

**НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКИ  
ИНСТИТУТ ГЕОЛОГИИ им. М. М. АДЫШЕВА  
ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ**

**НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКИ  
ИНСТИТУТ СЕЙСМОЛОГИИ**

Диссертационный совет Д 25.23.677

На правах рукописи  
УДК: 550.4.46(575.2)(043.3)

**Молдобаев Мирлан Болотбекович**



**Влияние воды в водотопливных эмульсиях на процессы образования и  
снижения сажи в газовой фазе**

25.00.36 - геоэкология

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Бишкек – 2024

Работа выполнена на кафедре промышленной безопасности и геоэкологии горно-металлургического института им. академика У.Асаналиева Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова

**Научный руководитель:** Самбаева Дамира Асанакуновна, доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой промышленной безопасности и геоэкологии горно-металлургического института имени академика У.Асаналиева Кыргызского государственного технического университета имени И.Раззакова

**Официальные оппоненты:**

**Ведущая организация:**

Защита состоится «    » «    » 2024 года в 10<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 25.23.677 по защите диссертаций на соискание ученой степени доктора (кандидата) наук при Институте геологии им. М. М. Адышева, Институте сейсмологии НАН КР по адресу: 720040, Бишкек, бульвар Эркиндик, 30, актовый зал. Идентификационный код онлайн трансляции защиты диссертации в bbb-webinar: <https://vc.vak.kg/b/252-whl-gq7-1dj>

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеках Института геологии им. М. М. Адышева НАН КР, по адресу: 720040, Бишкек, бульвар Эркиндик, 30; Института сейсмологии НАН КР, по адресу: 720060, г. Бишкек, микрорайон Асанбай, 52/1 и на сайте [https://vak.kg/d\\_25\\_23\\_677/107064/](https://vak.kg/d_25_23_677/107064/)

Автореферат разослан «    »

2024 года.

Ученый секретарь диссертационного совета  
кандидат географических наук, доцент

Токторалиев Э.Т.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы диссертации.** В настоящее время вопросы экологии остро стоит перед топливно-энергетическим комплексом, где имеет место неполное сгорание топлива, интенсивное образование загрязняющих веществ в газовой фазе и твердых отложений в водной среде. В связи с этим, повышения эффективности использования топлива, в частности топочного мазута может быть достигнуто путем его сжигания в виде водомазутных эмульсий (ВМЭ). Это принципиально новый вид модифицированного жидкого топлива, отличающийся от мазута как физико-химическими, так и экологическими свойствами (Иванов В.М., Воликов А.Н., Маймеков З.К.). Вода в водомазутной эмульсии - это уже не балласт, а своеобразный катализатор, улучшающий процесс сжигания топлива. Однако уникальная роль воды в ВМЭ еще полностью не изучена. Например, парокислородная конверсия жидкого углеводородного сырья и разработка технологии производства водородсодержащего топливного газа позволяет не только с высокой эффективностью использовать широкий спектр углеводородов в качестве энергетического и химического сырья, но и обеспечить при этом соблюдение высоких стандартов, предъявляемых в настоящее время к энергетическим технологиям, частности по углеродной емкости (Маймеков З.К., Самбаева Д.А.). Поэтому, интенсификация химических процессов конверсии углеводородного сырья в водородсодержащий топливный синтез-газ на основе использования и сжигания высокодисперсных водотопливных эмульсий может быть рассмотрена, как весомая альтернатива современным термокаталитическим процессам переработки жидкого топлива (Маймеков З.К.). При этом физико-химической основой использования и сжигания водотопливных эмульсий является эффективная организация процесса горения парогазовой смеси за счет вторичного микродробления обратной эмульсии (вода в мазуте) и путем незначительного снижения избытка окислителя, т.е. фактически, на замене традиционного катализатора - водой водотопливных эмульсий, приводящей к ускорению химических процессов (Иванов В.М., Воликов А.Н., Маймеков З.К.). Соответственно, изучение системы мазут-воздух, мазут-вода-воздух при различных соотношениях исходных компонентов и в широких интервалах изменения температуры, апробация модельных расчетов в процессах приготовления и сжигания водомазутных эмульсий (ВМЭ) в промышленных котлоагрегатах средней и малой мощности и снижения концентрации вредных выбросов, в том числе сажи в дымовых газах, определяет актуальность научной задачи.

**Связь темы диссертации с приоритетными научными направлениями, крупными научными программами (проектами), основными научно-исследовательскими работами, проводимыми образовательными и научными учреждениями.** Диссертационная работа

проводилась в соответствии с планом НИР КТУ «Манас», проекты: «Экологические проблемы углерод и серосодержащих минералов и прогнозирования степени их разрушения в газожидкостной среде» на 2009-2012 гг (№ гос. регистрации 000140); «Разработка физико-химических и тепломассообменных основ уменьшения газовых выбросов котлоагрегатов и эколого-экономическая оценка их воздействий на окружающую природную среду» МОН КР на 2012 г (№ гос. регистрации 0005861); «Разработка физико-химических основ термической деструкции стойких органических загрязнителей и снижение их концентраций в окружающей природной среде» (МОН КР, 2012-2021 гг., № гос. регистрации 0007082; 0007669).

