф. Роторные аппараты с модуляцией потока и их применение в промышленности. М.: Недра. 1997. 126с.
3. Иванов В.М. Горючие эмульсии и суспензии. Металлургия, 1963. - 185с.

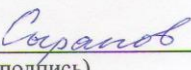
ГРАФИК
подготовки магистерской диссертации

Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю	Примечание
1 Обзор и анализ структуры жидкого энергетического топлива	31.12.2013	
2 Влияние состава и структуры водотопливной эмульсии на процессы горения	30.04.2014	
3 Разработка роторного аппарата для сжигания водотопливных эмульсий	30.09.2014	
4 Анализ уходящих газов и выбросов при сжигании водотопливной эмульсии.	30.02.2015	

Дата выдачи задания 31.10.2013 г.

Заведующий кафедрой  (подпись) (Мусаев Р.А.) (Ф.И.О.)

Руководитель диссертации  (подпись) (Мусаев Р.А.) (Ф.И.О.)

Задание принял к исполнению магистрант  (подпись) (Сыранов М.К.) (Ф.И.О.)

Аннотация

В данной магистерской диссертации рассматривается улучшение процесса горения водо-топливной эмульсии. Было внедрено некоторые изменения в конструкцию роторного аппарата по подготовке водо-топливных эмульсии, с целью повышения производительности. Основной целью в данной работе является – повышения интенсификаций горения жидких топлив и снижение концентрации вредных выбросов.

В работе были рассчитаны эффективные параметры роторного аппарата, а также показана полная технологическая схема подключения к котельной установке.

Аңдатпа

Бұл, магистерлік диссертацияда сулы-отынды эмульсияны жағу үрдісінің әсерлілігін жоғарлату туралы қарастырылған. Сулы-отынды эмульсия дайындаушы роторлы аппараттың өндірулігін арттыру мақсатында, оның құрылысына кейбір өзгертулер енгізілген. Жұмыстың басты мақсаты: сұйық отынның жану интенсификациясын жоғарлату және зиянды заттардың үлесін сейірту, болып табылады.

Жұмыс барысында роторлы аппараттың әсерлі өлшемдері есептелген, сонымен қатар қазандық қондырғыға қосудың толық сұлбасы көрсетілген.

Annotation

this master's thesis examines the improvement of the combustion process of the fuel-water emulsion. in order to increase productivity some changes were made in the design of the rotor machine that prepares water-fuel emulsions. The main objective of this paper is - increasing intensification of burning liquid fuels and reducing the concentration of harmful emissions.

In this work the effective parameters of the rotary device were calculated and it shows the complete flowsheet connection to boiler system.

Содержание

1 Введение	6
2 Обзор и анализ способов улучшения сжигания водо-топливных эмульсий	8
2.1 Состав энергетического жидкого топлива и пути обводнения	8
2.2 Краткая история развития использования водо-топливной эмульсии	11
2.3 Приготовление водо-топливных эмульсий и их характеристики	13
3 Исследование влияния свойств водо-топливных эмульсий на процессы горения	20
3.1 Подготовка водо-топливных эмульсий к сжиганию	20
3.2 Технологические схемы подготовки водо-топливных эмульсий	20
3.3 Влияние дисперсного состава водо-топливной эмульсии на процессы горения факела	28
3.4 Реологические свойства водо-топливных эмульсий	35
3.5 Влияние воды, диспергированной в жидком топливе, на процессы горения и образования вредных веществ	52
3.6 Выгорание факела водо-топливных эмульсий	53
4 Разработка роторного аппарата для сжигания водо-топливных эмульсий и экспериментальные исследования	55
4.1 Теплотехнические характеристики водо-топливных эмульсий	55
4.2 Роторные аппараты для приготовления эмульсий	68
4.3 Расчеты роторного аппарата с учетом акустической импульсной кавитации	70
4.4 Результаты работ по внедрению технологии подготовки и сжигания ВМЭ	78
5 Основные выводы	80
Список использованной литературы	83

Введение

Сжигание жидких углеводородных топлив обеспечивает в настоящее время получение преобладающей части энергии, потребляемой на земном шаре. По своим технико-экономическим и экологическим преимуществам жидкое топливо уступает только газу и в настоящее время широко используется в стационарной промышленной и транспортной энергетике. Это делает обоснованным поиск решений, направленных на совершенствование процессов сжигания этих топлив в топочных устройствах и различных камерах сгорания. В процессе поиска таких решений особое внимание должно уделяться экологическим аспектам сжигания жидкого топлива.

Основным источником получения жидкого топлива является нефть. Ценность нефти заключается не только в использовании ее для получения светлых продуктов и топлива, но и в использовании ее в качестве сырья для производства других химических продуктов и материалов. В связи с этим углубилась переработка нефти, и расширилось ее использование в нефтехимической, химической, микробиологической и других отраслях промышленности и наметилась тенденция замены маловязких видов жидкого топлива на более вязкие и «тяжелые» остаточные продукты нефтеперегонки - мазуты. Ухудшения свойств жидких энергетических топлив следует ожидать и в связи с ожидаемым освоением нетрадиционных источников углеводородного сырья - тяжелых высоковязких нефтей и природных битумов с ухудшенными физико-химическими свойствами.

Эффективность использования жидких энергетических топлив во многом определяется соответствием их характеристик требованиям потребителей. Однако, сравнение свойств и характеристик топочных мазутов и других видов жидких энергетических топлив, показывает, что переход энергетики на сжигание мазутов марки М-200 и других более вязких тяжелых топлив вызовет дополнительные трудности, имеющие место при транспортировании, сливе, хранении и подготовке к сжиганию, а также различные нарушения процессов горения.

Среди причин, вызывающих эти дополнительные трудности и связанных с изменением состава топлива, особое место занимает повышенное содержание в составе мазута асфальтосмолистых веществ и воды, содержание которой может превышать 10%, а у высоковязких топлив достигать 20%.

В этой связи разработка простых, надежных и экономичных методов подготовки и сжигания высокообводненных и высоковязких топлив является актуальной и вызвана не только усложнением эксплуатации мазутных хозяйств или необходимостью реконструкции и замены большей части технологического оборудования мазутных хозяйств, но и, в большей мере,

возможными нарушениями режимов горения топлива. Присутствие значительного количества воды в топливе приводит к образованию водяных пробок, которые, поступая к форсункам, прерывают равномерную подачу топлива, вызывают охлаждение топочного пространства и даже срыв факела с прекращением процессов горения. Повышенная вязкость и неоднородность состава тяжелых мазутов является причиной ухудшения дисперсности распыла топлива и соответствующего увеличения потерь от неполноты его сгорания. Сжигание же обводненных топлив, наряду со снижением экономической эффективности топочных устройств, вызванным нарушениями режимов горения топлива, сопровождается выбросами недогоревшего топлива в виде токсичного оксида углерода (CO), сажистых частиц и канцерогенных полициклических ароматических углеводородов (ПАУ), поступающих с продуктами сгорания в атмосферу. Процессы горения практически всех видов топлива, в том числе и жидких любого качества, связаны с образованием оксидов азота (NO , O_2), а при наличии в составе топлива соединений серы и с образованием оксидов серы (SO_2 , SO_3) также поступающих в атмосферу.

Наиболее простым и самым распространенным методом удаления присутствующей в топливе воды является отстаивание. Однако плотность высоковязких тяжелых мазутов, близкая и даже превышающая плотность воды, не обеспечивает ее полного удаления. Применение в мазутных хозяйствах других методов обезвоживания, например, выпариванием, электрообезвоживанием, центрифугованием, сдерживается отсутствием специального промышленного оборудования и значительными капиталовложениями на достаточно сложные и дорогостоящие сооружения. Необходимость применения очистных сооружений вызвана тем, что выделенная из жидких топлив вода, из включения «загрязняющего» топливо, сама становится загрязненной нефтепродуктами и без очистки до ЦЦК не должна сбрасываться в канализацию или водоемы.

2 Обзор и анализ способов улучшения сжигания водо-топливных эмульсии

2.1 Состав энергетического жидкого топлива и пути обводнения

Являясь продуктами прямой перегонки нефти или высокотемпературной переработки ее промежуточных фракций, жидкое энергетическое топливо по своему составу зависит, в основном, от состава исходной нефти и глубины ее переработки. Несмотря на ограниченность основных элементов нефти, мазут представляет собой сложную по химическому составу смесь высокомолекулярных, гетероциклических и металлоорганических соединений, молекулярная масса которых изменяется от 300 до 3000. В процессе добычи, транспортировки и переработки нефти в ее состав попадают твердые минеральные примеси, содержание которых увеличивается в тяжелых фракциях нефти и мазута. Вместе с твердыми минеральными примесями в мазут переходят и соли щелочных металлов, растворенные в воде, извлеченной из пластов вместе с нефтью. При транспортировке и хранении в состав мазута добавляются также продукты коррозии трубопроводов, резервуаров и оборудования.

Из многообразных соединений, присутствующих в мазуте, в первую очередь необходимо выделить основной компонент - углеводородные соединения, преобладающую часть которых составляют ароматические нафтеновые соединения и полициклические углеводороды. Для рассматриваемой проблемы особо важное значение имеют асфальтосмолистые вещества и металлоорганические соединения. Содержащиеся в нефти асфальтосмолистые вещества, отличающиеся особо сложной структурой и химическим составом, включающим значительную долю гетероатомов, в зависимости от процесса переработки нефти, переходят в мазут в первоначальном виде или трансформируются в процессе термokatалитического крекинга в асфальтены, карбены и карбоиды.

В мазуте асфальтены, являющиеся продуктами окисления нейтральных смол, находятся в коллоидном состоянии в виде структур, центры которых составляют полициклические системы с большим соотношением С/Н, по периферии окруженные полициклическими ароматическими углеводородами с уменьшающимся соотношением С/Н. Асфальтены, как и другие асфальтосмолистые вещества, являются естественными поверхностно активными соединениями, склонными к коагуляции и оказывающими существенное влияние на вязкость мазута. Дальнейшее уплотнение асфальтенов и их конденсация при крекинге нефти приводит к образованию карбенов и карбоидов, находящихся в мазуте в твердом виде. От всех асфальтосмолистых соединений карбоиды отличаются тем, что не растворяются ни в каких растворителях [2] и в связи с этим их обычно называют коксом.

Преобладающая в мазуте часть асфальтосмолистых веществ находится в коллоидно-дисперсном или грубодисперсном состоянии. Основной грубодисперсной части асфальтосмолистых веществ являются карбены и карбоиды, увеличивающие нестабильность мазутов вследствие склонности этих соединений к коагуляции и осаждению при отстаивании. Более устойчивыми являются асфальтосмолистые вещества в коллоидно-дисперсном состоянии. Полициклические системы ядер этих веществ, абсорбируя нейтральные смолы и высокомолекулярные полициклические углеводороды создают вокруг коллоидных частиц защитные структурно-механические оболочки, препятствующие их коагуляции. При нагреве коллоидно-дисперсных частиц или воздействии на них органических растворителей, препятствующие коагуляции оболочки разрушаются и дисперсные частицы агломерируясь выпадают в осадок. Как и асфальтосмолистые вещества, металлоорганические соединения проявляют себя естественными поверхностно-активными веществами и входят в состав молекул асфальтенов или ассоциированы с ними.

Основную часть мазута представляет смесь высокомолекулярных веществ, входящих в структуры, обусловленные различными видами межмолекулярного взаимодействия элементов дисперсионной среды (углеводородов и сернистых соединений). Разнообразные соединения, входящие в состав мазута, формируют его структуру как многофазную дисперсную систему, состоящую из структурных комплексов, также обусловленных межмолекулярными взаимодействиями. Естественные поверхностно-активные вещества (асфальтосмолистые и металлоорганические соединения) при переработке нефти концентрируются в мазуте в количестве, достаточном для образования относительно неустойчивых групп - ассоциатов (димеров, тримеров и т.п.) или мицелл, в которых молекулы связаны ван-дер-ваальсовыми и диполь-дипольными силами взаимодействия, и их сосуществования с неассоциированными молекулами. Размеры ассоциатов, которые могут содержать до 20 молекул поверхностно-активных веществ, позволяет их классифицировать как коллоидные частицы. Образование ассоциатов и мицелл возможно в определенном интервале температур и при увеличении температуры выше верхнего предела возможно расслоение дисперсной системы мазута на макрофазы. Таким образом, доля ассоциированных молекул в мазуте зависит от концентрации поверхностно-активных веществ, температуры и других факторов.

Нестабильности дисперсной системы мазута в нагретом состоянии способствует увеличение разности плотностей твердых коксовых частиц, например, плотность карбоидов может достигать $1,5 \text{ г/см}^3$, у минеральных примесей плотность изменяется от $2,5$ до $6,5 \text{ г/см}^3$, жидких компонентов дисперсионной среды. Снижение вязкости мазута только способствует увеличению скорости осаждения грубодисперсных частиц, которых не способно поддерживать во взвешенном состоянии даже

тепловое (броуновское) движение молекул дисперсионной среды. Недостаточно эффективная стабилизация дисперсных частиц поверхностно активными веществами приводит к коагуляции и образованию агломератов, выпадающих в осадок. Одновременно с этим, присутствующие в мазуте газовые пузырьки и, образующиеся из остатков легкокипящих фракций нефти и включений воды паровые пузырьки, всплывают (седиментируют) вверх и при достаточном нагреве могут образовать слой пены, вносящей дополнительные трудности в работу топливного хозяйства.

Таким образом структура, состав дисперсной фазы и реологические свойства мазута оказывают существенное влияние на его транспортирование, хранение и сжигание, вызывая целый ряд негативных эффектов и процессов возрастающих с увеличением производства высоковязких мазутов и крекинг-остатков и использованием структурированных дисперсных систем альтернативных топлив и топливных композиций, включая продукты энергохимической переработки твердого топлива (искусственное жидкое топливо) и различные жидкие горючие отходы [13].

Несмотря на обводнение нефти извлеченной вместе с ней из пластов водой, нефтеперерабатывающая промышленность, как правило, отправляет потребителям мазуты, содержание воды в которых соответствует стандарту и изменяется в пределах от 0,3 до 1,5%. При дальнейших операциях с мазутом, практически во всех случаях, наблюдается тенденция их обводнения до влажности 3-5%, а при разогреве острым паром и до 30% [14]. Вода в мазуте может как частично отстаиваться или распределяться в виде линз, прослоек и т.п., так и присутствовать в виде глобул (капелек) с размерами от единиц до сотен микрометров, стабилизированных поверхностно-активными компонентами топлива. В последнем (дисперсном) состоянии свойства воды, в результате ее взаимодействия с гидрофобной (нерастворимой в воде) поверхностью частиц мазута, отличаются от свойств объемной воды. Так, было установлено [5], что в макроскопических объемах воды, ограниченных гидрофобными стенками, диполи воды ориентируются параллельно поверхности. В результате происходит снижение плотности воды вблизи стенок и повышается подвижность молекул в тангенциальном направлении. Это явление было интерпретировано как снижение вязкости граничных слоев или как скольжение воды по гидрофобной подложке.

Б.В. Дерягиным [5] была выдвинута концепция, согласно которой между поверхностями, перекрывающими граничные слои жидкой среды, возникают силы взаимодействия, получившие наименование структурных сил. При перекрытии граничных слоев воды с измененной структурой в достаточно тонких гидрофобных прослойках возникают силы структурного притяжения, вызывающие изменение расклинивающего давления в прослойке. Вместе с капельками воды, дисперсную фазу в мазуте образуют парафиновые углеводороды, плавящиеся при достаточно высокой

температуре, карбены и карбоиды, твердые минеральные частицы и газовые пузырьки, представляющие собой ядра, окруженные абсорбционно-сольватной прослойкой молекул дисперсионной среды и поверхностно-активных веществ, ориентированных по отношению к дисперсной частице. Толщина абсорбционно-сольватной прослойки, образующей структурно-механический барьер вокруг частицы, может в десятки раз превышать ее размеры. Межмолекулярные силы взаимодействия в виде электростатических сил отталкивания, создающих положительное раскливающее давление между соединениями, входящими в состав мазута, создают структуру, препятствующую агрегированию и седиментации частиц дисперсной фазы.

Из двух жидких компонентов - топлива и воды - теоретически можно образовать как эмульсию топлива в воде, так и воды в топливе. Эксплуатация топливных (мазутных) хозяйств практически подтвердила эту возможность. Так, разогрев мазута острым паром при его сливе из железнодорожных цистерн приводит к образованию эмульсий воды в топливе, а при сливе отстоявшейся воды из мазутных резервуаров образуется разбавленная эмульсия топлива в воде.

Процессы диспергирования воды в топливе, называемые эмульгированием, можно разделить на два типа в зависимости от присутствия воды в топливе до эмульгирования. В обводненных жидких топливах, особенно в высоковязких мазутах, вода распределена крайне неравномерно и эмульгирование заключается в превращении водо-топливной смеси в систему с тонко диспергированной водой, равномерно распределенной по всему объему топлива. В некоторых случаях (термическое обезвреживание загрязненных сточных вод, улучшение процесса сжигания жидкого топлива, подавление синтезавредных и токсичных веществ в факеле жидкого топлива и др.) вода специально вводится в «безводное» топливо. Эмульгирование в этом случае включает постепенный ввод раздробленной воды в топливо. В системах приготовления водотопливных эмульсий (ВТЭ) часто встречается сочетание этих типов эмульгирования, когда воду в грубодисперсном состоянии вводят в безводное топливо и затем эту смесь подвергают эмульгированию. В общем случае возможна подготовка грубодисперсной водотопливной смеси путем как введения воды в топливо, так и введения топлива в воду или одновременным вводом компонентов в установку для приготовления эмульсий. Однако предпочтение следует отдавать введению дисперсной фазы в дисперсионную среду, т.е. введению воды в топливо [7].

2.2 Краткое история развития использования водо-топливной эмульсии

Впервые принципиальная возможность сжигания обводненного жидкого топлива в топочных камерах котельных агрегатов была установлена во Всесоюзном теплотехническом институте в 30-40-х годах [7].

Обводненный до влажности 18-20% мазут эмульгировался в центробежном насосе и полученная водомазутная эмульсия достаточно устойчиво сжигалась в топочной камере энергетического котла. При этом было установлено, что в исследованных пределах изменения влажности водомазутной эмульсии не происходит резкого снижения технико-экономических показателей процессов горения. Отмечалось снижение примерно на 50°C теоретической температуры горения и на 1-2% КПД котла.

Примерно до середины 50-х годов развитие исследований по сжиганию обводненных топлив и водотопливных эмульсий было практически приостановлено на достигнутом перед Второй мировой войной уровне, общие итоги которого были приведены в работе В.Ф.Кустова [26] в 1942г.

В 1955г. в Институте горючих ископаемых АН СССР, В.М.Ивановым с сотрудниками был развернут цикл работ по сжиганию водотопливных эмульсий. Опубликованные ими в конце 50-х годов работы и вышедшая в 1962г. монография В.М.Иванова «Топливные эмульсии» [24] были признаны приоритетными всеми исследователями и послужили началом для более глубокого изучения свойств и особенностей горения водотопливных эмульсий и широкого их внедрения в практику сжигания обводненных жидких топлив.

Практически одновременно с Институтом горючих ископаемых, в Ленинградском институте инженеров водного транспорта (ЛИИВТ) проводились работы по сжиганию обводненных мазутов в судовых котлах. Результаты этих исследований были обобщены в монографии И.А.Тува [11], изданной в 1968г.

Несмотря на обширный материал, представленный в работах В.М.Иванова и И.А.Тува [15] в них не удалось детально рассмотреть и осветить ряд важных вопросов, связанных с процессами горения водотопливных эмульсий. В целом подход к сжиганию высокообводненных топлив базировался на использовании различного рода высокообводненных топливных остатков. Естественно, что при таком подходе специальный ввод воды в топливо рассматривался как ввод балласта, вызывающего перерасход топлива на испарение воды и связанного с этим снижение КПД топочных устройств. Поэтому использование водотопливных эмульсий и развитие работ связанных с ними было ограниченным [22].

Анализ динамики изменения количества исследований и публикаций в отечественной и иностранной научно-технической литературе и журналах по вопросам теории и практики сжигания водо-топливных эмульсий показал, что работы по сжиганию водо-топливных эмульсий с целью защиты окружающей среды начались практически одновременно в промышленно развитых зарубежных странах и в СССР, где в Ленинградском инженерно-строительном

институте (ЛИСИ) исследовались аспекты сжигания водотопливных эмульсий в промышленно отопительных котельных установках и утилизации высокообводненных горючих отходов нефтехимических производств. В Азербайджанском НИИ энергетики (АзНИИЭ) и несколько позднее в Саратовском политехническом институте исследовалось сжигание водомазутных эмульсий в топочных камерах энергетических котлоагрегатов. Центральный научно-исследовательский институт Морского флота (ЦНИИМорфлота) и Новосибирский институт инженеров водного транспорта (НИИВТ), сосредоточили усилия на вопросах приготовления и сжигания эмульсий воды и тяжелых топлив на судах морского и речного флота. Особенности и условиями подавления синтеза вредных и токсичных веществ в топочных камерах энергетических парогенераторов при сжигании водомазутных эмульсий занимается Московский энергетический институт (МЭИ). Не остались в стороне от решения этих проблем ИГИ и ЛИИВТ.

Достижения ЛИИВТ и НИИВТ в области использования водотопливных эмульсий в судовых дизельных двигателях приведены в коллективной монографии [13]. А особенности утилизации нефтяных остатков в виде водотопливной эмульсии на морских судах рассмотрены в монографии [12].

Отдельные вопросы использования водотопливных эмульсий в металлургическом и машиностроительном производстве, в сельскохозяйственной сушильной и автотракторной технике и в других отраслях промышленности рассматривались рядом других организаций [9, 17, 18, 21 и др.].

Учитывая многообразие вопросов рассмотренных в приведенных выше монографиях и многочисленных публикациях их анализ целесообразно произвести по разделам.

2.3 Приготовление водотопливных эмульсий и их характеристики

Рассматривая водотопливные эмульсии как частный вид эмульсий, следует отметить, что их специфические свойства определяются свойствами составляющих системы жидкость - жидкость.

Основные технологические характеристики и свойства наиболее распространенных жидких энергетических топлив известны достаточно широко [13, 15, и др.]. Некоторые сведения об искусственном жидком топливе, получаемом энергохимической переработкой угля и горючих сланцев, приведены в работе [13]. Горючие жидкие отходы нефтехимических [12], химических и других производств, а также топливных хозяйств тепловых электрических станций и котельных характеризуются повышенной вязкостью, наличием крупных и абразивных частиц дисперсной фазы, склонной к образованию осадков и рядом других отклонений от стандартных топлив, препятствующих использованию этих топлив вместо мазута без специальной обработки. Такая обработка необходима и для искусственных

жидких топлив, у которых стабильность также нарушается выделением дисперсной фазы [5]. Особое место среди жидких топлив занимает битум, поставка которого изначально осуществляется в виде водно-битумной эмульсии [15].

С позиции рассматриваемой проблемы сжигания обводненных жидких топлив, особое место в их составе и структуре безусловно занимает вода, которая, являясь в природе самым распространенным и изученным химическим соединением, обладает рядом аномальных свойств [4, 9].

Основным источником обводнения жидких топлив является разогрев цистерн, танков и других транспортных емкостей открытым (острым) паром [28], т.к. недослив холодного топлива, особенно мазута может достигать 3-10% [8]. Исходя из количества теплоты полезно затрачиваемой на разогрев мазута [13], оценка [10] количества воды, попавшей в мазут при его подогреве острым паром, по расходу пара [8] и длительности разогрева, показала, что дополнительный рост обводненности может составить 4–20%.

Попытки исключить основной источник обводнения жидких топлив разогрев мазута острым паром при сливе не нашли широкого применения вследствие малой экономичности и недостаточной эффективности по времени разогрева [4].

Вместе с «неорганизованными» поступлениями воды в топливо, известно [7, 8] и целенаправленное обводнение мазутов на металлургических предприятиях, когда при поставке мазутов с плотностью меньше, чем плотность воды, одним из этапов их подготовки к сжиганию является промывка мазутов водой, в которую переходят хорошо растворимые соединения (особенно натрия).

В настоящее время во многих случаях для получения водотопливных эмульсий используется такое же оборудование, что и для создания смесей, гомогенных систем, суспензий и других дисперсных систем в химической, пищевой, фармацевтической и некоторых других отраслях промышленности [17, 18 и др.].

По интенсивности воздействия на смешиваемые жидкости методы и аппараты для эмульгирования можно разделить на несколько групп, для определения которых разработаны классификации диспергаторов [1, 5], применяемых в отдельных отраслях промышленности. Обобщение этих классификаций предложено в работе [5]. Обзор и анализ тенденций развития исследований по кавитационной гомогенизации эмульсий и дисперсий приведен в работе [6]. Наиболее полная классификация [9], учитывающая развитие техники диспергирования и создание ряда новых способов и диспергаторов [6], приведена на рис.1.

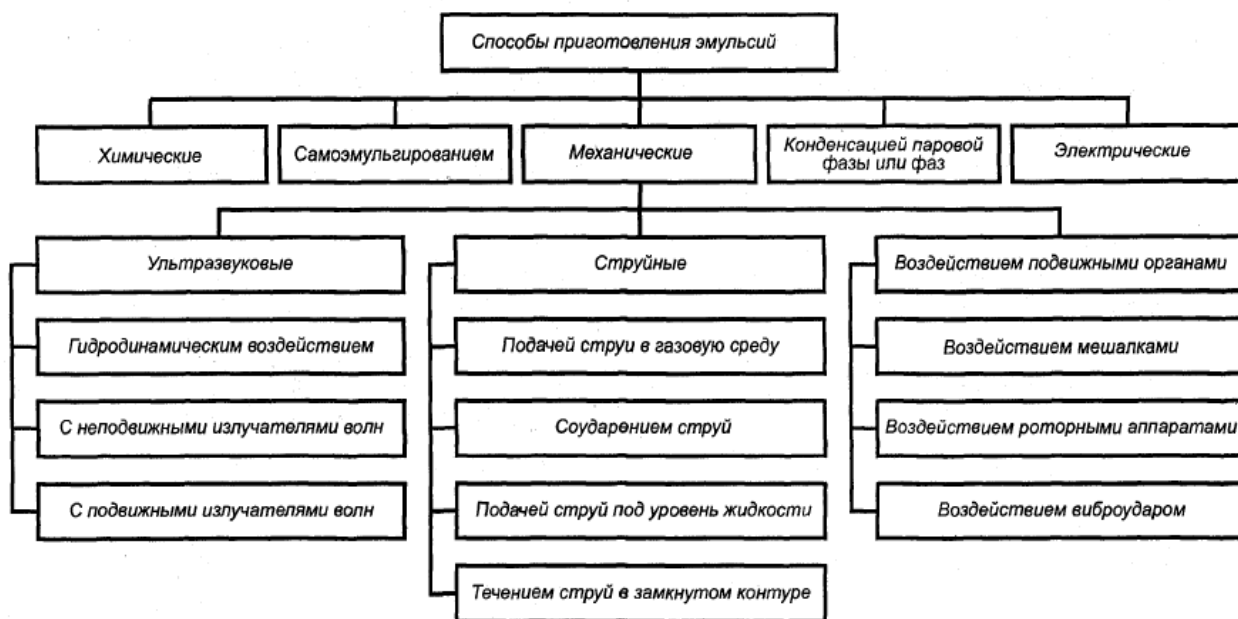


Рисунок 1- Классификация способов приготовления эмульсий

В большинстве случаев процесс приготовления эмульсий предваряется созданием смеси жидкостей содержащей грубую дисперсную фазу с различными размерами. Последующее уменьшение размеров отдельных объемов дисперсной фазы до примерно одинаковых значений называется гомогенизацией (буквально - повышением однородности). Хотя этот процесс является общим для всех устройств, используемых для приготовления эмульсий, на практике под гомогенизаторами понимают устройства, в которых диспергирование жидкости достигается пропусканием (дросселированием) ее через малые отверстия под высоким давлением достигающим 15-20 МПа и более. При таком высоком давлении вязкость эмульгируемой смеси практически не сказывается на производительности гомогенизатора [4].

Принцип дресселирования потока для эмульгирования водо-топливной смеси используется как в отдельных гомогенизирующих головках обеспечивающих скорость истечения жидкости до 200 м/с [8], так и в достаточно простых аппаратах, например [19], содержащих последовательно установленные сопло и диафрагму или использующих многостадийную гомогенизацию [5] пропусканием грубодисперсной смеси воды и топлива через ряд диафрагм [20] или перфорированных дисков [20].

Опыт применения клапанных гомогенизаторов для обработки мазута [3] и приготовления ВТЭ [8, 9] показал, что, несмотря на положительный эффект, энергозатраты на гомогенизацию оказались достаточно велики, и наблюдался интенсивный износ клапанов.

Высокие энергозатраты на обработку грубодисперсной водо-топливной смеси в гомогенизаторах вызваны в первую очередь диспергированием как воды, так и топлива, тогда как по сути процесса

эмульгирования желательно диспергировать только водную фазу. Очевидно, что в этом случае обрабатываться будет значительно меньший поток жидкости и появляется возможность соответственно снизить энергозатраты. В общем виде эта идея реализуется непрерывным впрыском воды под давлением через форсунку или другой разбрызгивающий аппарат в смесительную камеру, через которую проходит поток топлива. Многообразные случаи диспергирования струй жидкости, истекающих в другую жидкость систематизированы в работе [11], где приведена методика оценки размера капель, образующихся при сфероидизации распавшихся участков струи.

Метод гидродинамической обработки грубодисперсной смеси используется и в других аппаратах, где струи смеси подаются и впрыскиваются навстречу друг другу в объеме смесительной камеры. Эмульгирование столкновением двух струй, применяется и при отдельной подаче дисперсной фазы и дисперсионной среды. Потоки эмульгируемых жидкостей под большим давлением подаются в форсунки и в распыленном виде сталкиваются друг с другом в воздухе или на какой-нибудь поверхности [9].

В условиях работы топливных хозяйств не всегда имеется требуемый резерв давления топлива для эмульгирования водотопливных смесей продавливанием через каналы малых размеров. В таком случае, при впрыске воды в топливо, дальнейшую обработку смеси производят в различного рода смесителях работающих с низкими скоростями потока топлива и при малом перепаде давления [9, 10].

Наравне с гомогенизирующими головками, для диспергирования водотопливных смесей, применяют и сопловые устройства различных конструкций, в которых диспергирование воды происходит за счет кавитационных процессов, возникающих в результате пониженного давления в жидкости. При истечении струй жидкости со скоростью не обеспечивающей режима возникновения кавитации используют специальные возбудители кавитации [11, 12].

Приготовление ВТЭ из безводных топлив автоматически ставит вопрос дозирования воды пропорционально расходу топлива. Наиболее просто это решается при использовании струйных насосов (элеваторов, эжекторов) и смесителей.

Продувка слоя жидкости струями газа (воздуха или водяного пара) под избыточным давлением является достаточно широко применяемым технологическим процессом, в том числе для приготовления эмульсий воды с вязкими мазутами [15, 19]. Особенности процессов истечения газа (водяного пара) из отверстий в слой жидкости приведены в работах [17, 18].

По организации процесс эмульгирования близок к барботажу способ многократной насосной циркуляции водотопливной смеси

раздаваемой в емкости через перфорированные коллекторы [4]. Достоинством этого способа и барботажа является возможность выравнивания распределения воды в относительно небольшом объеме эмульгируемого топлива. Вместе с простотой осуществления перемешивания и эмульгирования, невысокая интенсивность процессов приводит к увеличению продолжительности обработки до 15-20 мин. и поэтому метод используется при относительно небольших расходах топлива.

При использовании водяного пара для приготовления водотопливных эмульсий, вместо барботажа более перспективным представляется использование струйного трансзвукового устройства «Транссоник», которое может быть использовано в качестве насоса, подогревателя, дозатора, смесителя и гомогенизатора.

Из остальных достаточно разнообразных способов приготовления эмульсий можно выделить группу механических способов воздействия на эмульгируемую смесь жидкостей. Из этой группы наибольшее распространение, благодаря простоте осуществления, получило механическое воздействие подвижными органами.

Основы конструкций, принципы образования смесей и эмульсий, а также методы расчета емкостных и других мешалок приведены в работах [12, 13]. Пример использования якорной мешалки для обработки смеси нефтесодержащих стоков с мазутом показал, что при механическом перемешивании образуются однородные по составу, но крупнодисперсные эмульсии с диаметром капель воды 200-500 мкм.

Из ряда аппаратов непрерывного действия осуществляющих процессы механического перемешивания с одновременным, тонким диспергированием (гомогенизацией) достаточно широкое распространение нашли коллоидные диспергаторы (мельницы), детальные описания которых опубликованы в работах [16, 18].

Конструкции коллоидных мельниц разработанные специально для приготовления ВТЭ приведены в работах [5, 6]. Из современных конструкций коллоидных мельниц, также используемых для приготовления ВТЭ, определенное распространение нашел генератор кавитации ГК-1 [15], испытания которого [14] показали, что он диспергирует водотопливную смесь с размерами капелек воды 2-4-8 мкм при наиболее крупных каплях диаметром 20-25 мкм. Вместе с этим был выявлен ряд конструктивных недостатков, и поэтому был разработан диспергатор роторный судовой ДРС [20], представляющий собой классическую коллоидную мельницу.

Близкий к коллоидным мельницам принцип действия, продавливанием смеси жидкостей в узком зазоре с воздействием касательными напряжениями, используется при приготовлении ВТЭ в шестеренчатых (зубчатых) насосах, которые благодаря широкой распространенности используются как самостоятельные аппараты - диспергаторы, так и в качестве одной из технологических ступеней эмульгирования [4].

По интенсивности воздействия на водотопливную смесь промежуточное место между механическими мешалками и коллоидными мельницами занимают центробежные и вихревые насосы. Примеры разнообразных аппаратов на основе центробежных насосов приведены в монографии В.Клейтона и работах [10, 17, 18, 24]. При однократной обработке в центробежном насосе водотопливной смеси размер капель воды в эмульсии составляет около 15 мкм. Включение насосов в небольшие кольцевые системы, обеспечивающие 10-20-кратную циркуляцию [21] или использование многоступенчатых центробежных насосов [22], обеспечивает размеры дисперсной фазы эмульсии в пределах 8-10 мкм.

Наряду с этими, обычными для промышленного производства, способами приготовления эмульсий, в последнее время получают распространение ультразвуковые методы с аппаратами превращающими электрическую энергию в механические колебания. Сочетание механического перемешивания и генерации акустических волн использованы в аппаратах вихревого слоя, нашедших применение для приготовления ВТЭ.

Из чисто электрических способов следует отметить электрический разряд в жидкости (электрогидравлический эффект Л.А.Юткина) нашедший применение при смешивании полимеров [21] и в процессах эмульгирования лекарственных препаратов.

В центробежных и вихревых насосах, как и в уже рассмотренных устройствах для приготовления ВТЭ, используются не все методы гидромеханического воздействия. Наиболее комплексную интенсификацию процессов эмульгирования водотопливных смесей обеспечивает применение роторно-пульсационных аппаратов, в которых основным рабочим органом являются чередующиеся неподвижные и вращающиеся (или вращающиеся с различными угловыми скоростями) соосно установленные тела вращения с перфорацией образующей поверхности в виде прорезей или отверстий, через которые проходит обрабатываемая среда [17]. В результате механическое воздействие на объемы дисперсной фазы (диспергирование, деформация, срезание и др.) одновременно сочетаются с активным гидродинамическим режимом движения жидкости в поле механических колебаний широкого диапазона частот и других явлений.

Известно достаточно много примеров использования роторно-пульсационных аппаратов для эмульгирования водотопливных смесей [23]. В работе [20] приведены данные по влиянию частоты вращения ротора аппарата и температуры эмульгируемой воды на дисперсные характеристики эмульсий. Уточнение методики расчета конструктивных параметров роторно-пульсационных аппаратов [17] применительно к обработке водотопливных смесей выполнено в работе [23]. Следует отметить, что для повышения эффективности работы роторно-пульсационных аппаратов в работе [17] использовался электрогидравлический эффект с осуществлением электрических разрядов в зазорах между ротором и статором.

Ориентируясь на приведенные в работах [16, 24] сравнительные результаты испытаний различных аппаратов для приготовления ВТЭ следует отметить, что оценка аппаратов производилась по эффективности сжигания эмульсий, а не по данным работы собственно аппаратов, которые могли работать в неоптимальных условиях с получением эмульсий различной влажности. Также отсутствовали дисперсно-влажностные характеристики ВТЭ при сравнении параметров различных устройств для приготовления эмульсий в работах [20, 23].

Попытка сопоставить различные аппараты для приготовления эмульсий в предположении, что затраты на преодоление сил вязкости при эмульгировании значительно меньше, чем на создание новой поверхности раздела предпринята в работе [19], где полагается, что равенство отношений поверхностного натяжения к среднему диаметру капель воды и удельного расхода энергии на эмульгирование, соответствующих энергоемкости процесса и степени энергонасыщенности аппарата, соответствует оптимальному режиму работы аппарата.

Аналогичный подход для сравнения различных аппаратов по экономичности использован в работе [18], где затраты энергии на эмульгирование сравниваются с работой по увеличению поверхности капли воды при ее диспергировании и предлагается критерий экономичности аппарата, из сущности которого следует, что его значение равно единице будет соответствовать идеальному случаю.

Существенным недостатком работ [19] и [25] является исключение из анализа затрат энергии на преодоление сил вязкости, тогда как диспергирование в объеме или внедрение дисперсной фазы конечных объемов в топливную среду неизбежно связано с перемещением (движением) топлива.

При использовании обводненного топлива на всех стадиях его обработки перед сжиганием указывается необходимость обязательного контроля содержания влаги [13, 20 и др.], дисперсности водной фазы [4] и равномерности ее распределения по всему объему топлива. Известны случаи контроля и других характеристик ВТЭ: вязкости [11], диэлектрической проницаемости, оптических свойств для относительно светлых нефтепродуктов и др.

3 Исследование влияния свойств водо-топливных эмульсии на процессы горения

3.1 Подготовка водо-топливных эмульсий к сжиганию

Любая технология подготовки жидкого энергетического топлива к сжиганию должна обеспечивать очистку топлива от твердых грубодисперсных включений, удаление воды, обработку присадками различного функционального назначения и, для достижения оптимальных условий сжигания, подогрев до температуры, обеспечивающей качественный распыл. Трудности, возникающие при подготовке и сжигании жидких топлив, определяются их свойствами, и, в первую очередь структурированностью, вызванной наличием дисперсных включений. Существующие технологии подготовки жидкого котельного топлива к сжиганию, по целому ряду причин, в том числе и экономических, не позволяют полностью обеспечить необходимые характеристики топлива. Компенсировать несовершенство мазутных хозяйств и повысить эффективность использования различных видов жидкого топлива позволяет, как указывалось ранее, его сжигание в виде ВТЭ. Учитывая разнообразные технологические схемы топливных хозяйств, определяемые типом и мощностью топливосжигающих агрегатов и установок, видом сжигаемого топлива и другими факторами, становится очевидной необходимость выбора рациональной технологии приготовления ВТЭ в полной мере учитывающей особенности конкретного топливного хозяйства и свойства эмульсий. Естественно, что такая технология должна быть достаточно простой, экономичной и надежной в эксплуатации и не влечь за собой существенных изменений схемы топливного хозяйства и конструкции горелочных устройств.

3.2 Технологические схемы подготовки водотопливных эмульсий

Реологические свойства жидкого топлива, его химический состав, структура и состав дисперсной фазы оказывает существенное влияние на выбор технологии подготовки его к сжиганию и определяет особенности схем топливных хозяйств.

Одним из путей повышения эффективности использования жидкого топлива является совершенствование технологических процессов подготовки топлива к сжиганию, в том числе и приготовления водо-топливных эмульсий. Широкий спектр топливосжигающих агрегатов, тепловые мощности которых различаются в десятки и сотни раз, сжигание в них различных по свойствам жидких топлив, периодически поставляемых с нестабильным составом, и тенденция увеличения поставок высоковязких топлив ставят перед эксплуатационными и проектными организациями ряд сложных технических вопросов по организации приема и слива топлива, хранения и подготовке его к

сжиганию, усовершенствованию технологических схем, которые также разнообразны, как и топливосжигающие агрегаты.

Решение указанных вопросов для всего многообразия технологических схем представляет собой объемную задачу, далеко выходящую за рамки настоящей работы. Вместе с этим, во всем многообразии технологических схем можно выделить характерные признаки и определить общие подходы, позволяющие наметить пути дальнейшего технического совершенства мазутных хозяйств. При этом необходимо иметь в виду, что возможны два подхода и приготовлению ВТЭ: диспергированием «естественно» обводненного топлива и добавлением воды, в том числе содержащей нефтепродукты и другие органически загрязнители, в безводное топливо. Такой подход будет тем более оправданным, так как при соответствующей подготовке характеристики ВТЭ близки к безводным топливам и не требуют замены основного оборудования мазутных хозяйств и горелочных устройств. В любом случае система приготовления ВТЭ должна быть приспособлена к существующей схеме мазутного хозяйства и обеспечивать условия сжигания. Выбор аппарата для приготовления эмульсии при этом должен определяться также условием обеспечения оптимальных по условиям сжигания дисперсных характеристик водной фазы и спецификой сжигания обводненного топлива.

Современные схемы мазутных хозяйств в принципе одинаковы для топливосжигающих агрегатов различной мощности и должны обеспечивать очистку топлива от механических примесей и воды, нагрев до температуры, обеспечивающей качественное распыливание, и создавать требуемое давление перед горелочными устройствами. В комплексе устройств и оборудования мазутного хозяйства, как правило, входят: устройства для приема и слива мазута; мазутонасосная с насосами, фильтрами и подогревателями; резервуары и коммуникации трубопроводов мазута, пара и конденсата с соответствующей запорно-регулирующей арматурой, установки для приема, хранения и ввода жидких присадок к топливу.

В зависимости от требуемого давления топлива перед форсунками котлов, технологические схемы мазутных хозяйств подразделяются на одноступенчатые, работающие по технологической цепочке: резервуар-фильтр грубой очистки-насос-подогреватель-фильтр тонкой очистки-форсунки горелочного устройства, или двухступенчатые, отличающиеся тем, что технологическая цепочка после фильтра грубой очистки строится по следующему принципу: насос первого подъема-подогреватель-фильтр тонкой очистки-насос второго подъема-форсунки горелочного устройства. Насосы второго подъема, в соответствии с занимаемым местом в технологической цепочке, предназначены для создания требуемого давления перед форсунками. Сфера применения одноступенчатых схем ограничивается мощностью обслуживаемых топливосжигающих агрегатов менее 250 МВт. Соответственно мощности и назначения мазутного хозяйства определяется

вместимость резервуаров и их количество, которое для мазутохранилищ электростанций должно быть не менее трех, а для промышленных котельных - не менее двух.

Так как резервирование основного оборудования (резервуары, насосы, подогреватели, фильтры и т.п.) мазутного хозяйства не меняет его принципиальной технологической схемы, то, с точки зрения приготовления водотопливных эмульсий, удобно рассматривать упрощенные технологические схемы хозяйств по топливной линии. Для конкретных мазутных хозяйств целесообразность приготовления водотопливных эмульсий для решения ряда задач (обработка топлива жидкими присадками, утилизация горючих отходов, обезвреживание загрязненных нефтепродуктами сточных вод, повышение однородности обводненных топлив и др.), возникающих в процессе подготовки и сжигания топлива, должна определяться исходя из конкретных условий эксплуатации топливосжигающих агрегатов.

При сжигании маловязких мазутов и других легких топлив, когда топливосжигающие агрегаты работают на стабильных нагрузках топливное хозяйство работает по тупиковой схеме (рис. 3а). Проектными решениями предусматривается установка расходной емкости, объемом не более 5 м³, мазут в которую поступает из основных резервуаров мазутохранилища. Из расходной емкости мазут поступает на насосы 5 самотеком через фильтры грубой очистки. Схемой предусматривается рециркуляция мазута 8 от напорного мазутопровода к расходной емкости и рециркуляция от горелочных устройств, остановленных котлов (при работе котлов рециркуляция от горелочных устройств не производится).

Малая вязкость топлива предопределяет достаточную эффективность обезвоживания топлива методом отстоя в основных резервуарах, который принимается в проектных решениях как основной.

Однако полностью отстоять воду не всегда удастся, так как вместимость резервуаров мазутохранилищ промышленных котельных выбирается из расчета 5-суточного расхода при доставке топлива автомобильным транспортом и 10-суточного расхода при доставке по железной дороге, а максимальная продолжительность отстоя при двух основных резервуарах может составить 60 - 120 ч, чего, как

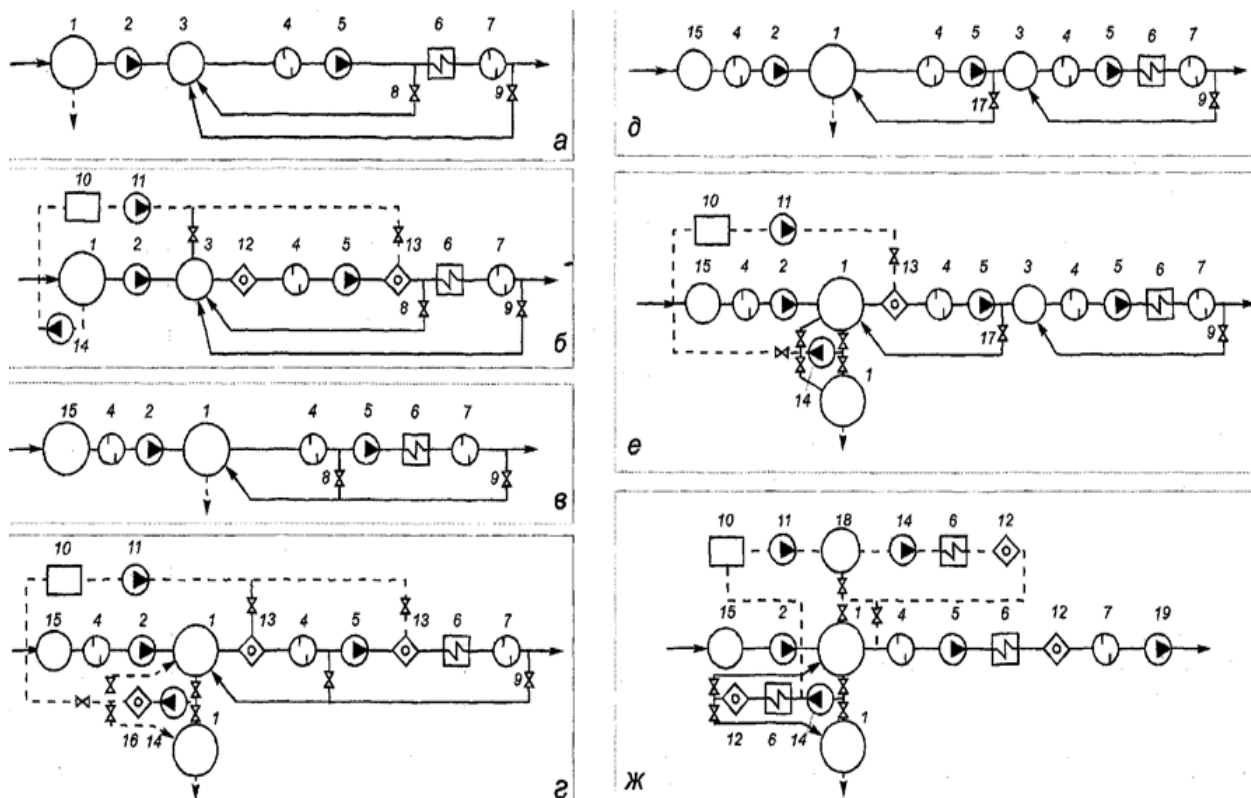


Рисунок 2- Упрощенные технологические схемы мазутных хозяйств

а и б проектная и предлагаемая схемы подачи жидкого топлива и приготовления водотопливных эмульсий для тупикового варианта; в и г - то же для циркуляционного варианта д и е - то же, для комбинированного варианта; ж - для приготовления водотопливных эмульсий в мазутном хозяйстве ТЭС.

1 - основной резервуар; 2 - насос перекачивающий; 3 - емкость расходная; 4 и 7 - фильтры грубой и тонкой очистки; 5 - насос; 6 - подогреватель; 8 - рециркуляция от насосов; 9 - рециркуляция от горелочных устройств; 10 - приемок дренажей (емкость замазученных вод); 11 - водяной насос; 12 - эмульгирующий аппарат водотопливной смеси; 13 - роторный аппарат с вводом воды в топливо; 14 - водяной насос для оттаивания вод; 15 - приемный резервуар; 16 - диспергатор линии перекачки высокообводненного топлива; 17 - рециркуляция на основной резервуар; 18 - сборник жидких горючих отходов; 19 - насос второго подъема.

показывает практика эксплуатации мазутных хозяйств, недостаточно для эффективного и глубокого разделения воды и топлива. А отсутствие рециркуляции в основных резервуарах приводит к колебаниям влажности мазута, подаваемого в расходный бак. Не улучшает равномерности состава обводненного топлива и частичная рециркуляция от напорного мазутопровода в расходную емкость, так как она не

обеспечивает даже однократного перемешивания объема топлива в емкости.