**Целью исследования** является снижение концентрации сажи в дымовых газах путем приготовления и сжигания водомазутных эмульсий в промышленных котлоагрегатах типа Е-1/9М(3) Мостостроительного отряда Кыргызской железной дороги, г. Бишкек.

**Задачи исследования:**

1. Экспериментальное определение концентрации сажи в дымовых газах путем отбора пробы твердых частиц из дымовой трубы промышленных котлоагрегатов типа Е-1/9М(3) на основе multifunctional Visit 01-L/LR и переносного газоанализаторов типа УГ-2 по стандартной методике 5506 и 5515 «NIOSH Manual of Analytical Methods»;
2. Определение линейного размера частиц водомазутной эмульсии методом седиментационного анализа; определение содержание воды в водомазутной эмульсии конденсаторным (емкостным) датчиком;
3. термодинамическое моделирование процесса сжигания мазута в виде водомазутных эмульсий при различных соотношениях газо-жидкостных потоков, температуры и расчет концентрации углерод, водород, кислород, азот и серосодержащих содержащих частиц, молекул и конденсированного углерода в газовой фазе;
4. Разработка принципиальной технологической схемы приготовления и сжигания водомазутных эмульсий в промышленных котлоагрегатах типа Е-1/9М(3) и снижение концентрации сажи в дымовых газах.

**Научная новизна работы.** Термодинамическое моделирование процесса окисление системы мазут-воздух и мазут-вода-воздух показало изменение параметров: энтропии, энтальпии, внутренней энергии, а также число Прандтля и конденсированного углерода. Отмечено, что при сжигании водомазутной эмульсии достигнуто увеличение содержание атомарного водорода в газовой фазе, т.е. отношение Н/С выше в 2,26 раза по сравнению с сжиганием мазута; впервые составлена принципиальная технологическая схема приготовления и сжигания водомазутных эмульсий (ВМЭ) в промышленных котлоагрегатах типа Е-1/9М(3) Мостостроительного отряда Кыргызской железной дороги, г.Бишкек. Получен акт внедрения от 19.07.2022г.

**Практическая значимость полученных результатов.** Разработана принципиальная технологическая схема приготовления и сжигания водомазутных эмульсий в промышленных котлоагрегатах типа Е-1/9М (3) Мостостроительного отряда Кыргызской железной дороги, г. Бишкек. Снижение концентрации сажи в дымовых газах составила 75%, а утилизация сточной воды в процессе приготовления водомазутных эмульсий достигла 15%. Экономия топлива при сжигании водомазутной эмульсии 22,385 т/год или 3,44%. Результаты термодинамического моделирования системы: мазут-воздух, мазут-вода-воздух апробированы в практических условиях; методология установление размера частиц и определение содержание воды в водомазутной эмульсии в котельной полезны в экологических исследованиях топливных систем, и они могут быть использованы в специальных курсах геоэкологии.

**Экономическая значимость полученных результатов.** Использование водомазутных эмульсий в промышленных котлоагрегатах средней и малой мощности привело к уменьшению концентрации вредных веществ, в том числе сажи в газовой фазе, что и открывает возможности оценки углеродного следа в различных техногенных системах, а также полезна при установлении углеродного налога в хозяйствующих субъектах.

**Основные положения диссертации, выносимые на защиту:**

-физико-химические матрицы термодинамического моделирования процесса деструкции системы: мазут - воздух, мазут - вода - воздух, термодинамические параметры, сравнительные их характеристики; равновесные составы и концентрации компонентов, частиц, конденсированного углерода и их распределение в газовой фазе;

-методология расчета линейного размера частиц, определение содержания воды в водомазутной эмульсии и концентрации сажи в дымовых газах;

-влияние воды в водомазутных эмульсиях на процессы образования и уменьшения концентрации сажи (изменение  $C_k$  и  $H/C$ ) в газовой фазе;

-принципиальная технологическая схема приготовления и сжигания водомазутных эмульсий в промышленных котлоагрегатах типа Е-1/9М(3) Мостостроительного отряда Кыргызской железной дороги, г. Бишкек.

**Личный вклад соискателя** заключается в составлении физико-химической матрицы системы: мазут - воздух, мазут - вода - воздух, расчета термодинамических параметров, равновесных составов и концентраций компонентов, частиц, конденсированного углерода, и в установлении концентрационного распределения их в газовой фазе; определении концентрации сажи в дымовых газах, линейного размера частиц и содержание воды в водомазутной эмульсии; составлении принципиальной технологической схемы приготовления и сжигания водомазутных эмульсий (ВМЭ) в промышленных котлоагрегатах типа Е-1/9М(3) Мостостроительного

отряда Кыргызской железной дороги, г. Бишкек, а также природоохранные мероприятия по снижению концентрации сажи в газовой фазе.

**Апробация результатов исследований.** Основные результаты исследования докладывались на международных научно - практических конференциях: «International conference on environmental science and technology» (Турция, Невшехир, 2013); «Современное развитие химических, биологических наук и педагогическое образование» (КГУ им. И. Арабаева, Бишкек, 2014); «International Conference on Civil and Environmental Engineering» (Турция, Невшехир, 2015); «The Eurasian Agriculture and Natural Sciences Congress» (КТУ «Манас», Бишкек, 2017); научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов магистрантов и студентов «Наука, образование, инновации и технологии: оценки, проблемы, пути решения», КГГУ им. академика У. Асаналиева МОН КР, ИА КР, Бишкек, 28-29 апреля 2022; научных семинарах отделения экологической инженерии КТУ «Манас» (Бишкек, 2017-2023 гг.) и на расширенном заседании кафедры «Геоэкология и промышленная безопасность» Кыргызского государственного университета геологии, горного дела и освоения природных ресурсов им. академика У. Асаналиева МОН КР (Бишкек, 2022гг.).

**Полнота отражения результатов диссертации в публикациях.** По материалам диссертации опубликовано 10 научных статей, в том числе в издательствах, входящих в систему WOS, EBSCOHost и РИНЦ.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, 3 глав, выводов и приложения. Перечень использованной литературы включает 132 наименований. Работа изложена на 129 страницах компьютерного текста, включающего 21 таблицу, 27 рисунков.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Введение.** Представлена актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, определены основные защищаемые положения, приводятся методы исследований, определена научная новизна, практическая и экономическая ценность работы, а также отмечены личный вклад соискателя, публикации, апробация результатов и кратко излагается структура диссертации.

### **Глава 1. Обзор литературы**

**Сажа - как техногенный продукт разложения и окисления углеводородного топлива.** Одним из загрязняющих атмосферу компонентов продуктов сжигания углеводородных топлив являются частицы сажи, отличающиеся высокой стабильностью и, следовательно, способностью к длительному сохранению в условиях окружающей среды (Бакиров Ф.Г.). Эта особенность, а также возможность адсорбции на поверхности частиц сажи

активных и канцерогенных веществ, требуют разработки и внедрения эффективных природоохранных работ по снижению выбросов частиц сажи, особенно в промышленных топочных устройствах средней и малой мощности. Образование и выгорание сажи (изменение  $C_k$  и  $H/C$ ) при горении углеводородных топлив следует рассматривать как, совокупность чрезвычайно сложных физико-химических и тепло - и массообменных процессов, которые требуют системных научных исследований и осуществления на их основе природоохранных мероприятий. С учетом изложенных выше обстоятельств, в обзоре литературы подробно рассмотрены источники загрязнения окружающей среды техногенной сажой, процессы конверсии техногенной сажи в парогазовой среде при изменении температуры, спектры концентрационного распределения углеродсодержащих частиц (изменение  $H/C$ ) в газовой фазе, в том числе конденсированного углерода ( $C_k$ ). Изложены современные методики определения сажевых частиц в газовой фазе. Определены основные задачи исследования.

## **Глава 2. Методология и методы исследования**

**Объект исследования:** системы мазут-воздух, мазут-вода-воздух и их геоэкологические состояния в промышленных котлоагрегатах.

**Предмет исследования:** физико-химическая матрица системы; линейные размеры частиц дисперсной фазы и содержание воды в водомазутной эмульсии; процессы окисления мазута в системе вода-воздух; термодинамические и физико-химические характеристики системы; принципиальная технологическая схема процесса приготовления и сжигания водомазутных эмульсий и снижение концентрации сажи в промышленных котлоагрегатах типа Е-1/9М(3) Мостостроительного отряда Кыргызской железной дороги, г. Бишкек (настоящее название- Государственное предприятие «Мостостроительный отряд» национальной компании «Кыргыз темир жолу»).

**Составление физико-химической матрицы системы.** С целью определения влияния воды в водомазутных эмульсиях на процессы образования и снижения концентрации сажи (изменение  $C_k$  и  $H/C$ ) в газовой фазе сначала была рассмотрена модельная система: мазут-воздух и мазут-вода-воздух. В расчетных экспериментах использовано термодинамическое моделирование процесса окисления мазута и водомазутной эмульсии при максимуме энтропии системы на основе программного комплекса «Терра» (Трусов Б.Г.). Принят следующий средний состав газо-жидкостных потоков: оптимальное количество воды в водомазутной эмульсии, которое не приводит к обводнению мазута составило 15%. Элементный состав топочного мазута включил (%): С- 84,8; Н -11,2; S-2,0; N-0,5; О-1,5. Количество воздуха принято в избытке, т.е. альфа-фактор равен 1,05. Теоретическое количество воздуха ( $V_B^o$ ) для горения 1 кг мазута при нормальных условиях равно 10,53 м<sup>3</sup>/кг; объем воздуха ( $V_B$ ), фактически поступивший в зону горения 11,06 м<sup>3</sup>/кг (1,05x10.53=11,06 м<sup>3</sup>/кг), а при T=300К, P=99500Па составил  $V_B=12,38$  м<sup>3</sup>/кг,