Некоторые из возможных решений эмульгирования обводненного топлива при тупиковой схеме заключается в реконструкции расходной емкости для барботирования водотопливной смеси водяным паром или для эмульгирования многократной рециркуляцией отдельным насосом через перфорированные коллекторы. При проектировании мазутных хозяйств и котельных в качестве расходных емкостей можно использовать механические мешалки соответствующей емкости, которые при периодической работе во время заполнения емкости могут обеспечить требуемую равномерность состава и дисперсность эмульсии.

При ограниченном количестве основных резервуаров и их ограниченной вместимости подготовку обводненного топлива к сжиганию можно улучшить забором топлива с верхнего уровня, ограничив забор с нижнего уровня величиной допускаемой влажности топлива [13], например 20% или перекачивая высокообводненное топливо в приямок 10 для замазученных вод и оттуда, дозировать в расходную емкость.

Получив в расходной емкости грубую смесь воды и топлива, ее можно эмульгировать в проточном роторном аппарате 12 (рис.3б.). Используя струйный насос в сочетании с роторным аппаратом 13 можно дозировать поступающее самотеком из емкости 10 высокообводненное топливо. При сборе высокообводненного топлива в дренажном приямке, его подают к диспергатору насосом 11.

При использовании вязких мазутов возрастают сложности их подготовки к сжиганию. Соответственно и усложняется технологическая схема мазутного хозяйства, в которой обязательна линия рециркуляции мазута из котельной в основной резервуар и на всос насосов, через которую подается около 15% мазута от общего количества, поступающего в котельную.

В типовой циркуляционной схеме подачи жидкого топлива (рис.3в) предусмотрен приемный резервуар 15, из которого мазут через фильтр грубой очистки подается в основные резервуары. Уменьшение обводненности мазута, после слива из железнодорожных цистерн, осуществляется отстоем в основных резервуарах. Однако вязкость и плотность мазута, близкая к плотности воды существенно затрудняет процесс обезвоживания. Дополнительные осложнения отстоя воды возникают в момент подачи мазута с приемносливного устройства в расходные резервуары. Сравнительно холодный мазут из приемного бака, поступая в емкость с горячим и, следовательно, более легким мазутом, сосредотачивается в придонном слое, вытесняя находящуюся здесь воду. При горячей рециркуляции затопленные струи, как известно, всплывают, и, следовательно, те слои мазута, которые лежат ниже зоны выхода струи

из сопла, в этом случае не подвергаются их воздействию и остаются без движения.

Так как одной из основных задач мазутных хозяйств является выделение воды из топлива, то проблема может быть решена специальным выделением двух резервуаров, один из которых используется для постоянной подачи мазута к котлам (рис. 3г.). Температуру в нем поддерживают исходя из условий возможности понижения вязкости мазута в подогревателях до требуемого значения. Остальные резервуары являются резервными и служат для пополнения расходного резервуара и приема слитого мазута из приемного резервуара.

Дальнейшее совершенствование технологии хранения мазута заключается в том, что применяя отдельный слив мазута в резервные резервуары и поочередно отстаивая его, можно добиться определенного выделения водной фазы в нижней части резервуара. Затем высокообводненный слой топлива перекачивается в отдельный резервуар или бак-отстойник для продолжения отстоя. Применение отдельного слива позволяет уменьшить обводненность топлива в резервных резервуарах в 2-5 раз. В результате в отстойном резервуаре собирается водотопливная смесь с содержанием водной фазы до 75% и более, что способствует дополнительному разделению воды и топлива. Выделившиеся замазученные воды поступают на дальнейшую очистку, а мазут с содержанием воды до 40%, через приямок дренажей или емкость замазученных вод добавляется к основному потоку топлива и эмульгируется в одном из основных диспергаторов 12 или 13 проточного типа. Место установки диспергатора определяется типом аппарата.

Длительный отстой или хранение мазута, вместе с выделением воды, сопровождается агрегированием и седиментацией дисперсных включений с образованием смолистых отложений в топливных резервуарах. Поэтому, для ограничения процессов агрегации и седиментации, после удаления высокообводненного отстоя из резервуара, перекачивающим насосом 14 и диспергатором 16 проводят периодическую обработку остального мазута, превращая его в высокодисперсную стабильную систему, или подают обработанный мазут в один из резервуаров, используемый как расходный.

При работе маневренных ТЭС на переменных нагрузках или частых переходах с газа на мазут, а также при использовании тяжелых мазутов наиболее приемлемой является комбинированная (тупиково-циркуляционная) технологическая схема мазутного хозяйства (рис. 2д). Маневренность обеспечивается ее разделением на два последовательных рециркуляционных кольца. Рециркуляция от горелочных устройств замыкается на расходную емкость и при закрытии вентиля рециркуляции мазутное хозяйство работает по тупиковой схеме. Второе рециркуляционное кольцо 17 начинается после насоса,

перекачивающего топливо в расходный резервуар, и замыкается на основной резервуар. Основным назначением второго рециркуляционного кольца является выравнивание состава топлива в основном резервуаре и предотвращение расслоения топлива и воды.

При возможности отстоя воды в топливе его частичное обезвоживание производится аналогично циркуляционной схеме приготовления водотопливных эмульсий (рис. 3г.) с одним отличием - в линии насоса 14 отсутствует диспергатор. Если своевременно не удалять отстоявшуюся воду, то она накапливается на дне резервуара и при резком увеличении расхода топлива (периодическое заполнение расходного резервуара, увеличение нагрузки котлов и т.п.) во всасывающий патрубок может поступать вода, образующая водяные пробки, заполняющие все сечение мазутопровода и практически не смешивающиеся с мазутом по трассе движения.

Отсюда становится ясным, что тщательное перемешивание влаги с мазутом и выравнивание его состава в резервуаре позволит предотвратить подачу воды к форсункам. При выполнении этого условия выбор типа и места установки эмульгирующего аппарата будут определяться следующими особенностями технологической схемы. Приведенные выше особенности эксплуатации резервуаров, требуют установки диспергатора после основных резервуаров (рис. 3е.) и рециркуляции в резервуар ВТЭ. При этом обеспечивается стабилизация состава топлива в основных резервуарах, так как водомазутные эмульсии отличаются достаточно высокой агрегативной и седиментационной устойчивостью. В расходном резервуаре однородность эмульсии может поддерживаться рециркуляцией от горелочных устройств.

В наиболее полную технологическую схему (рис. 3ж.) мазутного хозяйства крупной ТЭС с двухступенчатой подачей топлива, входит эмульгирование и подогрев сливаемого из железнодорожных цистерн высоковязкого и тяжелого топлива, так как такие виды топлива отстаиваются недостаточно эффективно и чрезвычайно долго. Тем не менее в схеме должна учитываться возможность перекачивания наиболее обводненных нижних слоев топлива в один из основных резервуаров. Оставшийся после перекачивания мазут при хранении эмульгируется периодически, по мере коалесценции и укрупнения размеров капель водной фазы. Для эмульгирования рекомендуется использовать гомогенизирующие устройства струйного типа, как не требующие постоянного контроля и обслуживания и отличающиеся простотой конструкции.

Гидромеханическая обработка и эмульгирование мазута в основных резервуарах является предварительной стадией его обработки, так как ее периодический характер не позволяет выдерживать требуемые для сжигания характеристики водотопливных эмульсий. Основная стадия эмульгирования производится перед фильтрами тонкой очистки или, если не позволяют температурные условия эксплуатации диспергирующего аппарата, перед

подогревателем. В результате обработки топлива непосредственно перед сжиганием предотвращается образование водяных пузырей в топливных линиях, снижается загрязнение фильтров тонкой очистки и арматуры, уменьшается абразивный и эрозионный износ и загрязнение форсунок.

В процессе простых технологий очистки загрязненных нефтепродуктами сточных вод выделяется часть стоков с достаточно высоким содержанием нефтепродуктов, дальнейшее отделение которых от воды требует сложной и дорогостоящей технологии. Поэтому в схеме предусматривается сбор этих вод и других горючих отходов в резервуаре 18, в которой, при необходимости добавляется мазут из основных резервуаров и эта смесь после эмульгирования возвращается в основные резервуары или дозированно добавляется в мазут перед фильтрами грубой очистки.

При разработке технологической схемы приготовления водо-топливных эмульсий необходимо принимать во внимание следующие требования:

- максимальное сохранение существующей системы мазутного хозяйства;
- надежность, непрерывность и простота приготовления водо-топливной эмульсии;
- возможность перехода с водотопливной эмульсии на основное топливо без остановки топливосжигающих агрегатов;
- возможность регулирования и поддержания на требуемом уровне отношения вода/топливо в эмульсии, как, например, в [15].

К качеству диспергируемой воды можно предъявить только одно требование - отсутствие грубодисперсных механических примесей и химических веществ способных при термическом обезвреживании влаги образовать с продуктами сгорания токсичные и вредные выбросы. Приготовление эмульсий из маловязких топлив (дизельное топливо, топливо печное бытовое и др.) не требует обеспечения каких-либо специальных условий, за исключением ввода эмульгаторов для низкокипящих топлив.

Проведенный автором анализ подготовки обводненных топлив к сжиганию и экспериментальные исследования [25] позволяют сделать следующие практические выводы, дающие возможность разработать технологию хранения и подготовки к сжиганию обводненного жидкого топлива в условиях действующих и проектируемых мазутных хозяйств ТЭС, промышленно-отопительных котельных и других топливосжигающих агрегатов:

При небольшом начальном обводнении топлива (до 10%) целесообразно уменьшить размеры включений водной фазы в мазуте в процессе его слива и подачи в резервные резервуары и осуществлять его хранение в виде тонкодисперсной эмульсии

температура должна поддерживаться на уровне 30-40°C в зависимости от вязкости топлива. При этом будут достигаться высокая однородность обводненного топлива и более равномерное распределение влаги по его объему.

При больших значениях начального обводнения, когда эмульгирование топлива перед подачей в резервуары мазутохранилища нецелесообразно, более эффективен отстой воды из топлива температуре 60-70°C в течение 80-100ч. После этого возможно снижение влажности основной массы мазута до 6-10% путем удаления отстоявшейся воды и слоя топлива с высокой концентрацией водной фазы в отдельный резервуар для дополнительного отстаивания, причем эффективность последнего будет достаточно высока вследствие больших размеров частиц и концентрации водной фазы.

Диспергирование оставшейся в основной массе мазута производится затем в процессе циркуляционного подогрева или непосредственно перед сжиганием в зависимости от необходимого эксплуатационного режима, в том числе и со специальной добавкой воды в топливо.

3.3 Влияние дисперсного состава водотопливной эмульсии на процессы горения факела

При сжигании жидкого топлива в камерных топках основные особенности процессов горения проявляются главным образом на начальном участке факела, где практически одновременно происходят все стадии горения - прогрев и испарение, воспламенение и горения паров топлива, пиролиз (термическая диссоциация) тяжелых углеводородов в паровой фазе с выпадением свободного углерода (сажи), выгорания коксового остатка и образования вредных веществ [6, 7 и др.]

Наиболее простые - визуальные наблюдения за горением факела ВТЭ по сравнению с факелом безводного топлива показали [2, 23 и др.], что факел стал более чистым с достаточно четко очерченными границами и уменьшилась длина факела. В работе [10] при сжигании водомазутной эмульсии влажностью свыше 10% в корне факела у амбразуры отмечался ореол из горящих капелек, выбрасываемых за счет микровзрывов капель эмульсии. Эти изменения были подтверждены [11] измерениями концентраций газовых компонентов продуктов сгорания, по результатам которых было установлено, что факел стал короче на 8-10% при увеличении влажности эмульсии до 20%. На котельных установках малой мощности, где горелочные устройства недостаточно интенсивно смешивают топливо и воздух, отмечено сокращение длины факела на 15-17% [17].

Данные по конкретным распределениям концентраций продуктов сгорания в поперечных сечениях факела, определяемые в основном

типом горелочных устройств, хотя и ограничены [12, 21, 23], но показывают, что зона активного горения водотопливной эмульсии сокращается и отмечается относительно слабое влияние дисперсных характеристик на поля газового состава факела.

Наличие в топливе воды, являющейся теплопоглощающим компонентом и в большинстве случаев балластом [21, 22 и др.], оказывает существенное влияние на характер физических процессов и химических реакций, протекающих при горении топлива. Однако сжигание топлива с диспергированной в нем водой изменил взгляд на воду как на балласт и естественно, что установленный эффект вторичного диспергирования (микровзрыва) капель ВТЭ, определил как доминирующее - физическое (в большинстве улучшение смесеобразования) воздействие на процессы горения [2, 4 и др.]. Как характеристику чисто физического влияния микровзрыва капель эмульсии и ввода воды как балласта в зону интенсивного горения рассматривают смещение максимума температур факела по его ходу [2, 12].

Завершающими реакциями горения углеводородных топлив являются реакции догорания оксида углерода и собственно углерода находящегося в составе коксовых и сажистых частиц. В противоположность механизму горения СО по цепной разветвляющейся реакции, современный подход к механизму догорания оксида углерода, когда основной реакцией образования СО при уровнях температур характерных для процесса горения является реакция термического разложения радикала RCO [16], показывает, что в результате горения СО появляется только один активный центр – атом водорода, который только способствует продолжению цепи.

Уже первые опыты А.М.Иванова [24] показали, что при сжигании ВТЭ снижается концентрация сажистых частиц, а в работах [21, 24] установлено значительное уменьшение их размеров и поэтому не исключено определенное химическое влияние водяных паров на горение углерода, из которого в основном состоят коксовые остатки и сажа. В подтверждение этого предположения в ряде работ по сжиганию ВТЭ [19, 23, 25] указывают на ускорение горения углерода за счет взаимодействия водяного пара и раскаленных выше 1000°С сажистых частиц (реакция водяного газа).

Так как сжигание жидкого топлива в топочных камерах вместе с конечными продуктами сгорания углеводородов H_2O и CO_2 сопровождается образованием и выбросами в атмосферу токсичных и вредных соединений, количество которых в большинстве случаев зависит от организации режима горения и в определенной степени от состава и качества топлива [13, 16, 23 и др.], то представляет интерес рассмотреть генерацию сажистых частиц являющихся итогом сложных физико-химических процессов, происходящих в паровой фазе вокруг горящих капель жидкого топлива.

Механизмы образования и выгорания сажи при сжигании углеводородных топлив рассмотрены в работах [16, 18, 22] и в работе [25], где выполнен современный анализ теории образования частиц сажи. В работе [28] показано, что в химическом составе сажи содержится 0,5-3,0% водорода по массе, который химически связан с углеродом. Последний факт подтверждается тем, что параллельно с образованием сажи в сходных условиях протекают процессы образования канцерогенных полициклических ароматических углеводородов (ПАУ), вероятный механизм образования индикатора которых - бензапирена был предложен Н.Л.Стаскевичем [13].

Практически во всех известных работах по сжиганию водо-топливных эмульсий [2, 4, 23, и др.] получено снижение концентрации сажистых частиц (СЧ) в продуктах сгорания эмульсии влажностью до 25-30% при возможности устойчивого сжигания эмульсии с предельным содержанием воды 65-67% [9].

Изменение размеров одной из составляющих сажистых частиц коксовых остатков (ценосфер) [7] при сжигании ВТЭ приводит к снижению их размеров в 1,5-2 раза и сопровождается изменением морфологии ценосфер [26]. Если результаты в работе [26] были получены без учета дисперсных характеристик эмульсии, то анализ изменения дисперсности сажи в зависимости от дисперсных характеристик ВТЭ показал независимость этих двух параметров. Проведенный в работах [16, 18] анализ электронных микрофотографий для различных условий сжигания, позволил обнаружить широкий спектр форм частиц сажи, общее изменение распределения размеров которых при сжигании мазута и ВТЭ получено в работах [21, 24], где, как и в работе [5], отмечено существенное уменьшение размеров сажистых частиц при сжигании эмульсии.

Большинство методов эмульгирования основаны в большей или меньшей степени на механическом воздействии, заключающемся в раздроблении объемов дисперсной фазы на мелкие капли с помощью механических и гидродинамических процессов. Сложный процесс эмульгирования при перемешивании двух жидкостей проходит через несколько стадий, первая из которых заканчивается разделением объема дисперсной фазы на достаточно крупные капли. Далее начинается собственно образование эмульсии.

Для деформирования и разрушения жидких сфер дисперсной фазы прикладываются достаточно большие усилия, связанные с преодолением вязкостного сопротивления и сил поверхностного натяжения.

Во всех случаях эмульгирования необратимый распад крупных капель дисперсной фазы приводит к образованию мелких капель различных размеров всегда имеющих суммарную площадь поверхности меньше, чем поверхность капель равного размера, образованных из одной и той же большой капли. А так как затраты энергии на эмульгирование в основном определяются образованием новой увеличенной поверхности раздела фаз, то одинаковость размеров, полученных при диспергировании капель будет энергетически

менее выгодна, и, тем самым, практически во всех случаях эмульгирования предопределяется некоторая степень различия размеров капель дисперсной фазы.

Очевидно, что после достижения динамического равновесия между числом сливающихся и распадающихся капель продолжение механического воздействия не даст ощутимого улучшения качества эмульсии, и энергия, затраченная на продолжение процесса эмульгирования, будет использована непроизводительно. Основное изменение размеров капель происходит в самом начале эмульгирования, а предельные значения минимальных размеров капелек, соответствующие состоянию динамического равновесия, достигаются постепенно. А.А.Абрамзон [22] объясняет это возрастанием жесткости капелек с уменьшением их размера, что приводит к ухудшению диспергируемости и дроблению капелек только до определенного предела при постоянной интенсивности воздействия.

Как было отмечено в разделе 1., в полидисперсных эмульсиях, при плотной упаковке капелек дисперсной фазы можно достичь концентрации 90-98%. Для водотопливных эмульсий вопрос высокой концентрации воды имеет один ответ, что это будет концентрация, позволяющая сжигать топливо устойчиво и без срывов. Теоретически при адиабатном сжигании водотопливной эмульсии до полного испарения воды эта концентрация составит около 93%. При размерах капель диспергированной воды, близких к размерам капель распыленного топлива, существует вероятность таких концентраций в отдельных каплях эмульсии и даже попадание в распыл топлива капель воды, не покрытых топливной оболочкой.

Таким образом дисперсный состав водотопливных эмульсий является важнейшей характеристикой, являющейся основным критерием разделения понятий собственно эмульсии и смеси воды и топлива, а также критерием применимости эмульсии для сжигания. Общее разделение эмульсий по размерам частиц дисперсной фазы [7] на высококачественные, с размером частиц от 1 до 10 мкм, и менее качественные, с размерами частиц от 20 до 50 мкм, уже показывает необходимость оценки дисперсности внутренней фазы. Однако, применительно к условиям сжигания водотопливных эмульсий, такое определение качества эмульсий следует признать неполным и условным, так как высококачественной будет являться водотопливная эмульсия, обеспечивающая наилучшие технико-экономические и экологические показатели процессов горения и топочных устройств. Учитывая многообразие топочных и горелочных устройств, а также различное технологическое назначение водных добавок к жидкому топливу, становится очевидным, что понятие высокого качества водотопливных эмульсий, основанное на градации размеров дисперсной фазы, непосредственно связано с конкретными условиями их использования.

Для оценки эффективности процессов эмульгирования, стабильности эмульсий и их характеристик, а также эффективности сжигания водотопливных эмульсий (ВТЭ) необходимо определение размеров частиц дисперсной фазы. Исходя из возможностей и недостатков известных методов анализа дисперсных характеристик ВТЭ, рассмотренных в работе [10], основным методом был выбран метод оптической микроскопии на микроскопе «Биолам-Р14», оборудованном микрофотонасадкой МФН-12. Отбор проб и подготовка препаратов ВТЭ производились в соответствии с рекомендациями [6, 10]. При обработке микрофотографий использовались методики.

Несмотря на простоту аппаратного оформления, использование стандартного метода Дина-Старка [6] для определения влажности ВТЭ в практике проведения экспериментальных работ не получило широкого применения. Вследствие как недостатков присущих самому методу так и особенностей отгонки воды из эмульсии, было установлено [10], что продолжительность отгонки составляет 2-3 часа, а полнота отгонки и соответственно точность определения влажности зависит от дисперсности эмульсий, снижаясь с уменьшением размеров капелек воды.

Для определения влажности топлива и ВТЭ за основу был принят метод, использованный в ЛИИВТе [14]. При проведении анализа в керамический реактор помещалась навеска эмульсии массой 20г и определялась ее температура. Затем при перемешивании в эмульсию вводилось 25 г концентрированной серной кислоты и фиксировалась конечная температура нагрева смеси в реакторе. С помощью калибровочного графика, построенного по специально приготовленным водотопливным эмульсиям с известным содержанием влаги, по разнице между начальной и конечной температурами определялась влажность эмульсии. Соблюдение условия равенства начальных температур ВТЭ и серной кислоты, а также использование электропривода для мешалки позволили производить измерения содержания влаги в диапазоне 0,05-0,25 по объему с относительной погрешностью 3,5-4,0%. С увеличением влагосодержания до 50% относительная погрешность возрастала до 5,5%. Время проведения анализа при этом не превышало 5 мин. [10].

Практически сферическая форма капелек воды позволяет характеризовать их размер одним показателем - радиусом r или диаметром d . Эмульсии с практически одинаковым размером частиц дисперсной фазы называют монодисперсными и, очевидно, для характеристики дисперсного состава таких эмульсий достаточно определить этот размер. В некоторых случаях получают эмульсии, которые по размерам частиц дисперсной фазы приближаются к монодисперсным. Обычно в технических системах получают полидисперсные эмульсии, для характеристики дисперсности которых

необходимо найти распределение размеров капелек дисперсной фазы. Но и в этом случае объяснимо стремление характеризовать дисперсный состав одним параметром, в качестве которого наиболее широко применяют средние радиусы или диаметры капелек эмульгируемой жидкости. Кроме средних размеров дисперсность эмульсии можно характеризовать и другим усредненным и достаточно важным показателем удельной поверхностью раздела фаз, представляющей собой отношение суммарной поверхности всех капелек, содержащихся в единице объема эмульсии, к этому объему.

Дисперсность ВТЭ можно выразить распределением размеров капелек из массы или объема водной фазы. Более предпочтительным будет использование данных распределения по объему или по числу капелек, соответствующих определенным интервалам размеров, и в этом случае распределение будет называться счетным. Данные распределения дисперсного состава эмульсий могут быть представлены в виде таблиц, уравнений, выражающих функцию распределения или графических зависимостей. Из этих данных распределения, прежде всего из таблиц, наиболее просто определяются средние размеры, которые вычисляют используя методы математической статистики, как средневзвешенные по числу капелек с учетом влияния каждой фракции на размер.

Равенство значений средних диаметров, вычисленных одним методом для эмульсий с одинаковой концентрацией дисперсной фазы, но полученных, например, различными способами, не дает оснований предполагать об идентичности характеристик и свойств этих эмульсий. Так монодисперсная и полидисперсная эмульсии с равными значениями средних диаметров уже будут отличаться распределением размеров капелек. Отсюда следует, что значение среднего размера капелек дисперсной фазы не позволяет полностью характеризовать дисперсность эмульсии.

В математической статистике отклонения случайных величин от их среднего арифметического значения, что соответствует отклонениям размеров отдельных капелек от среднего диаметра \bar{d} , характеризуют дисперсией σ^2 , вычисляемой по формуле:

$$\sigma^2 = \frac{\sum n_i \cdot (d_i - \bar{d})^2}{\sum n_i - 1}, \quad (1)$$

где n_i - число капель; d_i - средний размер капли в i -м интервале; n - общее число капель.

На практике в качестве параметра, характеризующего разброс значений случайной величины, используют среднеквадратичное отклонение от среднего значения, равное корню квадратному из дисперсии $\sigma = \sqrt{\sigma^2}$.

Таким образом, значение среднего . диаметра и дисперсии или среднеквадратичного отклонения более представительно характеризуют распределение размеров капелек эмульгируемой жидкости. Однако, использование двух размерных величин для оценки дисперсности не всегда является удобным и поэтому степень дисперсности или однородности оценивают коэффициентом вариации, равным отношению среднеквадратичного отклонения к среднему диаметру:

$$\alpha = \frac{\sigma}{d}, \quad (2)$$

С достаточным для практического использования приближении при значении коэффициента вариации $\alpha < 0,15$ эмульсию можно характеризовать как монодисперсную [60].

Более полное представление о дисперсности эмульсий и наглядность дает графическое представление распределения объема или количества капелек дисперсной фазы в зависимости от их размеров .