плотность воздуха  $1,15 \text{ кг/м}^3$ , масса воздуха  $12,72 \text{ кг}$ , т.е. для горения  $1 \text{ кг}$  мазута количество кислорода и азота составило (кг):  $2,67$  и  $10,05$ , соответственно. С учетом указанных выше данных составлена физико-химическая матрица модельной системы мазут-вода-воздух (%): мазут С ( $84,8$ ) – Н ( $11,2$ ) – S ( $2,0$ ) – N ( $0,5$ ) – O ( $1,5$ ); вода (15) и воздух N ( $10,05$ ) – O ( $2,67$ ). Химический состав смеси включил следующие элементы (моль/кг): С –  $55,279$ ; Н –  $100,043$ ; S –  $0,488$ ; N –  $5,897$ ; O –  $8,56$ . Расчеты проводились в широких пределах изменения температуры от  $500$  до  $3000 \text{ К}$  при давлении  $P = 0,1 \text{ МПа}$ .

**Определение содержание воды в водомазутной эмульсии.** В процессе приготовления водомазутной эмульсии в промышленных котлоагрегатах типа Е-1/9М(3) Мостостроительного отряда Кыргызской железной дороги, г. Бишкек использована отработанная замазученная сточная вода (5-15%). Определение содержание воды в водомазутной эмульсии осуществлено на основе емкостного датчика (конденсатора, состоящего из двух электродов: наружного и внутреннего), вмонтированного на фланцевых соединениях трубопроводов мазутонасосной линии котельной. При тарировке датчика в межэлектродное пространство непрерывно подавалась диэлектрическая жидкость (мазут). В опытах применялся обезвоженный мазут с последующим добавлением воды и установлены зависимости емкости конденсатора ( $C_x$ ) от содержания воды в мазуте. В практических условиях заданное соотношение вода-мазут автоматически поддерживалось эжектором-дозатором при изменении расхода мазута. Дозировка жидкости осуществлялась насосами, а контроль расхода воды и мазута производился расходомерами дроссельного типа. Кроме того, расходная емкость имела тарировку по жидкости и снабжена поплавковым устройством (Маймеков З.К., Иманакунов С.Б., Молдобаев М.Б.).

**Определение линейного размера частиц водомазутной эмульсии.** Осуществлено методом седиментационного анализа с использованием торсионных весов модификации ВТ-500 (Сулин В.А.). Опыты проводились с отбором пробы водомазутной эмульсии с роторно-пульсационных аппаратов (РПА). Определены скорости оседания или всплывания диспергированных частиц воды в мазуте (Маймеков З.К.). Мазут, заранее был разбавлен авиационным керосином (толуолом или бензолом) для высливания воды. При этом измерена глубина погружения чашки (Н) в обратной эмульсии (вода в мазуте) и оседание в ней капельки воды. Учтены плотности: керосина ( $\rho_K$ ), воды ( $\rho_{H_2O}$ ), смеси эмульсии с керосином ( $\rho_{Э+К}$ ), а также вязкости смеси эмульсии с керосином ( $\eta_{Э+К}$ ), а также константа (К) зависящей от свойств частиц и дисперсионной среды. На основании величины скорости установившейся седиментации были вычислены радиус и диаметр частиц водомазутной эмульсии.

Отбор пробы сажи из дымовой трубы ( $H = 18 \text{ м}$ ,  $D = 0,5 \text{ м}$ ,  $V_{г.см} = 0,889 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $t_{д.г.} = 220 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $F = 1$ ,  $v = 5,0 \text{ м/с}$ ) осуществлен газоуловителем типа Vortex Ultra Flow; измерение концентрации сажи в дымовых газах осуществлено



мультифункциональным газоанализатором Visit 01-L/LR, а также переносным газоанализатором типа УГ-2. Пробы анализированы по стандартной методике 5506 и 5515 «NIOSH Manual of Analytical Methods» с последующим использованием гравиметрических методов для определения содержания сажи в дымовых газах котлоагрегатов типа Е-1/9М(3) (Кемелов К.А., Молдобаев М.Б.).

### **Глава 3. Результаты собственных исследований**

**Система мазут-воздух.** Из топочной практики известно, что в мазуте содержатся от 3 до 5% воды, из-за нагрева его острым паром с целью придания текучести. При этом вода в мазуте носит линзовое распределение. Такое послойное распределение мазут-вода-мазут не приводит к образованию полидисперсных обратных эмульсий. Соответственно, было целесообразно получить обратных эмульсий на основе роторно-пульсационного аппарата, где количество диспергированной фазы, т.е. воды в мазуте составило до 15%. С учетом этих обстоятельств сначала была изучена система мазут-воздух при температурном режиме от 500 до 3000 К и установлено концентрационное распределение углерод, водород, кислород, азот и сера содержащих частиц, молекул и конденсированного углерода в газовой фазе.