Первичные данные, используемые для построения графиков дисперсионного анализа, представляют, как правило, в виде таблиц, включающих значения количества всех капелек, размер которых (радиус r) находится внутри определенного интервала Лг. Значение интервала рекомендуется [20] принимать не постоянным, а пропорциональным значениям среднего радиуса внутри интервала. Такие данные распределения размеров капелек дисперсной фазы легко представить в виде гистограммы, по оси абсцисс которой откладывается размер капелек, а по оси ординат — относительное содержание капелек с размерами, соответствующими определенному интервалу (рис.2).

Если провести плавную кривую через вершины прямоугольников гистограммы, представляющие собой дифференциальные фракции капелек, то получим дифференциальную кривую распределения, изображающую относительное содержание капелек, радиус которых больше или меньше данного значения радиуса. Получают эти кривые последовательным суммированием или интегрированием числа капелек от заданного размера r до бесконечности для капелек с размером больше r , и получают функцию $q(r)$, непрерывно убывающую с увеличением размера (кривые 1-3 на рис. 3а). Для капелек с размером меньше r интегрирование ведут от нуля до заданного размера r и получают непрерывно возрастающую функцию $Q(r)$ (кривая 4).

Получаемые таким образом функции или кривые называют кумулятивными. Представленные на рис.3 кривые распределения капель дисперсной фазы эмульсии воды и мазута [10] получены в роторно-пульсационном аппарате [18] (кривые 1, 4), кривые 2 в аппарате [14], разработанном для получения близких к монодисперсным эмульсий, и

усовершенствованном диспергаторе [13] на основе шестеренчатого насоса (кривые 3).

Располагая расчетными характеристиками размеров капелек и анализируя кумулятивные и дифференциальные кривые распределения можно сделать вполне определенные выводы о дисперсности эмульсий. Так, функции распределения на рис.3 показывают, что кривые 1 соответствуют полидисперсной эмульсии с достаточно малыми размерами капелек дисперсной фазы. Состав дисперсной фазы эмульсии, близкий к монодисперсному отражают кривые 2. Из сравнения кумулятивных кривых 2 и 3 с соответствующими дифференциальными кривыми распределения легко заметить, что близость кумулятивных кривых и значений вероятнейших радиусов капелек не позволяет идентифицировать дисперсный состав эмульсий, отраженный этими кривыми. Эмульсия, представленная кривыми 3, является более полидисперсной и грубой. Наибольшей симметрией дифференциальных кривых распределения обладают монодисперсные и близкие к ним эмульсии.

3.4 Реологические свойства водотопливных эмульсий.

Практически все этапы технологической подготовки жидких энергетических топлив к сжиганию (транспортирование по трубопроводам, продолжительность и способы сливных операций при транспортировании железнодорожным, водным и автомобильным транспортом, полнота отстаивания воды и скорость осаждения механических примесей при хранении, подогрев топлива и его прокачивание насосами, а также эффективность работы форсунок и качество распыливания ими топлива) в существенной мере зависят от текучести топлива, которая определяется вязкостью.

Большинство жидких энергетических топлив, в частности мазуты, представляют собой многофазную дисперсную структурированную систему и относятся к так называемым неньютоновским жидкостям, т.е. к жидкостям, при деформировании которых не соблюдается закон трения Ньютона и происходит изменение межмолекулярного взаимодействия и изменение характера структурообразования с разрушением или образованием агрегатов частиц и связей между ними. Разрушение достаточно ажурной структурной сетки связей между частицами при течении структурированной жидкости проявляется в удалении частиц друг от друга на расстояние, превышающее адсорбционно-сольватный слой. Поэтому работа внешних сил затрачивается [20] не только на преодоление истинной (Ньютоновской) вязкости η_H , но и на разрушение структуры, дополняющей кажущуюся или эффективную вязкость η_0 структурной составляющей $\eta_{стр}$; тогда $\eta_0 = \eta_H + \eta_{стр}$. Для эффективного перекачивания высоковязких мазутов применяют их подогрев, позволяющий поддерживать вязкость на уровне,

соответствующем неструктурированным системам. Однако после прекращения нагрева, даже до весьма высоких температур, структура мазута восстанавливается и вязкость достигает прежнего значения.

Изменение температуры топлива непосредственно влияет на межмолекулярные взаимодействия и структурообразование, которое определяет аномальный характер вязкости структурированных топлив и может радикально изменить реологические свойства, которые необходимо учитывать наряду с ньютоновской вязкостью. При снижении температуры мазутов ниже определенного значения в них начинается образование структурных комплексов, а при температурах, близких к температуре застывания, мазуты являются полностью структурированными и из вязкотекучей жидкости могут превращаться практически в псевдопластическое тело, у которого аномальность эффективной вязкости проявляется в уменьшении вязкости с увеличением градиента скорости перемещения жидкости [18].

Принимая во внимание эту аномальность, необходимо объяснить результат [8] роста и последующего снижения вязкости безводного мазута по мере увеличения давления гомогенизации.

Так как с ростом давления в топливе происходит деформация сложных молекулярных соединений, а при очень высоких давлениях протекание химических реакций конденсации и полимеризации, то

определяемый этими процессами механизм увеличения вязкости [51] начинает превалировать. Одновременно с ростом давления начинает увеличиваться градиент скорости перемещения топлива в гомогенизирующей головке и в результате (при давлении 30 МПа) аномальный механизм уменьшения вязкости компенсирует ее рост.

Рассмотренный пример гомогенизации [8] показал, что и при других способах обработки жидких топлив необходимо оценивать возможность изменения их вязкости и дал основание полагать, что диспергирование в жидких котельных топливах новой, менее вязкой, водной фазы, должно, естественно, изменить вязкость ВТЭ по сравнению с вязкостью исходной топливной основы (дисперсионной среды). Учитывая, что значения вязкости компонентов эмульсий воды и большинства жидких энергетических топлив значительно различаются, следовало бы ожидать снижение вязкости эмульсии по сравнению с топливом с увеличением концентрации водной фазы. Однако эксперименты [4] показали, что вязкость ВТЭ выше вязкости исходных топлив. При этом был установлен противоположный характер влияния влажности на вязкость эмульсий тяжелых и более легких топлив.

Как следует из работы [22], увеличение вязкости ВТЭ, по сравнению с вязкостью исходного топлива, связано с присутствием в высоковязких мазутах естественных, а в менее вязких топливах специально вводимых поверхностно-активных веществ (ПАВ) - эмульгаторов,

образующих поверхностные слои на границе раздела фаз с поверхностной вязкостью, отличающейся от объемной вязкости жидкостей внутри и вне капель. Иное объяснение увеличения вязкости эмульсий заключается в том, что адсорбция ПАВ на поверхности капель снижает ее поверхностное натяжение и конвективный поток эмульгаторов изменяет концентрацию ПАВ вблизи, а следовательно, на поверхности капли. Это обстоятельство приводит к тому, что межфазное натяжение становится неодинаковым в различных точках поверхности капли, в силу чего возникают тангенциальные капиллярные напряжения, вовлекающие жидкость по обе стороны поверхности капли в дополнительные течения, вносимые каплей во внешний поток.

Отсюда следует, что изменение вязкости ВТЭ определяется величиной поверхности раздела фаз, которая, в свою очередь, зависит от дисперсности и влажности эмульсии.

Основываясь на этом выводе, исследования влияния среднего диаметра капель воды на эффективную вязкость эмульсии вода-масло и недостаточности констатации противоположности влияния влажности на вязкость эмульсий воды с различающейся топливной основой [5], была произведена экспериментальная проверка влияния дисперсно-влажностных характеристик ВТЭ на их реологические свойства.

В порядке увеличения исходной вязкости топливной основы исследовались эмульсии моторного топлива, смеси моторного топлива с мазутом М-40 и мазута М-40. Для определенности, при проверке влияния влажности эмульсии готовились и исследовались при температуре 40°C с примерно одинаковым дисперсным составом со средним радиусом капель воды близким к 10 мкм с коэффициентом вариации размеров 20-25%.

Используя подходы [25] к определению вязкости эмульсий, совместно с К.В.Шевелевым [12], была создана модификация вискозиметра Гепплера с электронной фиксацией продолжительности падения шарика [11]. Для каждого значения влажности ВТЭ готовилась смесь заданного состава и дисперсности, измерения вязкости которой проводились не менее 12 раз, при этом относительная погрешность измерения времени падения шарика не превышала 2,5%.

Эксперименты по определению вязкости эмульсии воды и моторного топлива показали (кривая 2 на рис.4), что увеличение влажности эмульсии до

25% отражается практически монотонным ростом вязкости.

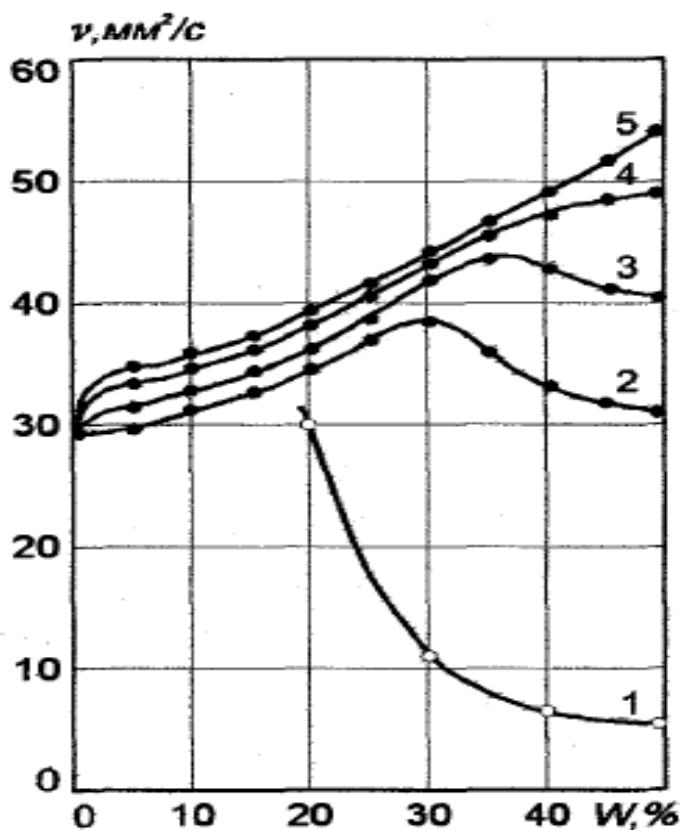


Рисунок 4- Зависимость вязкости водотопливных эмульсий от влажности при температуре 40°C. 1-осветительный керосин [5]; 2-моторное топливо; 3-5 -моторное топливо с добавкой мазута М-40 2(3), 4(4) и 6% (5)

Однако, при влажности эмульсии 30% показания времени падения шарика в вискозиметре стали приобретать дрейф в сторону уменьшения, что соответствовало снижению вязкости. Стабилизация показаний вискозиметра была достигнута после достаточно продолжительных испытаний.

Для выяснения причин снижения вязкости был произведен анализ дисперсного состава исследуемой пробы эмульсии после испытаний. Сравнение результатов расчета распределения размеров дисперсной фазы и ее удельной поверхности по микрофотографиям выявило, что средний радиус капель воды увеличился. А их удельная поверхность уменьшилась, несмотря на увеличение влажности.

Предположив, что причиной увеличения размеров капель воды является их слияние (коалесценция) в результате столкновений при перетоках эмульсии, вызванных падением шарика вискозиметра, эксперимент по определению вязкости эмульсии влажностью 30% был повторен после выдержки пробы соответственно времени наступления стабилизации показаний вискозиметра в предыдущем эксперименте.

Результаты эксперимента и микрофотографии, полученные непосредственно до и после эксперимента, показали увеличение средних размеров капель и уменьшение удельной поверхности воды и их неизменность в процессе эксперимента с практически идентичными уменьшенными значениями вязкости, полученными в обоих экспериментах.

Дальнейшее увеличение влажности эмульсии сопровождалось ростом размеров дисперсной фазы и уменьшением ее удельной поверхности и вязкости эмульсии. При влажности эмульсии 40% и более уже под микроскопом можно было наблюдать слияние капель дисперсной фазы.

Установленный характер изменения вязкости эмульсий воды и моторного топлива с ростом влажности качественно совпал (кривая 1 на рис.4) с уменьшением вязкости эмульсий воды и осветительного керосина.

Снижение вязкости рассмотренных эмульсий можно объяснить ограниченным содержанием в топливной основе естественных поверхностно-активных веществ, стабилизирующих эмульсию. При увеличении влажности эмульсии сверх некоторого значения недостаточная концентрация поверхностно-активных веществ уже не может обеспечить стабильности эмульсии и в результате удельная поверхность дисперсной фазы начинает сокращаться с соответствующим увеличением размеров капель воды до наступления определенного стабильного состояния.

Влияние ограниченности концентрации поверхностно-активных веществ в моторном топливе на характер изменения вязкости ВТЭ при увеличении ее влажности подтвердилось при добавках в моторное топливо мазута М-40. Изменение вязкости эмульсии с добавкой 2% мазута имело качественно идентичный характер (кривая 3 на рис.6) изменению вязкости эмульсии с исходной топливной основой, однако участок монотонного роста вязкости увеличился до влажности 35%, а темп снижения вязкости с дальнейшим ростом влажности снизился с более высокими абсолютными значениями вязкости. Добавка мазута в количестве 4% практически исключила эффект снижения вязкости эмульсии (кривая 4 на рис.6) в исследованном диапазоне изменения ее влажности. Уже при 6% мазута изменение вязкости эмульсии (кривая 5 на рис.6) стало соответствовать типичному, характеру изменения вязкости эмульсий воды и топлива с практически неограниченным содержанием поверхностно-активных веществ.

Уже из анализа экспериментальных данных, приведенных на рис.6, очевидно, что дисперсность воды может существенно повлиять на вязкость эмульсии при определенных значениях ее концентрации.

Предложенная Ф.Шерманом формула для расчета вязкости эмульсий η , вода-масло, учитывающая вязкости дисперсионной среды η_c и дисперсной фазы η_f , средний радиус r капель дисперсной фазы

и ее концентрацию W , определяемую как отношение объема дисперсной фазы к общему объему эмульсии

$$\eta_s = \eta_c \cdot \left[1 + \frac{\eta_c + 5/2 \cdot (\eta_\phi + \eta_s / r) \cdot W}{\eta_c + \eta_\phi + \eta_s / r} \right] \quad (3)$$

показала тенденцию снижения вязкости эмульсии с ростом размеров дисперсной фазы.

В формуле (3) η_s - определяемая эмпирически поверхностная (3) вязкость, размерность которой и η_s , η_c , η_ϕ - Па·с; размерность r - мкм.

Учитывая общий характер формулы (3) была произведена проверка ее применимости к оценке влияния размеров дисперсной фазы на вязкость эмульсий воды и смеси моторного топлива с 30% мазута М-40. В результате было установлено (рис.5), что формулу (3) можно использовать для ВТЭ близких к монодисперсному составу со средним радиусом капель воды $r < 5$ мкм. При увеличении размеров дисперсной фазы формула (3) дает завышенные значения вязкости.

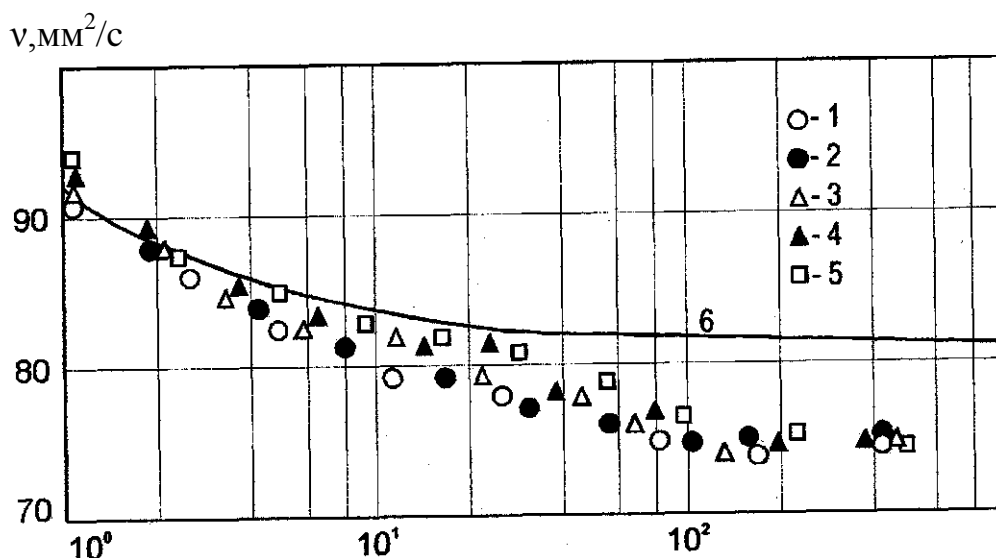


Рисунок 5- Влияние радиуса капель воды r на вязкость ν водотопливной эмульсии при различном содержании влаги в эмульсии W . 1-5 - W соответственно 1-5%; 6-расчетная вязкость по формуле (3)

Следует отметить, что значение поверхностной вязкости η_s в формуле (3) определялось обратным расчетом по экспериментальным данным вязкости эмульсий с минимальными размерами капель воды, т.к. оценка η_s по вязкости эмульсий со средними радиусами капель более 10 мкм дает более значимые отклонения расчетных результатов от экспериментальных данных.

С увеличением размеров капель воды практически для всех эмульсий с различными топливными основами (мазут, смесь мазута с моторным топливом, моторное топливо) наблюдалась общая тенденция

снижения вязкости. Обработка экспериментальных данных по близким к монодисперсным эмульсиям позволила получить эмпирическую формулу для оценки вязкости, учитывающую влияние влажности и размеров дисперсной фазы

$$\eta_s = \eta_c \cdot 3^W \cdot r^{-0,045} \quad (4)$$

Однако, при определенных значениях среднего радиуса капель воды, как это видно из кривых на рисунке 6, вязкость возрастала,

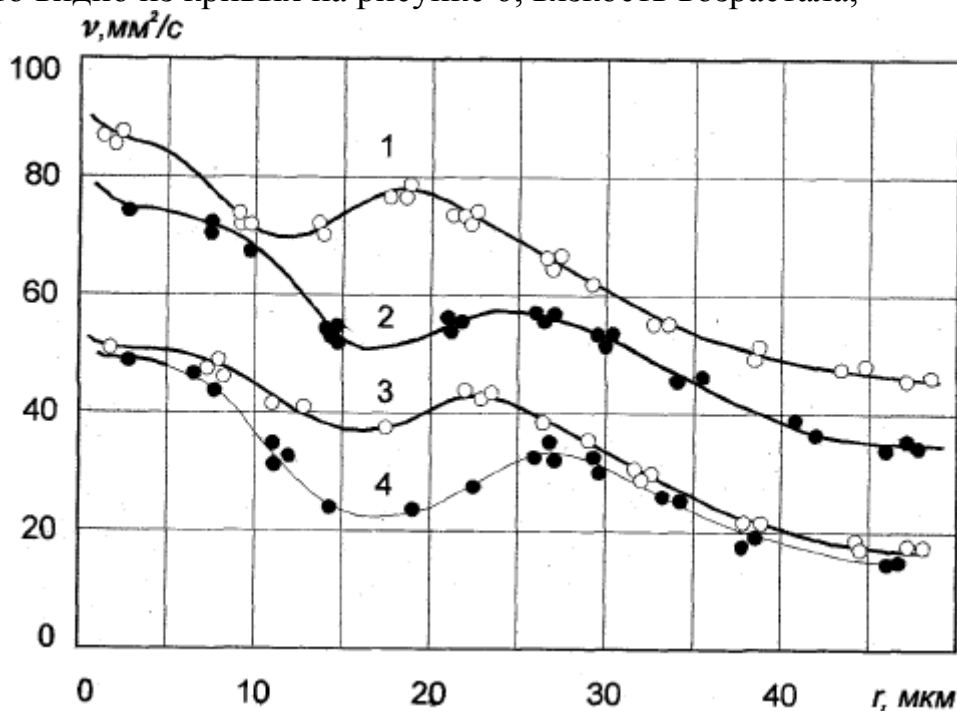


Рисунок 6- Влияние дисперсности водной фазы на вязкость эмульсии смеси мазута с моторным топливом. 1 - W=20%, t=40°C; 2 - W=20%, t=60°C; 3 - W=10%, t=50°C; 4 - W=10%, t=70°C;

проходила через максимум и затем вновь снижалась. В отдельных опытах наблюдалось наличие двух максимумов при сокращении общей тенденции снижения вязкости.

Объяснение немонотонному характеру изменения вязкости ВТЭ, по-видимому, заключается в том, что интенсивная обработка водотопливной смеси при получении мелких капель дисперсной фазы одновременно с диспергированием воды приводила к разрушению структурной основы топлива и его гомогенизации. В результате поверхностно-активные асфальтосмолистые вещества, обеспечивающие структурированность исходного топлива, образовали достаточно плотные стабилизирующие оболочки вокруг капель воды в эмульсии, значение межфазной поверхности которой в данном случае было наибольшим и определившим наибольшую начальную вязкость ВТЭ. Уменьшение

интенсивности обработки смеси сопровождается как увеличением размеров капель воды с соответствующим сокращением межфазной поверхности, так и меньшим разрушением структурированности исходного топлива и уменьшением количества адсорбированных на межфазной поверхности асфальтосмолистых веществ, следствием чего является снижение вязкости.

Объяснение аномальному возрастанию вязкости было найдено из микрофотографий, по которым проводился анализ дисперсности эмульсий. Исследуемые эмульсии со средними радиусами капелек воды до 15-20 мкм можно было отнести к монодисперсным, так как их степень дисперсности находилась в пределах 15-18%. Дальнейшее увеличение средних размеров капелек сопровождалось возрастанием степени дисперсности. В эмульсии наряду с появлением значительного количества крупных капель находилось и достаточно большое количество однородных капель воды (эту группу капель можно было бы отнести к монодисперсным), которые имели размер значительно меньше среднего (рис.7). На микрофотографиях (рис.8), соответствующих максимумам вязкости ВТЭ, было выявлено образование агрегатов и некоторой структурированности дисперсной фазы.

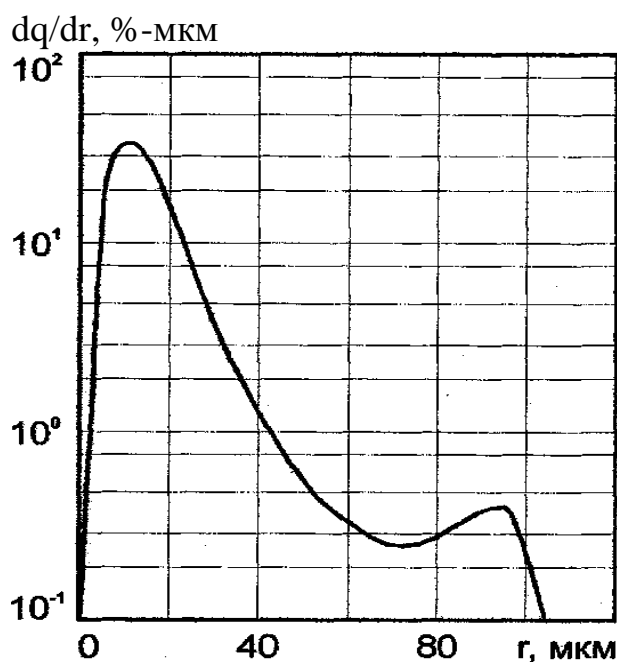


Рисунок 7- Распределение капель воды по размерам в эмульсии смеси мазута с моторным топливом.

Из подобных микрофотографий было установлено, что именно присутствие в эмульсии достаточного количества крупных капель способствует структурированию дисперсной фазы.

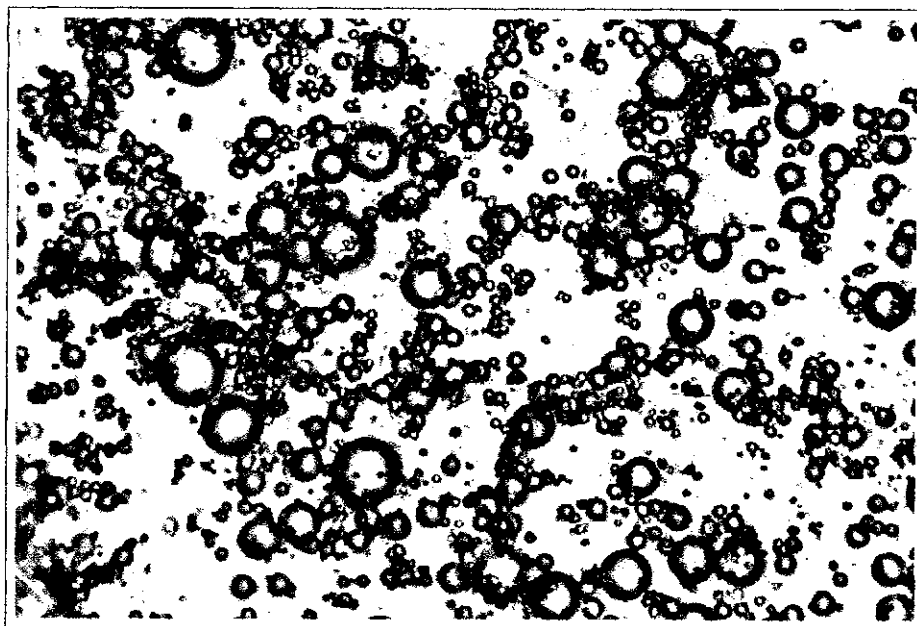


Рисунок 8- Микрофотография агрегата капель воды в водомазутной эмульсии

Агрегация капель, удерживающихся вместе Ван-дер-ваальсовыми силами притяжения, приводит к тому, что внутри структуры агрегата удерживается некоторое количество топливной фазы, т.е. агрегаты ведут себя как сферы, объем которых больше объема составляющих их капель. Соответствующее изменение эффективного объема топливной среды можно соотнести с увеличением концентрации дисперсной фазы, приводящим к росту вязкости ВТЭ. Дальнейшее увеличение среднего размера капель за счет увеличения количества крупных и уменьшения числа мелких капель воды ведет как к уменьшению межфазной поверхности с адсорбированными на ней эмульгаторами, так и к уменьшению агрегации капель и снижению объема топлива непосредственно связанного с агрегатами. Вследствие этого вязкость ВТЭ вновь начинает снижаться.

Таким образом, при проектировании и эксплуатации топливных хозяйств с учетом приготовления в них ВТЭ необходимо принимать во внимание характер изменения вязкости эмульсий в зависимости от размеров дисперсной фазы. Используя данные по вязкости эмульсий, полученные без учета дисперсных характеристик, и предполагая приготовление ВТЭ со средним диаметром капелек воды 10 мкм и менее, принятые значения вязкости в интервале температур 70-80°C необходимо увеличивать на 15-20% и вносить соответствующие коррективы в подбор технологического оборудования и трубопроводов, а также в технологические режимы подготовки ВТЭ к сжиганию.

Как нетрудно было заметить, введение новой жидкой фазы (вода) в топливо существенно изменило его свойства. И вполне правомерен будет

вывод, что изменения свойств связаны с явлениями, происходящими на поверхности раздела фаз, так как внутри объема фаз силы межмолекулярного взаимодействия взаимно скомпенсированы и свойства жидкостей не изменяются. В этом случае можно было бы ожидать изменений взаимодействия между фазами и на поверхности раздела воздух - жидкость (эмульсия).

Переход молекул из объема жидкой фазы в поверхностный слой при увеличении поверхности раздела требует совершения работы против нескомпенсированных сил межмолекулярного взаимодействия у поверхности раздела, так как равнодействующая межмолекулярных сил в поверхностном слое не равна нулю (как в объеме фазы) и направлена внутрь той фазы, в которой силы сцепления больше. Таким образом в поверхностном слое на границе двух фаз, по сравнению с энергией в объеме этих фаз, появляется избыток энергии - поверхностная энергия. Мерой нескомпенсированности межмолекулярных сил у границы раздела двух фаз служит поверхностное натяжение σ , которое для жидкостей тождественно равно их удельной, свободной поверхностной энергии. Практически поверхностное натяжение рассматривают как силу, действующую на единицу длины контура поверхности и стремящуюся сократить поверхность до минимума при данных соотношениях объемов фаз. Поверхностное натяжение σ на границе двух жидких фаз обычно называют межфазным натяжением.

При достаточно больших объемах фаз по сравнению с размерами молекул поверхностное натяжение не зависит от величины и формы поверхности. А при отсутствии внешних воздействий жидкости, благодаря поверхностному натяжению, дисперсная фаза принимает форму шара, имеющего минимальную поверхность и, соответственно, минимальное значение свободной поверхностной энергии.

Поверхностное натяжение является индивидуальным свойством жидкости и зависит в первую очередь от природы этой жидкости. С другой стороны на величину поверхностного натяжения оказывает влияние и природа той фазы, с которой она граничит. Для многих жидкостей, в том числе и для жидких топлив, достаточно обширно исследованы многие явления, наблюдающиеся на поверхности жидкость - воздух или жидкость - собственный пар. При этом было установлено, что наибольшее значение поверхностного натяжения достигает на границе с газами (воздухом). Этот факт имеет важное значение для распыливания топлива в топочном пространстве. Поверхностное натяжение связано с вязкостью топлива, оно, как правило, понижается с уменьшением начальной вязкости. Однако зависимость вязкости и поверхностного натяжения является нелинейной. Как вязкость, так и поверхностное натяжение уменьшаются с повышением температуры. Однако масштабы снижения их значений различаются в несколько десятков раз. Зависимость поверхностного

натяжения от температуры имеет прямолинейный характер и является достаточно слабой [9] и поэтому изменение поверхностного натяжения в интервале температур подогрева жидкого топлива перед сжиганием практически не сказывается на качестве распыливания топлива.

Из экспериментальных данных [9] следует, что поверхностное натяжение ВТЭ на поверхности раздела жидкость - воздух по сравнению с натяжением безводного топлива увеличивается пропорционально возрастанию концентрации в них влаги. Зависимость поверхностного натяжения водотопливных эмульсий от температуры имеет качественно идентичный характер с поверхностным натяжением «чистых» жидкостей.

Межфазное натяжение на поверхности раздела дисперсной фазы и дисперсионной среды по своей физической сущности является одним из факторов, определяющих энергозатраты и эффективность диспергирования в процессе получения водотопливной эмульсии. Снижение величины межфазного натяжения облегчает диспергирование и позволяет получить более однородные и высокодисперсные эмульсии, устойчивость которых более высока, чем грубодисперсных. Межфазная поверхность раздела между двумя жидкостями представляет собой слой молекулярных размеров, взаимно проникающий в обе фазы. Физические свойства такого слоя отличаются от свойств объемов двух соприкасающихся фаз. Величина межфазного натяжения двух жидкостей, находящихся во взаимном равновесии, определяется по правилу Антонова [17], связывающему его с поверхностным натяжением каждой жидкости:

$$\sigma_{AB} = \sigma_A - \sigma_B, \quad (5)$$

где σ_A - межфазное натяжение на поверхности раздела двух жидкостей; σ_A , σ_B - соответственно поверхностные натяжения жидкостей А и Б на поверхности раздела жидкость - газ.

Применимость этого правила для системы битум - вода установлена в работе [12]. Сопоставление [13] поверхностных натяжений воды и мазута также подтверждает применимость правила Антонова для межфазного натяжения водотопливных эмульсий.

Изучение влияния размеров дисперсной фазы на поверхностное натяжение водотопливных эмульсий на границе раздела жидкость - воздух методом счета капель. (рис. 9) показало [40], что, несмотря на некоторые изменения значений поверхностного натяжения, это

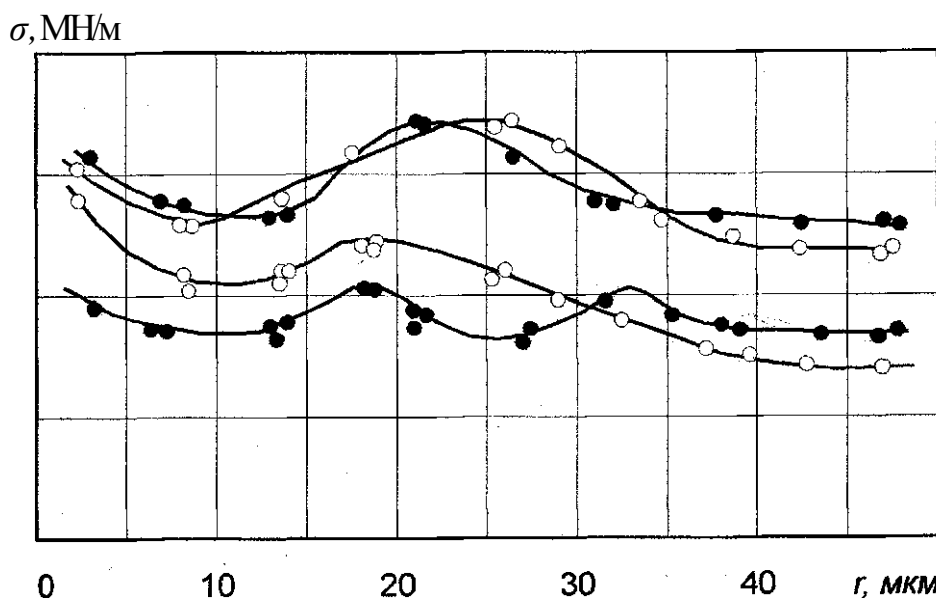


Рисунок 9- Влияние дисперсности водной фазы на поверхностное натяжение эмульсии смеси мазута с моторным топливом. 1 - W=30%, t=20°C; 2 - W=10%, t=20°C; 3 - W=30%, t=90°C; 4 - W=10%, t=90°C

влияние незначительно по сравнению со степенью влияния дисперсности на вязкость. Вместе с этим ход кривых на рисунке 8 показывает определенную корреляцию между ними, также свидетельствующую о взаимосвязи поверхностного натяжения и вязкости. С повышением температуры водотопливной эмульсии влияние размеров капелек воды на поверхностное натяжение становится еще меньше и его можно не принимать во внимание при температурах нагрева топлива перед распыливанием.

Постоянство качеств (дисперсности и равномерности распределения капелек дисперсной фазы в объеме дисперсионной среды) водо-топливных эмульсий является главным фактором эффективности их сжигания. Особенности схем топливных хозяйств, доставки жидкого топлива и подготовки его к сжиганию требуют поддержания постоянного качества водотопливных эмульсий при достаточно разнообразных условиях. Так, периодическая доставка жидких энергетических топлив железнодорожным транспортом и их разогрев с помощью водяного пара приводит к обводнению топлива в широких пределах (от 5

до 20%) и образованию грубодисперсных водотопливных эмульсий. Различаются и температурные условия хранения топлива. При резервировании, для быстрого перевода котлов с газа на мазут, его обычно хранят при температуре 40-50°C. Для высоковязких мазутов, получаемых в крекинг-процессе, температуру подогрева поддерживают на уровне 70-90°C. А подготовка топлива непосредственно перед сжиганием включает его подогрев до еще более высоких температур. Столь высокая температура подогрева приводит к разрушению структуры мазута и выпадению плотных компонентов на дно резервуаров и выделению водной фазы, что вызывает трудности в подготовке высоковязких мазутов и водных эмульсий на их основе к сжиганию.

Опыт эксплуатации топливных хозяйств [4] показывает, что на стабильность или устойчивость водомазутных эмульсий определяющее влияние оказывают физико-химические свойства топлива и воды, температура и степень обводненности, размеры дисперсной фазы и другие факторы. Нестабильное состояние эмульсий может быть вызвано несколькими процессами, согласно которым выделяют различные виды устойчивости (неустойчивости), разграничивая их на агрегативную и кинетическую устойчивость, хотя изменение характеристик (устойчивости) эмульсий является принципиально кинетическим процессом. Однако основанием к такому разграничению устойчивости может служить достаточно медленное протекание некоторых процессов при определенных условиях.

Под агрегативной устойчивостью эмульсий понимают прежде всего способность капель дисперсной фазы при их столкновении друг с другом сохранять свой первоначальный размер. Этот вид устойчивости существенно зависит от концентрации дисперсной фазы и определяется частотой и силой столкновений между диспергированными капельками. В зависимости от результатов нарушения агрегативной устойчивости различают два разных процесса: коагуляции или флокуляции и коалесценции. При коагуляции столкновение капель приводит к образованию агрегатов (рис.10) в объеме дисперсионной среды. Коалесценция же представляет процесс слияния мелких капель при столкновении друг с другом, завершающийся образованием крупных капель и даже выделением дисперсной фазы в крупные объемы. По сути, процесс коалесценции представляет переход компонентов эмульсии из метастабильного состояния в термодинамически устойчивое.

Основной причиной коалесценции является наличие свободной энергии на поверхности раздела между фазами [1]. При сближении капель разделяющая их пленка дисперсионной среды стремится приобрести меньшую свободную энергию за счет сокращения поверхности, инициируя самопроизвольный процесс коалесценции, определяемый взаимодействием межмолекулярных сил и поверхностного натяжения. Наряду с движущимися

силами, коалесценции препятствуют и оказывают сопротивление адсорбированные на поверхности раздела фаз поверхностно-активные вещества. Для осуществления коалесценции необходимо преодолеть энергетический барьер работы адсорбции $\Gamma O \backslash V$, так как коалесценция сопровождается десорбцией ПАВ.

Диспергирование водомазутной смеси приводит к резкому увеличению поверхности раздела между фазами, на которой, за счет адсорбционных процессов, концентрируются природные стабилизаторы, образующие механически прочный слой поверхностно-активных веществ, обеспечивающих высокую устойчивость водомазутной эмульсии. При случайных столкновениях диспергированных капель воды, покрытых высоковязким адсорбционно-соль ватным слоем, обладающим упругостью и механической прочностью, его поверхность сопротивляется значительным разрушающим усилиям и не прорывается, что препятствует коалесценции вплоть до полной агрегативной устойчивости. У ВТЭ, образованных из маловязких топлив, практически не содержащих природных эмульгаторов, агрегативную устойчивость обеспечивают введением специальных эмульгаторов.

Особым видом нестабильного состояния водотопливных эмульсий будет самопроизвольное обращение фаз, то есть переход от эмульсии типа вода — масло к эмульсии масло - вода. Известно, что концентрация плотно упакованной монодисперсной фазы теоретически составляет 74%. Тогда обращение фаз в водотопливной эмульсии должно начаться с влажности эмульсии 75%. В реальных эмульсиях с полидисперсной водной фазой ее концентрация при плотной упаковке может превышать 75%. Кроме повышения концентрации водной фазы, на обращение фаз может существенно повлиять увеличение температуры. Столь высокое содержание влаги в топливе используется только в особых случаях, например, при термическом обезвреживании загрязненных сточных вод, а в энергетических агрегатах, несмотря на принципиальную возможность сжигания водотопливных эмульсий с содержанием влаги до 65-67% [3], для поддержания высокой экономичности топливосжигающих агрегатов влажность эмульсий не должна превышать 10%.

Кинетическая или седиментационная устойчивость характеризует способность эмульсионной системы противостоять всплыванию или оседанию дисперсной фазы под действием сил тяжести, как правило, в гравитационном поле. Седиментационные процессы в эмульсиях обусловлены разностью плотностей дисперсионной среды и дисперсной фазы и приводят к образованию слоя концентрированной эмульсии или полному разделению фаз. Теоретически скорость седиментации определяется законом Стокса, исходящего из закономерностей движения сферических твердых частиц радиусом r в среде с

постоянной вязкостью и плотностью. Для реальных монодисперсных эмульсий скорость седиментации определяется по формуле [1]:

$$u = \frac{2 \cdot g \cdot r^2 \cdot (p_{\phi} - p_c)}{3 \cdot \eta_c} \cdot \frac{\eta_{\phi} + \eta_c}{3 \cdot \eta_{\phi} + 2 \cdot \eta_c}, \quad (6)$$

где g - ускорение свободного падения; p_{ϕ} , p_c - плотности дисперсной фазы и дисперсионной среды.

Из формулы (7) видно, что на процесс осаждения (как и на процесс стабилизации водной фазы в топливе) будут влиять следующее основные факторы: разность плотностей воды и топлива, размер капель воды в топливе, вязкость топлива и, в значительно меньшей мере, вязкость воды. Анализируя возможное влияние этих факторов на кинетическую устойчивость водотопливных эмульсий необходимо отметить, что движущая сила седиментации - разность плотностей фаз для водомазутных эмульсий может быть очень малой $p_{\phi} - p_c$ до 4 кг/м^3 . При плотности маловязких мазутов значительно ниже плотности воды, седиментация протекает сравнительно быстро. У высоковязких крекинг мазутов плотность близка к плотности воды и даже превышает ее [1]. В этом случае разность плотностей практически мало влияет на процесс седиментации, а в большей мере способствует стабилизации, находящейся в топливе воды.

При движении капель водной фазы в топливной среде их взаимодействие между собой выражается гидродинамическим сопротивлением движению, проявляющемся в пограничном слое, окружающем каплю. В реальных эмульсиях применение формул для расчета скорости седиментации одиночных капель будет справедливым только для определенного предела объемной концентрации дисперсной фазы равного 2-5%, когда взаимодействием капель можно пренебречь. При больших значениях концентрации полидисперсных капель седиментация каждой отдельной капли будет происходить в стесненных условиях при столкновении с другими каплями и некотором противодействии движению вытесняемой дисперсионной среды. При отсутствии коалесценции или агрегатирования капель скорость стесненной седиментации будет уменьшаться и ее можно приближенно оценить по скорости седиментации одиночной капли с введением поправочных множителей. Однако конвективные токи и образование агрегатов могут привести к изменению значений скорости седиментации реальных эмульсий, по сравнению со значениями, получаемыми по известным уравнениям для однородных распределений дисперсной фазы.

Определяющее влияние на устойчивость водотопливных эмульсий оказывает вязкость топлива при практически слабом влиянии вязкости дисперсной фазы (воды). Высокая вязкость оказывает значительное

сопротивление перемещению капель как в процессе коалесценции, так и при седиментации. При достаточно больших значениях вязкости можно обеспечить устойчивость эмульсии и без введения поверхностно-активных веществ. Однако такие условия для водо-топливных эмульсий можно создать только при существенном снижении их температуры. В.М.Ивановым [24] было установлено, что подвергнутые замораживанию при -30°C водомазутные эмульсии влажностью 20,30 и 40% после отогревания полностью сохраняли свою структуру. Эксперимент [25] по длительному «холодному» хранению водомазутной эмульсии (на основе мазута М100), полученной с помощью диспергатора, показал, что высокодисперсные, однородные эмульсии обладают высокой стабильностью, особенно при невысокой температуре хранения. После года хранения эмульсии при температуре 20°C водных линз и прослоек не наблюдалось. Количество отстоявшейся воды было незначительным, отношение массы отстоявшейся воды G_0 к массе воды, введенной в топливо G_n , для эмульсий с начальной влажностью 6 и 15% составило соответственно 0,01 и 0,05.

Иные температурные условия для обводненных топлив и водомазутных эмульсий создаются при их хранении в резервуаре и подготовке к сжиганию. Увеличение температуры водо-мазутной эмульсии связано с резким снижением вязкости топлива и более сильной зависимостью уменьшения плотности топлива, чем у воды. Несмотря на это стабильность высокодисперсных водомазутных эмульсий остается высокой и при нагревании их до $90-92^{\circ}\text{C}$. Показывают достаточно высокую стабильность и некоторые другие водотопливные эмульсии после их кратковременного нагревания. Разнообразные температурные условия при приготовлении или образовании водотопливных эмульсий, их хранении, транспортировке и подготовке к сжиганию не позволяют добиться условий, полностью соответствующих их стабильному состоянию. И поэтому в водотопливных эмульсиях всегда остается возможность для процессов частичной седиментации, повысить устойчивость к которой можно уменьшением размеров капелек воды, диспергированных в топливе. Верхняя граница дисперсных систем, в том числе и эмульсий, длительное время сохраняющих стабильность за счет теплового движения молекул дисперсионной среды, составляет 1-5 мкм. Вследствие этого высокодисперсные однородные эмульсии сохраняют достаточную устойчивость при хранении в течение нескольких месяцев [4].

Как уже отмечалось, использование высокообводненных жидких топлив сопряжено с большими затруднениями в эксплуатации топочных устройств, а сжигание высоковлажных водотопливных эмульсий снижает экономичность топливосжигающих агрегатов. В связи с этим, наряду с желанием обеспечить стабилизацию мелких капель воды в объеме топлива в виде эмульсии, в ряде случаев возникает

необходимость инициирования седиментационных процессов, позволяющих осадить крупные капли и удалить отстоявшуюся воду.

Процесс разделения воды и топлива определяется коалесценцией капель воды, которая при седиментации происходит следующим

образом [13]. Оседающие капли у дна резервуара замедляют свое движение и накапливаются, образуя эмульсионный слой, концентрация воды в котором значительно выше концентрации исходной эмульсии. По мере увеличения толщины этого слоя растет его давление на нижние капли, что способствует их более быстрой коалесценции и образованию границы раздела сплошных фаз. Однако интенсифицировать эти процессы достаточно сложно, а для высоковязких, тяжелых мазутов практически невозможно, так как вода, убывая из верхних слоев, выпадает из мазута в незначительных количествах, сосредотачиваясь в виде прослоек и линз в средних и нижних слоях топлива. Так, при отстаивании обводненного сернистого мазута в течении пяти суток при температуре 50-70°C выделилось только 20% содержащейся в нем воды и около 70% всей не отстоявшейся воды располагалось послойно в нижних слоях резервуара [5].

Для высоковязких мазутов дальнейшее увеличение температуры хранения, позволяющее интенсифицировать отстой воды, ограничивается как по технико-экономическим показателям (значительные затраты теплоты на длительное поддержание высокой температуры), так и по требованиям безопасности (возможность вспенивания и выброса обводненного мазута из резервуара). Таким образом, практически воздействовать на процессы седиментации и коалесценции, связанные с движением и осаждением водной фазы, присутствующей в мазуте, можно в основном путем изменения размеров капель воды, определяемых качеством ее диспергирования в топливе. При подогреве мазута подогревателями, расположенными в резервуаре, или циркуляционном подогреве с малой интенсивностью перемешивания процессы осаждения воды могут ускориться за счет конвективных токов в объеме резервуара, т.к. грубодисперсные капли значительно отличающиеся в размерах будут двигаться с разными скоростями и вероятность их столкновения между собой возрастает.

С целью определения условий стабилизации или осаждения водной фазы из мазута М100 были проведены экспериментальные исследования на специальной отстойной колонне высотой 6 м, в которой обеспечивались условия, близкие к условиям отстаивания мазута в резервуарах мазутных хозяйств [14]. Перед подачей в отстойную колонну водомазутные смеси подвергались обработке в мешалке и диспергаторе роторно-пульсационного типа с целью получения эмульсий с различными размерами капель воды. В ходе исследований регистрировались следующие параметры: начальную влажность W_H , %, и средний диаметр d_H , мкм, дисперсной фазы водомазутных эмульсий; влажность W и средний диаметр d дисперсной фазы на разных уровнях

отстойной колонны; время отстаивания т/ч; температура подогрева эмульсии t , °С.

При разогреве мазута водяным паром и его перекачке в резервуары мазутохранилища создаются условия, способствующие образованию грубых полидисперсных эмульсий. Оценка дисперсности воды в мазуте показала, что размеры основной массы капель воды составляют 1,5-3 мм, отдельных включений - 6-8 мм. Отстаивание таких эмульсий с содержанием влаги 6, 10, 15 и 20% при температуре $t=60^{\circ}\text{C}$ и продолжительности отстаивания достигающей 200 ч и более показало, что осаждение воды из мазута наиболее интенсивно происходит в течение первых 80-100 ч, после чего этот процесс замедляется. При этом была выявлена типичная картина образования прослоек и крупных включений воды на среднем и нижнем уровне хранящейся эмульсии. Причиной такого расслоения является, повидимому, увеличение плотности и вязкости топлива в нижних слоях, так как вместе с каплями дисперсной фазы эмульсии в процесс седиментации участвуют и другие высокоплотные компоненты мазута, увеличивающие плотность нижних слоев и образующие между собой агрегаты, структуры которых повышают вязкость, что совместно приводит к относительной стабилизации крупных включений воды в мазуте. Результаты опыта свидетельствуют о невысокой эффективности применяемой в практике эксплуатации мазутных хозяйств технологических операций по отстою воды из топлива. Применение отстоя воды из топлива будет оправдано лишь при высокой степени обводненности, превышающей 10%.

В результате отстоя, удаления части воды и рециркуляционного подогрева эмульсии в резервуаре ее дисперсные характеристики претерпевают изменения. Крупные глобулы воды, коалесцируя с мелкими каплями и между собой, седиментируют и, по мере образования сплошного слоя воды на дне резервуара, удаляются с отстоявшейся водой. При этом размеры оставшихся капель воды и ее концентрация в топливе уменьшаются, что вносит свои изменения в ход процесса отстоя и хранения эмульсии. Для учета влияния дисперсных характеристик эмульсии на эти процессы водомазутную смесь обрабатывали в мешалке и диспергаторе. Так как эмульсия готовилась путем тщательного предварительного перемешивания смеси воды и топлива в емкости и последующей обработки в мешалке или диспергаторе, то оценка равномерности распределения влаги, проводимая по анализу ряда проб в процессе заполнения отстойной колонны, показала значения коэффициента вариации $<10\%$, свидетельствующие о высокой гомогенности смеси.