В таблице 1 представлены равновесные концентрации молекул и частиц, образующиеся при теоретической температуре горения мазута:  $T = 2000 \text{ К}$ ,  $P = 0,1 \text{ МПа}$ . Отмечено образование значительного количества конденсированного углерода  $C_{(c)} = 63,3 \text{ моль/кг}$ . При этом отношение Н/С в случае сжигания мазута составило  $0,01/0,34 \cdot 10^{-9}$ . Кроме того, выявлены следовые количества и других углеродсодержащих простых и сложных частиц в газовой фазе:  $C_2$ ,  $C_2O$ ,  $CH_3$ ,  $C_2H_3$ ,  $C_3H$ ,  $CHO$ ,  $C_3$ ,  $C_3O_2$ ,  $CH_4$ ,  $C_2H_4$ ,  $CHO_2$ ,  $CH$ ,  $C_2H$ ,  $C_2H_5$ ,  $C_4H$ ,  $CHO^+$ ,  $C$ ,  $CO_2$ ,  $CH_2$ ,  $C_2H_2$ ,  $C_2H_6$ ,  $C_4H_2$ ,  $CH_2O_2$  и др. (табл.1, рис.1).

Расчетные эксперименты показали, что при сжигании мазута содержание конденсированного углерода и оксида углерода значительное:  $C(c) = 63,3 \text{ моль/кг}$ ,  $CO = 2,81 \text{ моль/кг}$ , т.е. явно наблюдается неполное сгорание жидкого топлива. Поэтому, в практических условиях требуется модифицирование мазута в виде полидисперсных эмульсий на основе водной присадки, т.е. с добавлением ее в мазут, и тем самым увеличивая содержания водорода и кислорода в топливной смеси: мазут-вода-воздух.

**Система мазут-вода-воздух.** Повышение эффективности использования топочного мазута в промышленных котлоагрегатах типа Е-1/9М(3) Мостостроительного отряда Кыргызской железной дороги, г. Бишкек достигнуто за счет модифицирования его в виде водомазутных эмульсий (ВМЭ). Соответственно рассмотрена модельная система: мазут-вода-воздух при 5 %, 10 % и 15 % содержаниях воды в мазуте. С увеличением количества воды в мазуте (более 15 %) наблюдается его обводнение. Процессы

обводнения мазута не желательны с точки зрения инверсии фаз, приводящей к коррозии оборудования, и к снижению КПД котлоагрегатов (Маймеков З.К.).

Таблица 3.1 - Равновесные концентрации молекул, частиц и конденсированного углерода (моль/кг), образующиеся в газовой фазе при окислении мазута в воздухе.  $T = 2000 \text{ K}$ ,  $P = 0.1 \text{ МПа}$

$O = 0.63 \cdot 10^{-10}$	$H = 0.01$	<b><math>H_2 = 4.09</math></b>	$OH = 0.32 \cdot 10^{-7}$
<b><math>H_2O = 0.12 \cdot 10^{-3}</math></b>	$S = 0.003$	$S_2 = 0.11$	$S_3 = 0.58 \cdot 10^{-4}$
$S_4 = 0.96 \cdot 10^{-8}$	$S_5 = 0.14 \cdot 10^{-9}$	$SO = 0.62 \cdot 10^{-6}$	$SO_2 = 0.34 \cdot 10^{-10}$
$S_2O = 0.14 \cdot 10^{-7}$	$SH = 0.04$	$H_2S = 0.25$	$HSO = 0.67 \cdot 10^{-10}$
$SOH = 0.92 \cdot 10^{-9}$	$H_2SO = 0.7 \cdot 10^{-11}$	$N = 0.54 \cdot 10^{-8}$	$N_2 = 3.25$
$NO = 0.96 \cdot 10^{-9}$	$NH = 0.57 \cdot 10^{-7}$	$NH_2 = 0.24 \cdot 10^{-6}$	$NH_3 = 0.26 \cdot 10^{-4}$
$N_2H_2 = 0.34 \cdot 10^{-11}$	$NS = 0.14 \cdot 10^{-4}$	<b><math>C(c) = 63.3</math></b>	$C = 0.34 \cdot 10^{-9}$
$C_2 = 0.25 \cdot 10^{-10}$	$C_3 = 0.31 \cdot 10^{-9}$	<b><math>CO = 2.81</math></b>	$CO_2 = 0.18 \cdot 10^{-4}$
$C_2O = 0.57 \cdot 10^{-8}$	$C_3O_2 = 0.16 \cdot 10^{-9}$	$CH = 0.11 \cdot 10^{-8}$	$CH_2 = 0.11 \cdot 10^{-6}$
$CH_3 = 0.35 \cdot 10^{-4}$	<b><math>CH_4 = 0.65 \cdot 10^{-3}</math></b>	$C_2H = 0.61 \cdot 10^{-6}$	$C_2H_2 = 0.003$
$C_2H_3 = 0.11 \cdot 10^{-5}$	$C_2H_4 = 0.79 \cdot 10^{-5}$	$C_2H_5 = 0.11 \cdot 10^{-8}$	$C_2H_6 = 0.14 \cdot 10^{-8}$
$C_3H = 0.49 \cdot 10^{-5}$	$C_3H_4 = 0.13 \cdot 10^{-9}$	$C_4H = 0.16 \cdot 10^{-9}$	$C_4H_2 = 0.17 \cdot 10^{-4}$
$CHO = 0.98 \cdot 10^{-6}$	$CHO_2 = 0.4 \cdot 10^{-11}$	$CH_2O = 0.42 \cdot 10^{-6}$	$CH_2O_2 = 0.11 \cdot 10^{-10}$
$CS = 0.127$	$CS_2 = 0.45$	$COS = 0.007$	$CN = 0.34 \cdot 10^{-5}$
$CN_2 = 0.10 \cdot 10^{-7}$	$CS = 0.07$	$CS_2 = 0.02$	$COS = 0.001$
$CN = 0.75 \cdot 10^{-5}$	$C_2N = 0.70 \cdot 10^{-8}$	$C_2N_2 = 0.59 \cdot 10^{-5}$	$NCO = 0.42 \cdot 10^{-10}$
$HCN = 0.06$	$HNC = 0.49 \cdot 10^{-5}$	$C_2HN = 0.18 \cdot 10^{-7}$	$C_3HN = 0.46 \cdot 10^{-3}$
$C_5HN = 0.34 \cdot 10^{-3}$	$C_7HN = 0.7 \cdot 10^{-4}$	$C_9HN = 0.14 \cdot 10^{-4}$	$N_2C = 0.33 \cdot 10^{-5}$
$SH^- = 0.17 \cdot 10^{-11}$	$NH_4^+ = 0.29 \cdot 10^{-11}$	$CHO^+ = 0.1 \cdot 10^{-11}$	$CN^- = 0.14 \cdot 10^{-11}$