3.5 Влияние воды, диспергированной в жидком топливе, на процессы горения и образования вредных веществ.

Несмотря на значительное развитие теории горения, исключительная сложность и взаимосвязь физических и химических процессов, разнообразие условий горения и другие факторы существенно ограничивают применимость теоретических результатов для описания процессов в промышленных топочных камерах. Как установлено в настоящее время, главная стадия всего процесса горения - процесс выделения энергии (теплоты) в химических реакциях, не только заканчивается полным окислением исходных компонентов топлива, но и сопровождается образованием вредных токсичных соединений. И этот факт, в свете экологических требований к работе топливосжигающих агрегатов, вносит дополнительные сложности как в исследования процессов горения, направленные на предотвращение и снижение образования вредных веществ, так и в организацию процессов горения на конкретных топливосжигающих агрегатах.

Наличие в топливе воды, являющейся теплопоглощающим компонентом и в большинстве случаев балластом, оказывает существенное влияние на характер физических процессов и химических реакций протекающих при горении жидкого топлива. Однако, сжигание топлива с диспергированной в нем водой изменил взгляд на воду, как на балласт ухудшающий эффективность процессов горения, и на ее роль в этих процессах. Отсутствие определенности в вопросах влияния воды на процессы горения водомазутной эмульсии вызывает необходимость экспериментального исследования этих процессов и теоретического рассмотрения явлений протекающих в топочной камере.

3.6 Выгорание факела водо-топливных эмульсий.

Прежде чем перейти к анализу выгорания, связанного с химическими реакциями между компонентами топлива и воздуха, необходимо отметить, что сравнивается горение топлив отличающихся не только составом (влажностью), но и тем, что диспергирование водной фазы в топливе в большинстве случаев связано и с гидромеханической обработкой собственного топлива. Преобразование обводненного топлива в ВТЭ влечет за собой изменение его реологических свойств - вязкости и поверхностного натяжения - что, при равных температурах подогрева безводного топлива и эмульсии в свою очередь является причиной увеличения дисперсности распыла эмульсии. С другой стороны, гидромеханическая обработка топлива вместе с диспергированием водной фазы может обеспечить диспергирование и других компонентов (карбоидов, механических примесей, минеральных частиц и т.п.), сопровождающееся изменением структуры топлива с распадом асфальтено-смолистых систем и перераспределением этих наиболее тяжелых компонентов по всему объему топлива.

В зависимости от способа и применяемого для эмульгирования аппарата при механических воздействиях на топливо, вследствие

неравномерного распределения внутренних напряжений или локализации энергии удара, возможен разрыв химических связей приводящий к образованию активных частиц - свободных радикалов называемый механокрекингом [18, 23, 25]. В отличие от образования активных частиц при сгорании топлива, их образование при механокрекинге является следствием принципиально иной причины - механоинициирования при низких температурах возникающего в результате не чисто механических низкочастотных, а более сложных воздействий (ультразвук, электрогидравлический удар), где собственно механическая составляющая может вносить и не основной вклад в инициирование процесса образования активных частиц. Образующиеся в результате крекинга фрагменты молекул, свободные радикалы обладают высокой химической активностью и оказывают положительное влияние на сгорание топлива. Поэтому рассматривая результаты экспериментов по сжиганию ВТЭ следует иметь в виду два противоположных фактора улучшение структуры топлива и увеличение дисперсности распыла.

При сжигании жидкого топлива в камерных топках основные особенности процессов горения проявляются главным образом на начальном участке факела, где в продуктах горения присутствуют жидкие, газообразные и твердые компоненты. Относящиеся к твердым продуктам неполного сгорания коксовые частицы и мелкодисперсная сажа являются компонентами загрязняющими атмосферу, а также сорбентами для более опасных загрязнителей - канцерогенных полициклических ароматических углеводородов, механизм образования которых близок к образованию сажистых частиц.

Развитие процессов горения жидкого топлива зависит как от состава и свойств самого топлива, так и от индивидуальных особенностей горелочных устройств [28], обеспечивающих смешение топлива с окислителем (воздухом), конфигурации топочной камеры и режимных факторов сжигания, характеризующихся нагрузкой топливосжигающего агрегата и соотношением топливо-воздух (коэффициентом избытка воздуха) и другими параметрами. Поэтому сопоставление результатов, полученных на различных топочных и горелочных устройствах необходимо производить с учетом конструктивных и режимных особенностей этих устройств.

Для исследования процессов сжигания эмульсий и определения оптимальных характеристик эмульсии и режимных параметров, решения вопроса повышения экономичности и снижения выбросов токсичных и вредных компонентов продуктов сгорания были проведены исследования локальных характеристик - полей концентраций продуктов горения, температур и тепловых потоков по длине факела, развивающегося в топочной камере водогрейного котла Универсал-6 при

сжигании мазута М-100 и его эмульсий с водой. Для устранения возможных изменений дисперсного состава, водотопливные эмульсии готовились непосредственно перед котлом в роторном аппарате. Измерения температур факела производились водоохлаждаемыми отсосными термопарами используемыми также как газозаборные трубки и выполненными в двух вариантах: прямая и с рабочим концом плавно изогнутым под 90° на расстояние 300 мм от оси трубки. Изогнутой термопарой проводились измерения в местах недоступных для прямой термопары.

4 Разработка роторного аппарата для сжигания водо-топливных эмульсии и экспериментальные исследования

4.1 Теплотехнические характеристики водотопливных эмульсий

В практике проектирования и эксплуатации мазутных хозяйств и топливосжигающих агрегатов и расчетов процессов сжигания приходится оперировать различными теплотехническими характеристиками жидких топлив и их продуктов сгорания. Диспергирование в жидком топливе воды и его сжигание в виде водотопливной эмульсии изменяет эти характеристики и их зависимости от внешних параметров и, в первую очередь, от содержания влаги в топливе.

Технологические процессы слива топлива из цистерн, хранения в резервуарах, подготовка к сжиганию и, собственно, сжигание связаны с изменением температуры топлива или необходимостью поддерживать ее на определенном уровне. При этом подвод теплоты к топливу обеспечивается различными способами [26]. Для расчета теплообменных процессов, связанных с нагреванием водотопливных эмульсий, необходимо располагать данными по теплообменным свойствам как компонентов водотопливной эмульсии, так и по эмульсии в целом, с учетом ее дисперсных характеристик.

При практических расчетах зависимостью теплоемкости жидкости от давления можно пренебречь. И для воды в, в пределах температур нагрева и давлений, имеющих место при подготовке жидких топлив к сжиганию, ее значение можно принять равным $4,19 \text{ кДж/(кгК)}$. Однако зависимость теплоемкости воды от температуры в отличие от теплоемкости мазута, имеет нелинейный характер с минимальным значением при температуре около 40°C , и эту нелинейность необходимо учитывать при перегреве воды, находящейся в метастабильном состоянии [15, 17, 18]. Теплоемкость водотопливных эмульсий пропорциональна содержанию ее компонентов и определяется как теплоемкость смесей.

Из полученных В.М.Ивановым [24] экспериментальных данных следует, что теплопроводность водомазутных эмульсий относительно

слабо зависит от температуры. До влажности эмульсии 20% наблюдается общая с многими капельными жидкостями тенденция снижения теплопроводности с ростом температуры. Однако дальнейшее повышение содержания влаги меняет эту тенденцию на противоположную. Это изменение и общее повышение теплопроводности водотопливных эмульсий с повышением концентрации водной фазы вызвано более высоким уровнем теплопроводности воды по сравнению с теплопроводностью жидких топлив и аномальным характером ее зависимости от температуры [9, 10].

Экспериментальная оценка влияния дисперсных характеристик водной фазы на теплопроводность водотопливных эмульсий, выполненная на опытной установке по методу цилиндрического слоя, показала, что с уменьшением размеров капель воды и повышением их монодисперсности уменьшилась погрешность измерений при практически идентичном среднем значении теплопроводности.

Предпринятая В.М.Ивановым [24] проверка применимости расчетных зависимостей для определения теплопроводности смесей жидкостей, показала, что теплопроводность водомазутных эмульсий достаточно хорошо описывается формулой Максвелла:

$$\lambda_{\Sigma} = \lambda_T \cdot \frac{1 + (1 - \lambda_T / \lambda_B) \cdot W}{1 + (k - 1) \cdot W}, \quad (7)$$

и уравнением Л. П. Филипова:

$$\frac{\lambda_{\Sigma} - \lambda_T}{\lambda_B - \lambda_T} = c \cdot W^2 + W \cdot (1 - c), \quad (8)$$

В этих зависимостях λ_{Σ} , λ_T , λ_B , - теплопроводность эмульсии, топлива и воды; W - в формуле Максвелла объемная доля воды, в уравнении Л.П.Филипова и в следующих уравнениях массовая доля

воды; $k = 3\lambda_T / (2\lambda_T + \lambda_B)$; c - константа смеси. Если экспериментальное значение c неизвестно, его обычно принимают равным 0,72 [167].

Дополнительная проверка других зависимостей [17] для теплопроводности смесей жидкости позволила установить, что кроме приведенных выше зависимостей для определения теплопроводности водотопливных эмульсий могут найти применение следующие уравнения.

Уравнение Национальной инженерной лаборатории (НИЛ) США имеет вид:

$$\frac{\lambda_{\Sigma} - \lambda_T}{\lambda_B - \lambda_T} = \alpha \cdot W^{3/2} + W \cdot (1 - \alpha) \quad (9)$$

где α - константа смеси. Значения этой константы находятся в пределах приблизительно от 0,1 до 1,0; поскольку значения α обычно неизвестны, часто принимается $\alpha=1$.

Для моделирования типичной зависимости между теплопроводностью и составом смеси двух жидкостей, в работе [16] предложено соотношение, использующее правило аддитивности:

$$\lambda_{\Sigma}^r = V\lambda_T^r + W\lambda_B^r = (1-W)\lambda_T^r + W\lambda_B^r, \quad (10)$$

где $V=(1-W)$ - массовая доля топлива; r - параметр.

Для получения более точных результатов значения параметра r выбираются. При $r=1$ λ_{Σ} определяется по правилу аддитивности. Из этого соотношения следует, что увеличение параметра $r > 1$ или его уменьшение $r < 1$ влечет за собой соответствующее направление изменения значения теплопроводности λ_{Σ} , вычисленного по правилу аддитивности.

Уравнение Ли было предложено для теплопроводности многокомпонентных смесей жидкостей, а для бинарных систем оно принимает вид

$$\lambda_{\Sigma} = V^2\lambda_T + 2VW\lambda_B + W^2\lambda_B, \quad (11)$$

где $\lambda_{\Sigma} = 2(\lambda_T^{-1} + \lambda_B^{-1})^{-1}$. Уравнение Джордана – Коутса

$$\frac{\alpha\lambda_{\Sigma}}{(\alpha\lambda_T)^V(\alpha\lambda_B)^W} = \{\exp[\alpha f(\lambda_B - \lambda_T)] - 0,5\alpha f(\lambda_B + \lambda_T)\}^{VW}, \quad (12)$$

В исходном соотношении Джордана - Коутса были использованы значения теплопроводности во внесистемных единицах измерения, поэтому α и f - коэффициенты пересчета, равные соответственно $3,3 \cdot 10^{-2}$ и 13,8.

Оценка точности рассмотренных расчетных методов, по экспериментальным данным [4, 24] для эмульсий воды с мазутом, керосином и газовым бензином, приведена в табл.1.

Сравнение данных, приведенных в табл.1 показывает, что рассмотренные зависимости практически адекватно описывают экспериментальные значения коэффициентов теплопроводности водомазутных эмульсий. Средние погрешности уравнений А не превышают 4%. Необходимо отметить, что константа смеси для уравнения НИЛ и параметр в соотношении, использующем правило аддитивности, были подобраны и их значения составили $a=1,1$ и $r=-2,2$. Теплопроводность водокеросиновых эмульсий

описывается рассмотренными зависимостями менее точно, причем соотношение, использующее правило аддитивности, при $r=0,4$ хорошо согласуется с экспериментальными данными в области концентрации водной фазы $W>30\%$, а остальные уравнения, в том числе НИЛ при $a=0,9$, согласуются с опытом при меньших концентрациях воды. Для эмульсий воды и газового бензина среднюю погрешность меньше 10% дало только уравнение НИЛ.

Таблица 1- Погрешности методов расчета теплопроводности водомазутных эмульсий, %.

Содержание воды в топливе, %	Уравнение или соотношение					
	Максвелла	Л.П. Филлипова	НИЛ	Аддитивности	Ли	Джордана Коутса
3,5	+2,5	+2,5	-	+2,91	+3,33	+4,17
5	+1,56	-2,31	-5,47	-1,56	-1,56	+0,78
10	+1,51	+0,76	+0,76	+2,27	+3,03	+3,79
10	-3,57	-5,00	-5,00	-3,57	-2,86	-2,14
20	-4,38	-3,13	-5,00	-3,13	-	+0,63
30	-2,78	+1,67	+2,22	-0,56	+4,76	+4,44
40	-2,93	+5,85	+8,29	+0,98	+9,27	+6,83

Если в уравнениях Максвелла, Ли и Джордана - Коутса для расчета теплопроводности используются только исходные данные, характеризующие непосредственно компоненты эмульсии (k_t , X_v , V , W), то в остальные зависимости введены параметры, численные значения которых принимаются исходя из априорной информации или определяются из опыта. Возможность подбора значений параметров, обеспечивающих совпадение расчетных значений теплопроводности с локальными экспериментальными данными, позволяет получить расчетные формулы, учитывающие конкретные особенности эмульсии.

Для обеспечения эффективного сжигания жидкого топлива важное значение имеет его подогрев перед подачей в топочное устройство. В большинстве схем мазутных хозяйств для этой цели используют подогреватели типа труба в трубе, реализующие способ теплообмена между нагреваемой и греющей средами через стенку трубы. Очевидно, что изменение характеристик топлива при диспергировании в нем воды влечет за собой и изменение характеристик теплообмена между стенкой трубы и водотопливной эмульсией.

Приведенные в работе [20] критериальные зависимости для определения коэффициента теплоотдачи предполагают отсутствие процессов кипения в жидкости. При нагреве водомазутных эмульсий такая ситуация может возникнуть, так как температура воды значительно ниже температуры

кипения мазута. Подобный случай теплоотдачи от греющей поверхности к эмульсии при условии, когда ее дисперсная фаза перегревается на поверхности и в прилегающем к ней слое, а температура кипения дисперсионной среды выше температуры поверхности, рассматривался в работах [7, 20, 23]. Результаты, полученные в этих работах, интересны еще и потому, что исследовались эмульсии воды и кремнийорганической жидкости ПМС-300 и ПЭС-4 с концентрацией воды до 15% и размерами дисперсной фазы 5-10 мкм. Компоненты смеси имели примерно равную плотность и получаемые из них эмульсии были достаточно устойчивы.

Коэффициенты теплоотдачи определялись при ламинарном режиме течения эмульсии или чистой жидкости, Red000. Температура эмульсий вода - ПМС-300 на входе в измерительный участок была 40°C и 99°C, эмульсий вода - ПЭС-4 - 60°C. Результаты измерений представлены на рис.10 в виде зависимости коэффициента теплоотдачи α от перепада температур $\Delta t = t_c - t$ между температурой греющей поверхности t_c и температурой t эмульсии с содержанием воды до 3,2% или чистой жидкости.

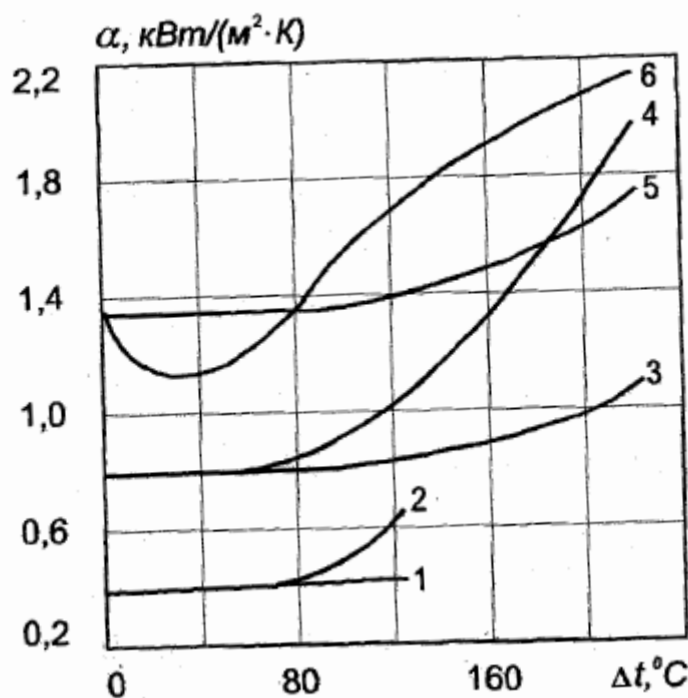


Рисунок 10- Зависимость коэффициента теплоотдачи от перепада температур между стенкой и жидкостью. 1 и 2 – кремний органическая жидкость ПЭС-4 и эмульсия воды в ней, температура жидкости 40°C; 3 и 4 - тоже ПСМ-300, 60°C; 5 и 6 - то же ПСМ-300, 99°C

С увеличением температуры поверхности нагрева, до значения меньшего температуры кипения воды, значения коэффициентов теплоотдачи слабо возрастают и практически совпадают как для эмульсий, так и для чистых жидкостей, что объясняется незначительным различием их теплофизических свойств, при малой концентрации дисперсной фазы. При повышении температуры поверхности нагрева $t_c > 100^\circ\text{C}$ коэффициент теплоотдачи к эмульсиям начинает возрастать более интенсивно, чем у чистых кремнийорганических жидкостей, что свидетельствует о существенном изменении характера теплообмена, вызванном вскипанием капелек воды. Режим теплоотдачи становится близким к режиму пузырькового (поверхностного) кипения чистой жидкости. Однако, в отличие от кипения чистых жидкостей, в эмульсии не догретой до температуры кипения дисперсионной среды, вскипают только капельки дисперсной фазы.

При проведении исследований [22, 23] было установлено, что вскипание капелек воды начинается не с температуры поверхности нагрева $t_c = 100^\circ\text{C}$, а несколько задерживается до температуры

$t_c \approx 120^\circ\text{C}$, нагрев теплоносителей до температуры 99°C [37] показал, что принципиальных различий при теплообмене чистых жидкостей, нагретых до 40 или 99°C нет. Характер же теплообмена эмульсии, нагретой до 99°C имеет значительные отличия. Нагрев эмульсии практически до температуры насыщения воды приводит к тому, что вскипающие капельки не конденсируются при отходе от поверхности нагрева и начинают в большей мере, чем при $t = 40^\circ\text{C}$, экранировать ее. Условия теплоотдачи ухудшаются и коэффициент α падает. С дальнейшим ростом температуры поверхности нагрева число вскипающих капелек увеличивается, происходит интенсивная турбулизация пристеночного слоя и коэффициент теплоотдачи быстро возрастает.

Вблизи температуры предельного перегрева воды $t \approx 300^\circ\text{C}$ вскипание уже носит взрывообразный характер. Причины и условия взрывообразного вскипания диспергированных в высококипящих жидкостях капелек воды будут рассмотрены далее, а здесь стоит заметить, что с началом вскипания дисперсной фазы режим течения эмульсии уже не будет являться ламинарным несмотря на низкое значение числа Рейнольдса. И поэтому при расчетах теплоотдачи к водотопливным эмульсиям необходимо учитывать существенную интенсификацию теплообмена, внося соответствующие коррективы, для которых, в качестве первого приближения, можно использовать отношение значений коэффициентов теплоотдачи из рис.14. При этом необходимо учитывать, что графики построены для определенных начальных температур эмульсий, нагреваемых при атмосферном давлении, а с ростом давления, как известно, температура насыщения воды повышается.

В относительно небольших мазутных хозяйствах промышленноотопительных котельных подогрев мазута перед сжиганием производят не только в поверхностных теплообменниках, но и непосредственно в резервуарах, посредством змеевиковых паровых трубчатых нагревателей. При подогреве водотопливных эмульсий в объеме резервуара необходимо также учитывать разные температуры кипения воды и топлива, так как вскипание водной фазы приводит к вспениванию нагреваемого объема эмульсии и его выбросам из резервуара. Кроме вскипания воды, процесс вспенивания усиливается и испарением легкокипящих фракций топлива.

Рассматривая температуру кипения, как температуру, при которой происходит переход вещества из жидкого состояния в парообразное по всему объему вещества, а не только на поверхности, как при испарении, можно заметить, что для эмульсий воды с жидкостями, кипящими при температурах значительно превышающих 100°C , температура кипения неоднозначна. Еще более неоднозначно определение температуры кипения водотопливных эмульсий, так как такие простые, химически однородные жидкости, как вода, кипят и превращаются в пар при некоторой постоянной температуре, а сложные нефтяные топлива, напротив, состоят из смеси многих соединений, каждое из которых имеет индивидуальную температуру кипения. Поэтому температура кипения котельных топлив изменяется, повышаясь по мере выкипания более летучих компонентов, и кипение топлива происходит в пределах температур, определяемых температурами кипения компонентов, входящих в состав топлива.

Практически температурные пределы кипения многокомпонентных котельных топлив находят путем их перегонки, по результатам которой получают фракционный состав и пределы выкипания фракции. Так как температура кипения фракций мазутов и других котельных топлив значительно превышает температуру кипения воды и топливо нагревается до температуры кипения, как правило, непосредственно в топочном пространстве, когда процесс испарения большинства фракций происходит практически одновременно, то для расчетов горения часто используют только среднюю температуру кипения, определяемую как отношение суммы средних температур выкипания отдельных фракций к числу температурных интервалов. Экспериментально определенные значения температуры кипения прямогонных мазутов изменяются в пределах $196\text{--}300^{\circ}\text{C}$, а крекинг остатков - $240\text{--}335^{\circ}\text{C}$ [28].

Увеличение температуры кипения эмульсий с водной дисперсной фазой выше 100°C , в первую очередь, связано с размерами дисперсной фазы, влияние которых на вскипание диспергированных капелек воды и физические процессы, происходящие при этом, будут объяснены при рассмотрении микровзрывов капель эмульсии. Здесь же отметим [26], что для

каждой капли воды, окружающая ее поверхность топлива будет представлять собой своеобразную поверхность нагрева, через которую подводится тепло к капле. А обеспечение процессов теплообмена, как известно, предполагает наличие градиента температур и поэтому, при определенной температуре кипения капле дисперсной фазы, температура дисперсионной среды (топлива) должна быть несколько выше, то есть для вскипания дисперсной фазы необходим перегрев дисперсионной среды относительно температуры кипения дисперсной фазы.

Другой причиной повышения температуры кипения ВТЭ является повышение давления, по сравнению с давлением окружающей среды, внутри капелек воды, вызванное действием сил межфазного натяжения. Для высокодисперсных эмульсий температура кипения, определяемая этим эффектом, может достигать 130°C и более [26].

Рассматривая температуру кипения ВТЭ как температуру нагрева, при которой начинает появляться конденсат в обратном холодильнике при анализе эмульсии на влажность по методу Дина-Старка, при различных размерах дисперсной фазы и сравнивая данные исследований [25] по температурам вспенивания и вскипания водомазутных эмульсий с неопределенными размерами дисперсной фазы, приведенным в табл.3, можно сделать следующие выводы: 1) размеры дисперсной фазы эмульсий слабо влияют на температуру вспенивания, которая определяется в основном испарением легкокипящих фракций топливной основы; 2) температура вскипания дисперсной

Таблица 2- Температуры начала вспенивания и вскипания водомазутных эмульсии.

Размер капль воды, мм	Влажность эмульсий, %			
	12,7	20,0	31,4	36,0
Температуры начала вспенивания, °C				
1	86	87	89	89
10	87	88	89	89
100	87	87	88	90
1000	86	88	89	90
Данные [25]	88	89	90	92
Температуры начала вскипания, °C				
1	176	170	130	109
10	171	168	126	107
100	162	157	119	105
1000	153	150	114	103
Данные [25]	103	106	109	113

фазы определяется ее размерами, резко возрастающая с уменьшением последних, и приближается к температуре кипения воды при нормальных условиях при достаточно грубых размерах капель воды; 3) при всех размерах дисперсной фазы, увеличение влажности эмульсий влечет повышение температуры начала вспенивания и, в противоположность данным [5], понижение температуры вскипания.

Наряду с вязкостью, условие слива, прокачиваемости и потери текучести определяет температура застывания жидкого топлива, значение которой принимают по температуре застывшего топлива, не меняющего уровень в пробирке, наклоненной под углом 45° в течение 1 мин. Температура застывания мазутов, как и других многокомпонентных топлив, не имеет строго фиксированного значения и зависит от качества исходной нефти и способа получения топлива.