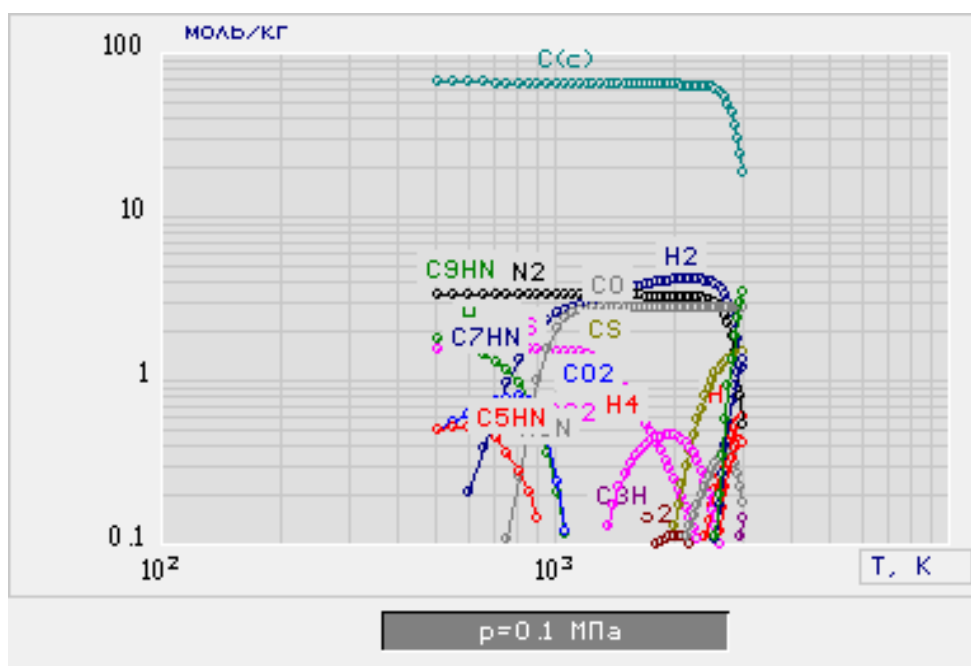


Рисунок 3.1. - Концентрационное распределение частиц, молекул и конденсированного углерода (моль/кг) в газовой фазе в зависимости от температуры окисления мазута в воздухе,  $T = 500 - 3000 \text{ K}$ ,  $P = 0,1 \text{ МПа}$

С учетом вышеизложенного при изучении системы мазут-вода-воздух был принят следующий средний состав газо-жидкостных потоков (%): мазут С (84,8) - Н (11,2) - S (2,0) - N (0,5) – О (1,5); вода (15) и воздух N (10,05) - О (2,67). В таблице 3.2. представлены равновесные концентрации молекул, частиц и конденсированного углерода, образующиеся при окислении мазута в смеси вода-воздух, т.е. водомазутной эмульсии при  $T=2000$  К и  $C_{H_2O}=15\%$ .

Таблица 3.2 - Равновесные концентрации молекул, частиц и конденсированного углерода (моль/кг), образующиеся в газовой фазе при окислении водомазутной эмульсии. Содержание воды в мазуте **15 %**,  $T = 2000$  К,  $P = 0,1$  МПа

$O = 0.19 \cdot 10^{-9}$	$H = 0.08$	<b><math>H_2 = 49.46</math></b>	$OH = 0.14 \cdot 10^{-6}$
<b><math>H_2O = 0.81 \cdot 10^{-3}</math></b>	$S = 0.001$	$S_2 = 0.006$	$S_3 = 0.34 \cdot 10^{-6}$
$S_4 = 0.58 \cdot 10^{-11}$	$SO = 0.19 \cdot 10^{-6}$	$SO_2 = 0.59 \cdot 10^{-11}$	$S_2O = 0.46 \cdot 10^{-9}$
$SH = 0.03$	$H_2S = 0.30$	$HSO = 0.30 \cdot 10^{-10}$	$SOH = 0.42 \cdot 10^{-9}$
$H_2SO = 0.51 \cdot 10^{-11}$	$N = 0.11 \cdot 10^{-7}$	$N_2 = 2.84$	$NO = 0.11 \cdot 10^{-8}$
$NH = 0.18 \cdot 10^{-6}$	$NH_2 = 0.11 \cdot 10^{-5}$	$NH_3 = 0.19 \cdot 10^{-3}$	$N_2H_2 = 0.66 \cdot 10^{-11}$
$NS = 0.32 \cdot 10^{-5}$	<b><math>C_{(c)} = 46.3</math></b>	$C = 0.18 \cdot 10^{-8}$	$C_2 = 0.13 \cdot 10^{-9}$
$C_3 = 0.17 \cdot 10^{-8}$	<b><math>CO = 8.55</math></b>	$CO_2 = 0.30 \cdot 10^{-4}$	$C_2O = 0.17 \cdot 10^{-7}$
$C_3O_2 = 0.28 \cdot 10^{-9}$	$CH = 0.90 \cdot 10^{-8}$	$CH_2 = 0.14 \cdot 10^{-5}$	$CH_3 = 0.62 \cdot 10^{-3}$
<b><math>CH_4 = 0.017</math></b>	$C_2H = 0.50 \cdot 10^{-5}$	$C_2H_2 = 0.04$	$C_2H_3 = 0.19 \cdot 10^{-4}$
$C_2H_4 = 0.21 \cdot 10^{-3}$	$C_2H_5 = 0.45 \cdot 10^{-7}$	$C_2H_6 = 0.85 \cdot 10^{-7}$	$C_3H = 0.40 \cdot 10^{-4}$
$C_3H_4 = 0.35 \cdot 10^{-8}$	$C_3H_6 = 0.34 \cdot 10^{-10}$	$C_3H_8 = 0.10 \cdot 10^{-11}$	$C_4H = 0.13 \cdot 10^{-8}$
$C_4H_2 = 0.20 \cdot 10^{-3}$	$C_4H_4 = 0.71 \cdot 10^{-11}$	$C_5H_6 = 0.90 \cdot 10^{-11}$	$C_6H_6 = 0.35 \cdot 10^{-10}$
$CHO = 0.44 \cdot 10^{-5}$	$CHO_2 = 0.12 \cdot 10^{-10}$	$CH_2O = 0.28 \cdot 10^{-5}$	$CH_2O_2 = 0.42 \cdot 10^{-10}$
$CH_3O = 0.17 \cdot 10^{-11}$	$CS = 0.07$	$CS_2 = 0.02$	$COS = 0.002$
$CN = 0.74 \cdot 10^{-5}$	$CN_2 = 0.91 \cdot 10^{-8}$	$C_2N = 0.15 \cdot 10^{-7}$	$C_2N_2 = 0.51 \cdot 10^{-5}$
$NCO = 0.51 \cdot 10^{-10}$	$HCN = 0.21$	$HNC = 0.16 \cdot 10^{-4}$	$C_2HN = 0.59 \cdot 10^{-7}$
$C_3HN = 0.001$	$C_5HN = 0.001$	$C_7HN = 0.24 \cdot 10^{-3}$	$C_9HN = 0.45 \cdot 10^{-4}$
$N_2C = 0.28 \cdot 10^{-5}$	-	$SH^- = 0.46 \cdot 10^{-11}$	$NH_4^+ = 0.17 \cdot 10^{-10}$
$CHO^+ = 0.28 \cdot 10^{-11}$	$CN^- = 0.10 \cdot 10^{-10}$	-	-

При окислении водомазутной эмульсии установлено образование активных частиц и молекул в газовой фазе (моль/кг): водород и кислород содержащих: O, H,  $H_2$ , OH,  $H_2O$ , OH; серусодержащих:  $S_2$ ,  $S_3$ ,  $S_4$ , SO,  $SO_2$ ,  $S_2O$ , SH,  $H_2S$ , HSO, SOH,  $H_2SO$ , CS, CS, COS, SH; азотсодержащих: N,  $N_2$ , NO, NH,  $NH_2$ ,  $NH_3$ ,  $N_2H_2$ , NS,  $NH_2$ , NCO, CN, HCN, HNC,  $C_2HN$ ,  $C_3HN$ ,  $C_5HN$ ,  $C_7HN$ ,  $C_9HN$ ,  $N_2C$ ,  $CN_2$ ,  $C_2N$ ,  $C_2N_2$ ,  $NH_4^+$ ,  $CN^-$ ; углеродсодержащих:  $C_{(c)}$ , C,  $C_2$ , C, CO,  $CO_2$ ,  $C_2O$ ,  $C_3O_2$ , CH,  $CH_2$ ,  $CH_3$ ,  $CH_4$ ,  $C_2H$ ,  $C_2H_2$ ,  $C_2H_3$ ,  $C_2H_4$ ,  $C_2H_5$ ,  $C_2H_6$ ,  $C_3H$ ,  $C_3H_4$ ,  $C_3H_6$ ,  $C_3H_8$ ,  $C_4H$ ,  $C_4H_2$ ,  $C_4H_4$ ,  $C_5H_6$ ,  $C_6H_6$ , CHO,  $CHO_2$ ,  $CH_2O$ ,  $CH_2O_2$ ,  $CH_3O$ ,  $CHO^+$  (табл. 3.2, рис. 3.2).