Для топочных мазутов марок М40 и М100 температура застывания практически постоянна при их хранении и находится в пределах $t_3=22-25^\circ\text{C}$, мазуты прямой перегонки крекинг-остатки характеризуются более высокой температурой застывания от 25 до 35°C [15, 26].

Неопределенность температуры застывания мазутов связана с рядом факторов, влияющих на его структуру. При понижении температуры мазута снижается подвижность образующих его коллоидных соединений и происходит постепенное загустевание с образованием сетчатой структуры, включающей крупные кристаллические конгломераты парафинов. На температуру застывания мазутов, содержащих парафины, оказывает влияние изменение их реологических свойств, обусловленных скоростью охлаждения, предварительным перемешиванием или термической обработкой, влияние которой на изменение t_3 неоднозначно. С повышением температуры термообработки до $40-70^\circ\text{C}$ температура застывания возрастает. Дальнейшее повышение температуры термообработки до 100°C приводит к резкому снижению t_3 , связанному с разрушением кристаллических конгломератов парафинов и образованием однородно сетчатой структуры. Увеличение скорости охлаждения приводит к возникновению большого числа центров кристаллизации, равномерно распределенных по всему объему и способствующих созданию прочной структурной решетки парафина, в результате чего повышается t_3 . Из естественных компонентов мазута депрессорное действие оказывают асфальтено-смолистые вещества, задерживающие кристаллизацию парафина и таким образом понижающие температуру застывания топлива.

Диспергирование воды, имеющей температуру застывания 0°C , в мазуте не оказывает депрессорного действия и даже, как установлено наблюдениями [25], температура застывания эмульсии возрастает по сравнению с t_3 мазута, причем этот рост t_3 повышается с увеличением содержания воды. Так, по данным [26], при температуре

застывания безводного мазута М40 $t_3=10^{\circ}\text{C}$, температуры застывания водомазутных эмульсий при влажности $W=10\%$, $t_3=11^{\circ}\text{C}$; $W=20\%$, $t_3=13^{\circ}\text{C}$; $W=30\%$, $t_3=16^{\circ}\text{C}$ и $W=50\%$, $t_3=25^{\circ}\text{C}$.

Это, очередное аномальное изменение характеристики ВТЭ - температуры застывания, можно объяснить в свете рассмотренного представления о влиянии структуры мазута на t_3 . Как уже указывалось, введение в мазут дисперсной водной фазы увеличивает его структурированность, а силы межмолекулярного взаимодействия способствуют концентрации парафинов на поверхностях раздела, что в некоторой степени помогает их кристаллизации и упрочнению структурной решетки. Следует ожидать, что увеличение дисперсности водомазутных эмульсий, сопровождаемое увеличением межфазной поверхности, также будет способствовать росту температуры застывания.

Вместе с температурой застывания, у ВТЭ повышаются и температуры вспышки и воспламенения, определяющие пожарную безопасность жидких топлив. Различие в значениях этих температур заключается в том, что первая характеризует вспышку смеси воздуха и выделившихся топливных паров, при поднесении к ней пламени, без горения самого топлива. Вторая температура соответствует горению топлива, начинающемуся не менее, чем через 5 с. После вспышки. Значения этих температур определяют максимально допустимую температуру подогрева топлива в резервуарах, сообщающихся с окружающим воздухом.

Так как химические реакции горения жидкого топлива происходят с реагентами, находящимися в газовой фазе, то естественно, что значения температур вспышки и воспламенения имеют тенденцию к повышению с ростом температуры кипения, хотя конкретную связь между ними установить затруднительно из-за многофракционного состава большинства жидких энергетических топлив. С введением в топливо диспергированной водной фазы, состав топлива усложняется еще больше и в процессе подогрева ВТЭ образуются не только пары углеводородов, но и пары воды. При смешивании их с окружающим воздухом над поверхностью испарения образуется смесь, состоящая из паров углеводородов, водяного пара и воздуха. Это в свою очередь приводит к снижению концентрации горючих компонентов в смеси.

При доведении такой трехкомпонентной парогазовой смеси от температуры испарения до температуры вспышки тепло, передаваемое от источника воспламенения, расходуется не только на нагревание воздуха и горючих, но и на перегрев водяных паров. Кроме того, при испарении воды из эмульсии вместе с водяным паром экстрагируется и часть тяжелых углеводородов, имеющих более высокую температуру вспышки. Сумма этих обстоятельств приводит к повышению температуры вспышки эмульсий, причем основная роль в этом явлении принадлежит водяному пару, количество которого в смеси пропорционально

влажности эмульсии. Повышение температуры вспышки ВТЭ является положительным фактором, снижающим выделение горючих паров, которые кроме увеличения пожарной опасности, ухудшают условия труда и загрязняют атмосферный воздух, а также позволяющим безопасно использовать относительно легко воспламеняющиеся топлива.

Оценка свойств ВТЭ, влияющих на процесс их горения, основывается прежде всего на составе и свойствах жидкого топлива, являющегося дисперсионной средой в эмульсии, и лишь в некоторых случаях, при использовании в качестве водной добавки к топливу сбросных вод, содержащих горючие соединения, составом и свойствами этих соединений. Из всех свойств наибольший интерес представляют те, от которых зависят температура горения, пределы устойчивого горения и другие характеристики, используемые в теплотехнических расчетах. Основой этих характеристик служат данные анализа элементарного состава жидких топлив, который зависит от состава исходной нефти, технологии и глубины ее переработки. Достаточно подробные сведения о составе жидких котельных топлив, температурах горения и составе продуктов сгорания приведены в работах [15, 28], данные которых могут быть использованы и для расчета аналогичных характеристик ВТЭ.

Анализируя [10] изменение теоретических температур водомазутных эмульсий при сгорании их в воздухе с различным коэффициентом избытка воздуха при различной влажности эмульсий [26] можно отметить, что при небольшом содержании воды в эмульсии, например, $W^p=10\%$ и коэффициенте избытка воздуха $a=1,05$ теоретическая температура всего на 105°C ниже, чем при максимальной температуре горения безводного мазута. Отсюда следует, что рост обводненности мазута сказывается в меньшей мере на падении теоретической температуры горения, чем увеличение коэффициента избытка воздуха, и важный практический вывод, что при сжигании ВТЭ в топочных устройствах, работающих с большими избытками воздуха, можно значительно повысить теоретическую температуру горения и экономичность топочного устройства, уменьшив значение коэффициента избытка воздуха. А в отдельных случаях можно достигнуть даже более высоких показателей, чем при сжигании безводного топлива.

Расчет объемов и энтальпий продуктов сгорания и воздуха при сжигании водомазутных эмульсий, как и при сжигании стандартных жидких топлив, производится по известным соотношениям нормативного метода теплового расчета котельных агрегатов и показывает, что с увеличением влажности эмульсий объемы водяных паров и дымовых газов уменьшаются, так как доля горючих элементов в эмульсии замещается водой. Вместе с этим объемная доля водяных

паров, равная их парциальному давлению при общем давлении 0,1 МПа $r_{H_2O} = V_{H_2O}/V_r$ повышается. Вызванное ростом влажности топлива, уменьшение объемов продуктов сгорания находится в соответствии со снижением теплоты сгорания 1 кг эмульсии, а для поддержания теплового эффекта, эквивалентного сгоранию 1 кг безводного мазута, расход водомазутной эмульсии возрастает. Оценка влияния противоположных тенденций: уменьшения объема продуктов сгорания и увеличения расхода эмульсии при росте содержания влаги [100] показала, что при постоянном избытке воздуха и влажности эмульсии до 10% общего изменения объема продуктов сгорания, по сравнению с объемом продуктов сгорания 1 кг безводного мазута, практически не происходит, а при влажности 20% - объем продуктов сгорания эмульсии возрастает на 5%. Отсюда следует важный для практики сжигания обводненных топлив вывод, что устанавливаемые на котельных агрегатах, как правило, с коэффициентом запаса 1,1 по располагаемому давлению и производительности, тяго-дутьевые механизмы обеспечат подачу и удаление возросших объемов газов и воздуха.

Несмотря на то, что снижение энтальпий уходящих газов с ростом влажности эмульсии позволяет предположить уменьшение и потерь тепла с уходящими газами, определяемыми как разность энтальпий продуктов сгорания на выходе из котельного агрегата и холодного воздуха расчет по формуле [186]

$$q_2 = (I_{yx} - \alpha_{yx} I_{xs}^0)(100 - q_4) / Q_p^p, \quad (13)$$

показал, что повышение влажности водомазутных эмульсий увеличивает потери с уходящими газами. Относительно зависимости (15) можно отметить, что энтальпия уходящих газов уменьшается значительно медленнее с увеличением содержания воды в эмульсии, чем снижается значение располагаемого тепла Q_p (тепло, включающее тепло, внесенное поступающим в котельный агрегат воздухом, подогретым вне агрегата, физическое тепло топлива и тепло, вносимое в агрегат при распыле топлива). Остальные части уравнения (15) представляют: I_{yx} - энтальпия уходящих газов при соответствующих избытке воздуха α_{yx} и температуре t_{yx} , кДж/кг; I_{xs}^0 - энтальпия теоретически необходимого количества воздуха на входе в котельный агрегат, кДж/кг.

Критический анализ [9] использования формулы (15) для расчета потерь тепла с уходящими газами при вводе влаги в зону горения и попытки дополнить формулу (15) методикой для расчета q_2 и КПД при сжигании водомазутной эмульсии показал, что предлагаемые формулы дают искусственно заниженную величину так как величина $\alpha_{yx} I_{xs}^0$ при строгом решении уравнения теплового баланса парового котла входит в

располагаемую теплоту топлива Q_p^p . В результате предложена формула для расчета относительной потери теплоты с уходящими газами:

$$q_2 = (I_{yx} + g_\phi I_{yx} + g_B^{\partial o b} I_{II}^{yx})(100 - q_4) / Q_p^p, \quad (14)$$

где g_ϕ - расход пара, подаваемого на распыл мазута или паровое дутье, на 1 кг топлива; D – расход добавочной воды на 1 кг топлива;

I_{II}^{yx} - энтальпия водяных паров при температуре уходящих газов.

В нормативном методе теплового расчета котельных агрегатов [16] для камерных топок котлов производительностью выше 75 т/ч при сжигании мазутов потери тепла от механического недожега считаются незначительными и не учитываются, т.е. $q_4=0$. Еще больше оснований игнорировать потери тепла от механического недожега при расчетах котельных агрегатов, сжигающих водомазутные эмульсии с содержанием воды до 15-20%, так как при этом интенсифицируется процесс горения и содержание сажистых и коксовых частиц уменьшается в несколько раз. Однако для котлов и других топливосжигающих установок меньшей мощности или при сжигании высоко-влажных эмульсий мазута величина q_4 может оказаться значимой.

Возможность исключить потери тепла от механического недожега из теплового баланса котельного агрегата при расчетах не является основанием пренебрегать содержанием в продуктах сгорания мазута, сажевых и коксовых частиц, так как они являются достаточно серьезным загрязнителем воздушной атмосферы. Устранение экологических последствий от выбросов этих частиц экономически может оказаться сопоставимым и даже превышать экономический ущерб от других видов потерь тепла в топливосжигающем агрегате. И с этой точки зрения, значению q_4 в практике сжигания жидких топлив следует уделять самое пристальное внимание.

Входящие в состав мазута соединения серы оказывают не только определенное коррозионное воздействие на технологическое оборудование мазутного хозяйства, но и образуют при сжигании топлива токсичные оксиды SO_2 и SO_3 , которые при взаимодействии с водяными парами образуют кислоты, агрессивно воздействующие на металл поверхностей нагрева. Значение температуры точки росы t_p продуктов сгорания зависит от концентрации SO_3 в дымовых газах, парциальных давлений паров серной кислоты и водяных паров и соответствует их равновесному состоянию. Соотношение между значениями t_p и парциальными давлениями водяного пара и паров серной кислоты приведено в работе [8], из анализа которого [100] видно, что увеличение парциального давления водяных паров, вызванное ростом влажности топлива вплоть до 50%, может повысить температуру точки росы на 5-15°C. Изменение влажности продуктов сгорания

эмульсий сравнимо с количеством водяного пара, образующегося при сгорании водорода топлива, и значением влажности воздуха, поступающего на горение. Поэтому при значениях влажности эмульсий до 10% абсолютное значение t_p может оставаться в пределах температуры уходящих газов, чему будет способствовать возможность снижения коэффициента избытка воздуха, вплоть до минимальных значений, при которых затрудняется образование SO_3 и соответственно паров H_2SO_4 .

4.2 Роторные аппараты для приготовления эмульсий

Хотя рассмотренные в разделе 1.1. аппараты и показали достаточно высокую эффективность эмульгирования водотопливных смесей, из-за конструктивной и технологической сложности широкого распространения они не получили. Поэтому, основываясь по простоте типовой- конструкции аппарата роторно-пульсационного типа [17], на базе центробежного насоса 1,5х-6л с электродвигателем мощностью 2,5 кВт и угловой скоростью вращения $0,150 \text{ с}^{-1}$ автором был разработан и испытан роторный аппарат (рис.1) для приготовления водомазутных эмульсий.

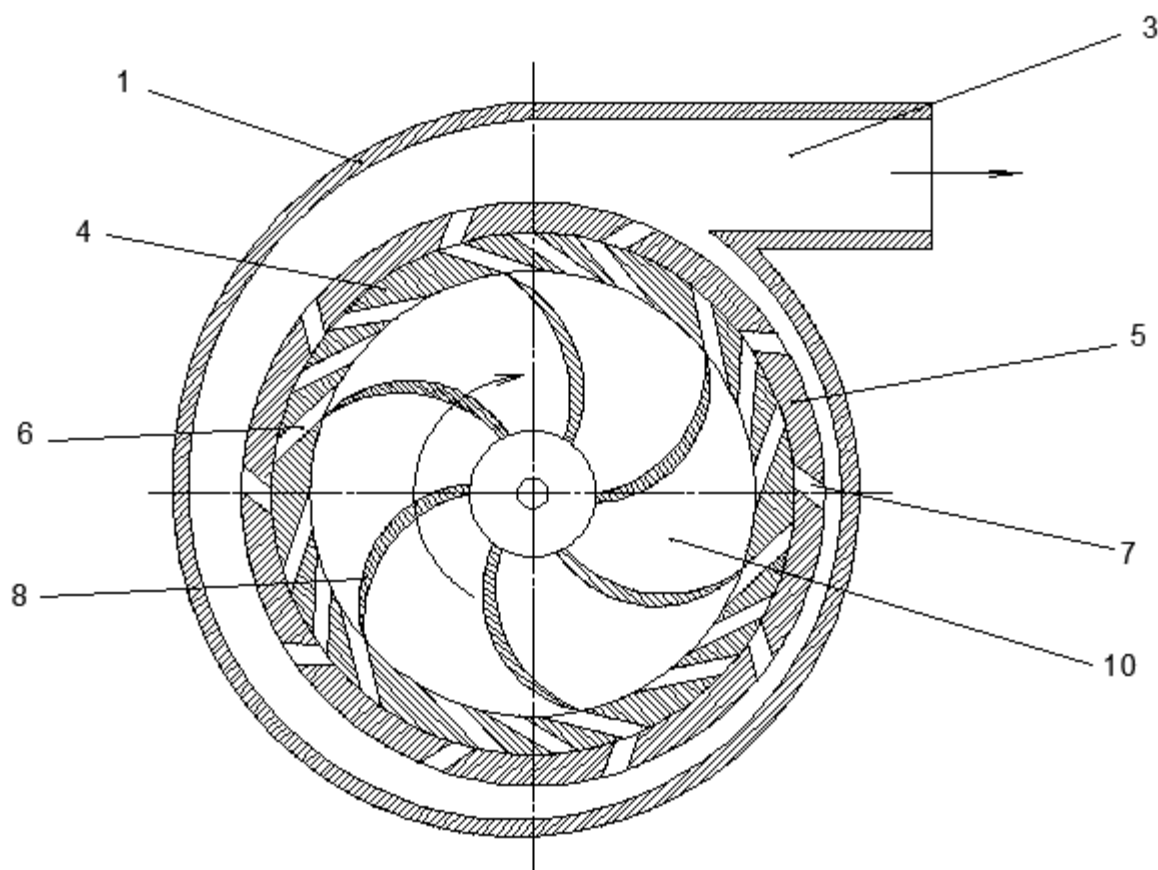


Рисунок 11- Роторный аппарат

Роторный аппарат работает следующим образом. Преобразуемая среда самотеком и за счет разрежения, создаваемого лопастями ротора, поступает по входному патрубку 2 корпуса роторного аппарата 1 и поступает в

межлопастную полость 10. При вращении ротора 4 его каналы 6 периодически совмещаются с каналами 7 статора 5. При вращении ротора 4 валом 9 лопасти 8 взаимодействуют с преобразуемой средой и создают динамический напор преобразуемой среды со значительной кинетической энергией. Под воздействием центробежных сил струи преобразуемой среды стремятся от центра к стенкам ротора вдоль лопастей, масса начинает собираться вдоль лопасти в отогнутой части. Таким образом, распределения давления преобразуемой среды в межлопастной полости в процессе вращения распределяется не равномерно, за счет инерционных сил давления возрастает от задних частей предыдущей лопасти к передней стенке последующей лопасти. В результате суммарного воздействия центробежных и инерционных сил наибольшее давление образуется в зоне совмещения конца лопасти и внутренней части стенки, где расположены цилиндрические каналы ротора. Таким образом, преобразуемая среда заполняет каналы ротора. В период времени, когда каналы ротора перекрыты стенкой статора, в каналах ротора резко возрастает давление, а при совмещении каналов 6 ротора с каналами 7 статора давление преобразуемой среды резко сбрасывается. Объем преобразуемой среды, вошедшей в каналы ротора через каналы статора, стремятся к выходу через выходной патрубок 3. При этом на преобразуемую среду одновременно воздействуют несколько факторов: механическое воздействие преобразуемой среды с рабочими поверхностями устройства, турбулентности, сдвиговых напряжений, пульсации давления, кавитации, ударных волн и акустических эффектов. За счет комплексного и практически одновременного воздействия указанных сил преобразуемая среда приобретает однородную мелкодиспергированную структуру.

Отличительная особенность роторного аппарата заключающаяся в том, что весь рабочий процесс осуществляется внутри небольшой вихревой камеры (гидравлическом корпусе насоса), в которой интенсивная турбулизация не способствует преобразованию механической энергии в потенциальную энергию потока. Вместе с тем вращающийся цилиндрический ротор с прорезями принципиально соответствует колесу центробежного насоса и может создавать определенный напор. Экспериментальные испытания роторного аппарата при приготовлении водо-мазутной эмульсии различной влажности показали, что напор составил $(4-6) \times 10^4$ Па. Несмотря на малую (4мм) толщину стенок цилиндра ротора и казалось бы незначительной насосный эффект, полученное значение напора можно объяснить увеличенным радиальным зазором между наружной поверхностью ротора и корпусом насоса, а также тангенциальным расположением выходного патрубка, что улучшило преобразование механической энергии в потенциальную энергию потока.

Одним из сложных вопросов сжигания водо-топливных эмульсий являются затруднения, возникающие при приготовлении эмульсий из маловязких топлив, содержащих незначительное количество поверх-

ностноактивных веществ, стабилизирующих диспергированную водную фазу. Приготовление водо-топливной эмульсии непосредственно в горелочных устройствах (форсунках) до настоящего времени не имеет приемлемых решений. Вместе с тем группа горелочных устройств, комплектуемых ротационными форсунками, отличающимися непритязательностью к свойствам жидкого топлива и наличием вращающихся узлов и деталей, позволяет использовать для приготовления водо-топливных эмульсий непосредственно перед их распылением диспергаторы типа коллоидных мельниц или роторно-пульсационных аппаратов.

4.3 Расчет роторного аппарата с учетом акустической импульсной кавитации

В настоящее время существует несколько методик расчета роторных аппаратов. Одни из них основаны на закономерностях течения среды в каналах ротора и статора, описываемых с помощью уравнения типа Рикатти [1, 2]. Другие методики используют для этого уравнение Бернулли для нестационарного течения среды [3 – 5]. При этом рассматривается течение среды одновременно в канале ротора и в канале статора, считая канал ротора неподвижным. На самом деле, очевидно, что закономерности движения различны во вращающихся и неподвижных каналах аппарата.

Особенностью предлагаемой методики расчета является то, что она позволяет спроектировать роторный аппарат, осуществляющий наиболее эффективное воздействие на обрабатываемую среду при проведении процессов в системах «жидкость– жидкость», «твердое тело– жидкость» и «жидкость– газ» в процессах химической технологии.

При этом аппарат работает в условиях возникновения автоколебательного режима и максимально развитой акустической кавитации. Следует отметить, что впервые при расчете, на основании теоретических и экспериментальных исследований, учитываются особенности течения жидкости в модуляторе роторного аппарата, описываемых новой математической моделью, и влияние начального содержания свободного газа в обрабатываемой среде [7].

В предлагаемой методике расчета роторного аппарата использован известный зонный подход для построения моделей течения. Рассматриваются две зоны, имеющие размеры одного порядка, – каналы ротора и статора. Необходимым условием такого подхода является определение условий сшивки решения задачи для этих зон. В нашем случае это условие определяется на основании уравнения не-разрывности таким образом, что параметры течения среды на выходе из канала ротора равны параметрам среды на входе в канал статора [6].

Методика расчета основана на комплексе теоретических и экспериментальных исследований гидромеханических, акустических и кавитационных особенностей режимов работы роторного аппарата.

Обычно для проектирования технологического оборудования задают следующие параметры:

- объемную производительность Q , м³/с;
- плотность обрабатываемой среды $\rho = 0,89-1$ кг/м³;
- в случае процесса растворения – гранулометрический состав и, в частности, максимальный размер частиц d_{\max} , м.

После изучения возможностей производителя в обеспечении точности изготовления деталей, наличии комплектующих – электродвигателей переменного тока и питающих центробежных насосов, дополнительно задают следующие параметры, необходимые для расчета режимных и конструктивных размеров роторного аппарата, которые корректируются в процессе расчета:

- частоту вращения ротора принимают равной частоте вращения электродвигателя, обычно ее выбирают из стандартного ряда $\sim 100, 150, 300$ с⁻¹, при этом следует учитывать, что потребляемая мощность пропорциональна $\sim \omega^{2.5}$, но с увеличением угловой скорости вращения возрастает эффективность работы роторного аппарата. Обычно предварительно принимают $\omega = 150$ с⁻¹;

- величину зазора между ротором и статором принимаем $\delta \approx 10^{-4}$ м для обрабатываемых сред, имеющих вязкость одного порядка с водой, и увеличиваем до

$\approx 2 \cdot 10^{-4}$ м для жидкостей с большей вязкостью;

- форму поперечного сечения каналов принимаем прямоугольной [3];

- толщину стенки ротора из условий прочности и удобства технологии изготовления каналов фрезерованием при составном роторе. Причем для радиальных каналов $l_p = h_p$, для наклонных каналов $l_p = h_p / \cos \gamma$. Таким образом можно

увеличивать длину канала в роторе при постоянной его толщине. В начале расчета:

- принимаем направление каналов радиальным;
- определяем ряд насосов, имеющих производительность равную или близкую к заданной. Определяем давление, создаваемое насосами $P_{\text{нас}}$;
- при необходимости назначаем угол наклона каналов в статоре в интервале $0 \dots 90^\circ$;

- определяем начальное содержание свободного газа в обрабатываемой среде. Если оно неизвестно, то задаем α_o по справочным данным;

- задаем ширину канала в роторе и статоре, считая $a_p = a_c = a$:

а) для процесса эмульгирования $a = 2 \dots 3 \cdot 10^{-3}$ м; б) для процесса растворения $a \geq d_{\max}$.

Обозначения

a_p, a_c – ширина канала ротора и статора, м;

b_p, b_c – расстояние между каналами ротора

и статора, м;
 b, c – коэффициенты;
 $c_{\text{ф}}$ – скорость звука в двухфазной среде, м/с;
 d_{max} – наибольший размер частиц растворяемого материала, м;
 f_c – частота генерируемая в канале статора, Гц;
 $f_{\text{рез}}$ – резонансная частота канала статора, Гц; l_p, l_c, l_k – длина каналов ротора, статора, камеры озвучивания, м;
 $n_{\text{ц}}$ – количество циклов для достижения концентрации насыщения;
 n – число пробегов волны в канале статора; h_p – толщина стенки ротора, м;
 H – высота каналов ротора и статора, м; $P_{\text{нас}}, P_p$ – давление создаваемое насосом и в полости ротора, Па;
 P_m – импульс «отрицательного» давления, Па;
 \bar{t} – безразмерное время процесса закрытия канала статора;
 Q – объемная производительность, м³/с;
 v – безразмерная радиальная составляющая скорости;
 Z – количество каналов в роторе и статоре;
 α, α_0 – текущее и начальное содержание свободного газа;
 ΔP – перепад давления между ротором и статором, Па;
 δ, δ' – радиальные размерный и безразмерный зазоры;
 γ – угол наклона канала ротора, рад;
 ξ – коэффициент гидравлического сопротивления;
 $\rho, \rho_{\text{ж}}, \rho_{\text{г}}$ – плотность среды, жидкой и газовой фаз, кг/м³;
 τ' – период модуляции аппарата, с;
 τ'' – время пробега волны по длине канала статора, с;
 ψ – коэффициент;
 ω – угловая частота вращения ротора, с⁻¹;
 K_c – критерий кавитации Стайлса;
 Sh – критерий Струхала;
 χ_a – число акустической кавитации

Расчет роторного аппарата ведем в следующей последовательности.

Из условий, определенных в работе [8], определяем соотношения между длиной каналов в статоре, шириной камеры и радиусом ротора:

а) для радиальных каналов в статоре

$$R_p = \frac{R_c}{2} = l_p + l_c \quad (15)$$

б) для каналов, выполненных под углом

$$R_p = l_c (1 + \psi) = 5 \cdot 10^{-2} \text{ м} \quad (16)$$

Для возможности возбуждения стоячей волны в каналах статора и камере озвучивания принимаем $l_c = l_k$.

Из пп. 15 и 16 получаем:

для наклонных каналов в статоре [9]

$$l_c = \frac{R_p}{(1 + \psi)} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м} \quad (17)$$

Определяем относительный радиальный зазор

$$\delta_a' = \frac{\delta}{a} = 0,033 \text{ м} \quad (18)$$

Из эмпирической зависимости, характеризующей наилучшие условия для развития кавитации, определяем критерии Стайлса [9]

$$K_c = \omega^{-0,17} (1,24 - 9,23\delta')^3 = 0,34 \quad (19)$$

Определяем критерий Струхала для режима наиболее интенсивной акустической кавитации [9]

$$Sh = 5,9 \cdot 10^{-84,6\delta} \cdot K_c^{-7,89} = 38,39 \quad (20)$$

Определяем перепад давления между полостью ротора и камерой по известному $P_{\text{нас}}$. Считаем, что за счет гидравлических потерь на участке между выходом насоса и полостью ротора потери напора составляют до 10 %, тогда при $P_p = (0, 9 \dots 0, 95)P_{\text{нас}}$

$$\Delta P = P_p \cdot K_c (1 + K)^{-1} = 0,26 \quad (21)$$

Определяем радиус ротора из выражения для критерия Струхала

$$Sh = 2l\omega R_p \rho^{0,5} (2\Delta P)^{-0,5} \quad (22)$$

R_p квадратное уравнение и его решение имеет вид

$$R_p = \frac{-b + \sqrt{b^2 + 4ac}}{2c} = 5 \cdot 10^{-2} \text{ м} \quad (23)$$

для наклонных каналов в статоре:

$$b = 2\omega l_p \rho^{0,5} (2\Delta P)^{-0,5} a^{-1} Sh^{-1} = 1,24 \cdot 10^{-4} \quad (24)$$

$$c = 2\omega\rho^{0,5} (2\Delta P)^{-0,5} a^{-1} Sh^{-1} (1 + \psi)^{-1} = 0,018 \quad (25)$$

Определяем скорость звука в газожидкостной среде, используя формулу Вуда при $\rho_{ж} \gg \rho_{г}$

$$c_{\phi} = \sqrt{\frac{P_p}{\alpha(1-\alpha)\rho_{ж}}} = 2,3 \quad (26)$$

Определяем длину канала в роторе из условия возникновения в нем гидравлического удара

$$l_p \leq \frac{ac_{\phi}}{2\omega R_p} = 0,0046 \quad (27)$$

Сравниваем с принятым значением в п. 27 и при необходимости корректируем. Если необходимо увеличить l_p то используем наклонные каналы при сохранении толщины стенки ротора, для того чтобы не увеличивать металлоемкость ротора. Угол наклона определяется в этом случае из выражения: $\gamma = \arccos(h_p/l_p)$ и начинаем расчет с п. 17. Если необходимо уменьшить l_p , то уменьшаем величину a и начинаем расчет с п. 15.

Определяем длину канала в статоре:
при наклонном канале в статоре

$$l_c = \frac{R_p}{1 + \psi} = 0,003 \quad (28)$$

где значения ψ определены в работе [9].

Определяем число каналов в статоре из условия возбуждения в нем авто-колебаний.

В каждом канале статора каналами ротора генерируются колебания с частотой, определяемой выражением

$$f_c = \frac{\omega Z}{2\pi} = 195 \quad (29)$$

С другой стороны резонансная частота канала равна

$$f_c = \frac{c_{\phi} k}{4l_c}; \quad k=1,2,3... \quad (30)$$

при равенстве частот получаем

$$Z = \frac{\pi c_{\phi} k}{2\omega l_c} = 8,18 \quad (31)$$

Определяем условие возникновения автоколебательного режима работы

$$\tau' = \frac{(a + b_p)}{\omega R_p} = 0,0053$$

$$\tau'' = \frac{l_c}{c_{\phi}} = 0,0012$$

$$n = \frac{\tau'}{\tau''} = 4,17$$

при этом $n = 2, 6, 10, 14, 18, \dots, 4k + 2$, где $k = 0, 1, 2, 3, \dots$. Если это условие не выполняется, то корректируем величину l_c за счет применения наклонного канала в статоре, изменяя угол наклона и, соответственно, коэффициент ψ , и начинаем расчет с п. 11б.

Определяем расстояние между каналами ротора.

$$b_p = (2\pi R_p - Za)Z^{-1} = 0,8 \text{ м} \quad (32)$$

Находим величину коэффициента гидравлического сопротивления по зависимости [9]

$$\xi = 12,8 K_c (3,9 - 96\delta')^{1,82} = 2,53 \quad (33)$$

Определяем среднюю площадь проходного сечения модулятора для каналов прямоугольной формы

$$\langle S \rangle = \frac{Q\sqrt{\xi\rho}}{\sqrt{2\Delta P}} = 167,9 \text{ мм}^2 \quad (34)$$

Находим высоту каналов

$$H = \frac{\langle S \rangle (a + b_c)}{a^2 Z} = 0,91 \text{ мм} \quad (35)$$

Определяем по уравнению Херринга величину χ_a , соответствующую

режиму наиболее интенсивной кавитации, по известному содержанию свободного газа в жидкости и определенных расчетом режимных и конструктивных параметров роторного аппарата [7].

По уравнению, описывающему закон движения малосжимаемой жидкости в модуляторе роторного аппарата [6], определяем максимальное «отрицательное» ускорение $\left| \frac{dv}{dt} \right|$ в безразмерном виде на участке периода процесса закрывания канала статора $1 \leq t \leq 2$.

Получаем величину наибольшего импульса «отрицательного» давления по зависимости полученной в [3]

$$P_m = \frac{2\rho l_p^2 \omega^2 R_p^2 Sh}{Za^2} \left| \frac{\partial v}{\partial t} \right| = 0,74 \quad (36)$$

Определяем величину наибольшего импульса «отрицательного» давления по зависимости, связывающей практический критерий кавитации, – коэффициент кавитации Стайлса, и теоретическое число акустической кавитации

$$P_m = \frac{P_p}{\chi_a (1 + K_c)} = 5,25 \quad (37)$$

Сравниваем результаты, полученные в пп. 20 и 21. При необходимости корректируем давление P_p , которое легко регулируется в реальных условиях с помощью вентиля на входе и выходе из аппарата, и повторяем расчет с п. 7.

В случае проведения процесса растворения определяем количество циклов, необходимое для достижения концентрации насыщения [9]

$$n_w = 2K_c \cdot 10^{26,3\delta} = 47,1 \quad (38)$$

После завершения расчетов режимных и конструктивных параметров роторного аппарата определяем потребляемую мощность по методике изложенной, например, в работе [10].

При сжигании водо-топливной эмульсии значительно уменьшится количество вредных веществ и снижается температура уходящих газов. Если рассчитать выбросы вредных веществ в атмосферу, удаляемых с дымовыми газами от отопительной котельной, при сжигании 420 т/год мазута со следующими характеристиками, то можно увидеть концентрацию оксидов углерода, оксидов серы, оксидов азота:

- низшая теплота сгорания $Q^H = 40,30$ МДж/кг (9641 ккал/кг),
- содержание серы $S = 0,5$ %,

- зольность $A = 0,1$.
- Расход топлива 420 т/год.

Продолжительность отопительного периода 234 дня (5616 часов).
Расход мазута в самый холодный месяц года (январь) 73 т.

В атмосферу от котельных при сжигании мазутов с дымовыми газами выбрасываются: мазутная зола, оксиды углерода, серы и азота.

Расход топлива в январе (г/с):

$$m' = 73 \cdot 10^6 / (31 \cdot 24 \cdot 3600) = 26,2 \text{ г/с}$$

валовый выброс мазутной золы в пересчете на ванадий

$$M_v = 10^{-6} \cdot q_v \cdot m \cdot (1 - n_{oc}) \cdot (1 - n_y),$$

Содержание оксидов ванадия в мазуте

$$q_v = 4000 \cdot 0,1 / 1,8 = 222,2 \text{ г/т}$$

n_{oc} , n_y - коэффициенты оседания и улавливания оксидов ванадия ($n_{oc}=0$, $n_y=0$).

$$M_v = 10^6 \cdot 222,2 \cdot 420 \cdot (1-0)(1-0) = 0,093 \text{ т/год}$$

$$G_v = 10^{-6} \cdot 222,2 \cdot 26,2 \cdot (1-0)(1-0) = 0,0058 \text{ г/с}$$

выброс оксидов углерода

$$M_{co} = C_{co} m (1 - q_4 / 100) \cdot 10^{-3},$$

Потери теплоты вследствие механической и химической неполноты сгорания топлива в данном случае равны $q_4=0\%$, $q_3=0,5\%$, $R = 0,65$ - для мазута.

$$C_{co} = q_3 R Q^H = 0,5 \cdot 0,65 \cdot 40,30 = 13,1 \text{ кг/т}$$

$$M_{co} = 0,001 \cdot 13,1 \cdot 420 \cdot (1 - 0) = 5,5 \text{ т/год}$$

$$G_{co} = 0,001 \cdot 13,1 \cdot 26,2 \cdot (1 - 0) = 0,34 \text{ г/с}$$

выброс оксидов азота

$$M_{NO_2} = m \cdot Q^H \cdot K_{NO_2} (1 - \beta) \cdot 10^{-3},$$

$$K_{NO_2} = 0,07 \text{ кг/ГДж}; \beta = 0.$$

$$M_{NO_2} = 0,001 \cdot 420 \cdot 40,30 \cdot 0,07 \cdot (1 - 0) = 1,185 \text{ т/год}$$

$$G_{\text{NO}_2} = 0,001 \cdot 26,2 \cdot 40,30 \cdot 0,07 \cdot (1 - 0) = 0,074 \text{ г/с}$$

выброс оксидов серы

$$M_{\text{SO}_2} = 0,02 \cdot m \cdot S \cdot (1 - \eta'_{\text{SO}_2}) \cdot (1 - \eta''_{\text{SO}_2}),$$

η'_{SO_2} - доля оксидов серы, связываемых летучей золой топлива. Для мазута 0,02. η''_{SO_2} - доля оксидов серы, улавливаемых в золоуловителе. Для сухих золоуловителей принимается равной 0.

$$M_{\text{SO}_2} = 0,02 \cdot 420 \cdot 0,5 \cdot (1 - 0,02)(1 - 0) = 4,12 \text{ т/год}$$

$$G_{\text{SO}_2} = 0,02 \cdot 0,5 \cdot 26,2 \cdot (1 - 0,02)(1 - 0) = 0,26 \text{ г/с}$$

Как видно из расчетов, количество вредных веществ выбрасываемых в атмосферу грозит к экологии окружающей среды. Любому предприятию, активно использующее жидкое топливо (мазут) рекомендуется обрабатывать мазут в роторном аппарате, чтобы уменьшить количество вредных веществ. При использовании водо-топливной эмульсии концентрация NO_x снижается с 582 до 480 мг/м³, а CO_x с 0,02 до 0,07 %. Температура уходящих газов уменьшается по сравнению с обезвоженным мазутом на 30-35°C. Изменение параметров процесса горения и состава уходящих газов свидетельствуют о повышении эффективности использования топлива.

4.4 Результаты работ по внедрению технологии подготовки и сжигания ВМЭ

Для получения ВМЭ применялись роторный аппарат. производительность роторного аппарата составляла 80 м³/ч. Расчет, конструирование и изготовление роторного аппарата для получения ВМЭ с необходимыми дисперсными характеристиками производились на основании предварительного анализа особенностей и технических параметров установленного оборудования указанных котельных. Роторный аппарат устанавливались в мазутном хозяйстве котельных на участке между фильтром грубой очистки и подающим топливным насосом.

Теплотехнические режимно-наладочные испытания в указанных котельных проводились с привлечением высококвалифицированных специалистами из ТОО «Алматытеплокоммунэнерго». Определение состава дымовых газов и концентраций вредных веществ в продуктах сгорания производились индикаторными трубочками СО-0,25.

Испытания проводились на котельной санаторий «Алатау», на данной котельной в качестве топлива использовался мазут ($Q_{\text{H}}^{\text{P}}=9000 \text{ ккал/кг}$)

Таблица 3- Результаты испытания роторного аппарата

№ опыта	Условия опыта	Результат						
		CO мг/м ³	T _{yx} °C	O ₂ , %	G воды, м ³ /ч	NO мг/м ³	NO ₂ мг/м ³	Q топл., м ³ /ч
1	Котловой агрегат работает на неразбавленном мазуте при выключенном эмульгаторе	27,43	237,3	10,7	20	42,29	1,09	0,78
2	Котловой агрегат работает на обводнённом мазуте при выключенном эмульгаторе	135,5	245	7,5	20	41,8	1,1	0,78
3	Котловой агрегат работает на обводнённом мазуте (9,800 м ³ мазута к 0,02м ³ воды) при включенном роторном аппарате	24,34	210	10,7	20	42,04	1,07	0,78

Анализ данных, приведенных в таблицах, показывает реальный эффект повышения экономичности конкретных котлов (максимальный прирост КПД до 2,1%) и снижения вредных выбросов при переходе на сжигание ВМЭ с оптимальными влажностно-дисперсными характеристиками и при оптимизации режимов горения.

В режиме сжигания диспергированного мазута с исходной влажностью (без добавления воды) также происходит небольшой прирост КПД котла и некоторое снижение выбросов с продуктами сгорания.

Во всех режимах наблюдалось устойчивое сжигание ВМЭ с отчетливо выраженным снижением дымности уходящих газов и увеличением содержания CO₂. Это дополнительно свидетельствует об интенсификации выгорания горючих компонентов топливной эмульсии.

Необходимо отметить, что сжигание водомазутной эмульсии с более высоким содержанием воды по отношению к значению, полученному при оптимизации горения, приводило к понижению КПД котлов. При этом концентрации вредных веществ в продуктах сгорания, в частности, NO_x, SO₂, а также дымность уходящих газов, снижались и при сжигании ВМЭ с влажностью 11%.

Аналогичные факты наблюдались при сжигании ВМЭ в других исследованиях [4, 5, 8, 12, 13].

В этом аспекте понятие «оптимальной влажности» ВМЭ имеет двоякое значение.

С одной стороны оптимальной влажностью ВМЭ можно называть такое значение, которое обеспечивает минимальный (суммарный) выброс вредных веществ с продуктами сгорания (NO_x , SO_2 , сажистые частицы, бензапирен).

С другой стороны, это значение влажности не всегда является оптимальным с точки зрения экономических показателей работы котла. При этом разумная разница между значениями экологической и экономической «оптимальной влажности» ВМЭ может достигать по разным данным 4-10%, хотя в принципе устойчивое сжигание водотопливных эмульсий может обеспечиваться при предельном значении влажности до 65% [2].

В общем случае, достижение максимально возможного улучшения экономических и экологических параметров котла, работающего на водомазутной эмульсии, возможно только при оптимизации режимов приготовления и сжигания ВМЭ в реальных условиях конкретных топливо-сжигающих установок.

5 Основные выводы

Наметившаяся в настоящее время тенденция замены маловязких видов жидкого топлива на более вязкие тяжелые энергетические топлива, транспортировка и подготовка к сжиганию которых сопровождается их обводнением, и повышающиеся экологические требования к условиям их использования требуют разработки новых технологических элементов во всей цепи, связанной с подготовкой и сжиганием таких топлив, что влечет за собой дополнительные затраты на разработки и реконструкцию топливных хозяйств. Однако отечественные и зарубежные разработки в области сжигания высокообводненных жидких топлив дают основание решать предстоящие задачи более простым и дешевым путем - гомогенизацией смеси воды и топлива и сжиганием их в виде водо-топливной эмульсии.

1. Анализ теоретических и экспериментальных исследований сжигания водотопливных эмульсий показал эффективность эмульгирования и гомогенизации обводненных жидких топлив как метод повышения их качества и обеспечения требований, предъявляемых к ним потребителями и защитой окружающей среды, и позволил выявить упущенные из внимания исследователей особенности характеристик и свойств эмульсий, связанные с их приготовлением, хранением, подготовкой к сжиганию и сжиганием, а также установить тенденции и противоречия имеющие место в оценках результатов исследований.

2. Для приготовления водотопливных эмульсий разработан ряд аппаратов, один из которых - роторно-пульсационный ориентирован на использование центробежных насосов и может быть изготовлен в условиях практически любого предприятия. Для маловязких топлив предложено приготовление водотопливных эмульсий непосредственно

в ротационных форсунках с включением в их конструкции роторного аппарата.

Анализ принципиальных схем топливных хозяйств и их оптимизация, позволили предложить способы и определить условия хранения, подготовки и сжигания эмульсий из обводненных жидких топлив в условиях действующих и проектируемых топливосжигающих предприятий.

3. Экспериментальные исследования влияния воды, диспергированной в жидком топливе, на процессы горения и образования вредных веществ, а также теоретический анализ химических реакций горения показали существенность отличий горения водотопливных эмульсий и безводного топлива и позволили установить следующее:

При сжигании эмульсии выравниваются распределения полей газового состава при сокращении зон активного горения и догорания СО. Максимум температур факела при влажности эмульсии 7-10% снизился на 50-60°C и сместился к концу зоны активного горения. Основанная на принципе максимальных локальных температур и концентраций при горении единичных капель, оценка степени диссоциации водяного пара показала, что ее значение может достигать 1,6-2,7%.

4. Выбор того или иного способа и устройства для приготовления и сжигания водо-топливной эмульсии должен опираться на знание взаимосвязи влажностно-дисперсных характеристик получаемой топливной эмульсии и технических особенностей конкретных топливосжигающих устройств. Влажностно-дисперсные характеристики топливных эмульсий, получаемых тем или иным способом, фактически являются главным параметром, определяющим возможные пределы повышения экономичности и снижения вредных выбросов с продуктами сгорания котельных установок.

5. При переходе на сжигание водо-топливной эмульсии с оптимальными влажностно-дисперсными характеристиками и при оптимизации режимов горения обеспечивается реальный эффект повышения экономичности котельных установок и снижения вредных выбросов с продуктами сгорания.

6. В общем случае, достижение максимально возможного улучшения экономических и экологических параметров котла, работающего на водо-топливной эмульсии, возможно только при оптимизации режимов приготовления и сжигания водо-топливной эмульсии в реальных условиях конкретных топливосжигающих установок.

7. Анализ технико-экономических показателей сжигания водо-топливных эмульсий показал реальность и обоснованность возможности прироста КПД топливосжигающих агрегатов на 1-2%. С использованием метода математического планирования экспериментов показана возможность получения регрессионных зависимостей экономических и экологических характеристик работы агрегата, позволяющих определять оптимальные значения режимных параметров работы, удовлетворяющие как экономическим, так и экологическим требованиям.

8. Экономическая оценка изменения качества обводненного жидкого топлива при переводе его в водотопливную эмульсию показала, что при незначительных капиталовложениях на эмульгирующий аппарат и его монтаж изменение текущих затрат в целом снижается при влажности эмульсии до 7% (если имеется возможность снижения коэффициента избытка воздуха), остается примерно постоянным при влажности эмульсии 9-12%, а при дальнейшем росте влажности потери тепла на испарение влаги уже будут превалировать над возможными статьями экономии затрат.

Список литературы

- 1 Абрамзон А.А. Поверхностно-активные вещества. Свойства и применение.-Л.: Химия,1975. -248 с.
- 2 Азбукин С.Н., Лужнов М.И., Пшениснов И.Ф. Статический вихревой смеситель с малым перепадом давления. - Электрические станции 1981, №12, с.15-17.
- 3 Балабудкин М.А. Роторно-пульсационные аппараты в химико-фармацевтической промышленности.-М. -Химия, 1983.-160 с.
- 4 Батуев С.П., Корягин В.А. Особенности хранения и подготовки к сжиганию обводненного жидкого топлива в мазутном хозяйстве. - Промышленная энергетика, 1987, №5, с.35-37.
- 5 Балабышко А.М., Зимин А.И., Ружицкий В.П. Гидромеханическое диспергирование. М.: Наука, 1998. 330с.
- 6 Балабышко А.М., Юдаев В.Ф. Роторные аппараты с модуляцией потока и их применение в промышленности. М.: Недра. 1992. 176с.
- 7 Воликов А.Н. Сжигание жидкого и газообразного топлива в котлах малой мощности.-Л.: Недра, 1989. -160 с.
- 8 Гарзанов А.П. Исследование процессов сжигания водомазутной эмульсии и разработка методов ее эффективного использования в парогенераторах. Автореферат, диссертация, к.т.н.-М, 1987,-22с
- 9 Кормилицин В.И., Лысков М.Г., Третьяков Ю.М. Экономичность работы парового котла при управлении процессом сжигания топлива вводом влаги в зону горения.-Теплоэнергетика, 1988, №8, с.13-15.
- 10 Серова, М.А. Методика расчета роторного аппарата с модуляцией потока / М.А. Серова, В.Ф. Юдаев // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2003, №1. – С. 3–7.
- 11 Стренк Ф. Перемешивание и аппараты с мешалками. Пер. с польск. под ред. Шупляка И.Л.-Л.: Химия, 1975. -384 с.
- 12 Семенов Л.В., Кирсанова О.П. Экономика использования обводненного топлива.-М.: Недра, 1967. -79 с.

- 13 Тихомиров В.К. Пены теория и практика их получения и разрушения. -М.: Химия, 1975. -264 с.
- 14 Промтов М.А. Пульсационные аппараты роторного типа: теория и практика. М.: Машиностроение, 2001, 260с.
- 15 Липов Ю.М., Самойлов Ю.Ф., Виленский Т.В. Компоновка и тепловой расчет парового котла. – М.: Энергоатомиздат. 1988.
- 16 Балабышко А.М., Юдаев В.Ф. Роторные аппараты с модуляцией потока и их применение в промышленности. М.: Недра. 1992. 176с.
- 17 Ривкин С.Л., Александрова А.А. Термодинамические свойства воды и водяного пара. Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1984.
- 18 Харитонов А.К., Голубь Н.В., Попов А.И. и др. Уменьшение вредных выбросов при сжигании водомазутной эмульсии.- Энергетик 1983, №2, с.11.
- 19 Иванов В.М. Парогазовые процессы и их применение в народном хозяйстве.-М.: Наука, 1970. -320 с
- 20 Эстеркин Р.И. Промышленные котельные установки. – 2-е перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат. 1985.
- 21 Эстеркин Р.И. Котельные установки курсовое и дипломное проектирование. – М.: Энергоатомиздат, 1989. - 278 с.
- 22 Юдаев, В.Ф. Роторные аппараты с модуляцией потока / В.Ф. Юдаев. – М.: МИХМ, 1979. – 32 с.
- 23 Червяков, В.М. Нестационарное течение идеальной несжимаемой среды в каналах роторного аппарата / В.М. Червяков, Ю.В. Воробьев // ТОХТ. – 2005, Т.39, – С. 1–7.
- 24 Иванов В.М., Канторович Б.В. Топливные эмульсии и суспензии Металлургиздат, 1963. -183 с.
- 25 Корягин В.А. Повышение эффективности сжигания газа и мазута в водотрубных котлах: Автореф.дис...канд.техн.наук.-Л.: 1982.
- 26 Корягин В.А., Шевелев К.В., Батуев С.П. Исследование содержания вредных веществ в продуктах сгорания водотопливных эмульсий. - Промышленная энергетика,1988, №4, с.45-48.