Установлено образование конденсированного углерода и других газовых компонентов (моль/кг): при **5%** содержании воды в мазуте,  $C(c) = 54,96$ ;  $H_2 = 48,96$ ;  $CO = 4,56$ ;  $CH_4 = 0,018$ ;  $CO_2 = 0,9 \cdot 10^{-5}$ ,  $H_2O = 0,46 \cdot 10^{-3}$ , отношение Н/С составило  $0,08/0,17 \cdot 10^{-8}$ ; при **10%** содержании воды в мазуте  $C(c) = 50,45$ ;  $H_2 = 49,22$ ;  $CO = 6,64$ ;  $CH_4 = 0,017$ ;  $CO_2 = 0,18 \cdot 10^{-4}$ ;  $H_2O = 0,64 \cdot 10^{-3}$

<sup>3</sup>;  $H/C = 0,08/0,18 \cdot 10^{-8}$ ; при **15%** содержании воды в мазуте  $C_{(c)} = 46,3$ ;  $H_2 = 49,46$ ;  $CO = 8,55$ ;  $CH_4 = 0,017$ ;  $CO_2 = 0,3 \cdot 10^{-4}$ ;  $H_2O = 0,81 \cdot 10^{-3}$ ;  $H/C = 0,08/0,18 \cdot 10^{-8}$ .

Показано, что при окислении мазута в системе вода-воздух содержание конденсированного углерода (изменение  $H/C$  значительное) в газовой фазе уменьшается (моль/кг): мазут без воды  $C_{(c)} = 63,3$  моль/кг; мазут с **5%**  $H_2O$ ,  $C_{(c)} = 54,96$ ; мазут с **10%**  $H_2O$ ,  $C_{(c)} = 50,45$ ; мазут с **15%**  $H_2O$ ,  $C_{(c)} = 46,3$  (рис. 3.2). Отношение  $H/C$  в случае сжигание водомазутной эмульсии составило  $0,089/0,18 \cdot 10^{-8}$ , т.е.  $H/C$  выше в 2,26 раза по сравнению  $H/C$  системы мазут-воздух.

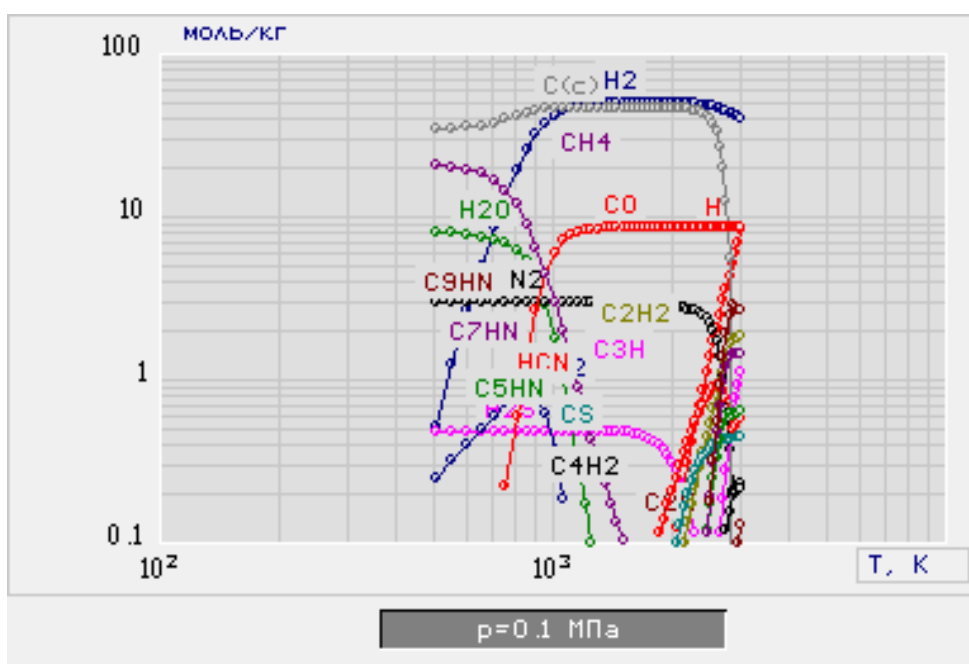


Рисунок 3.2. - Концентрационное распределение частиц, молекул и конденсированного углерода (моль/кг) в газовой фазе в зависимости от температуры окисления мазута в системе вода-воздух.  $C_{H_2O} = 15\%$ ,  $T = 500 - 3000$  К,  $P = 0,1$  МПа.

Концентрация конденсированного углерода в газовой фазе с ростом температуры от 500 до 1750 К растет, а затем уменьшается до нуля (табл. 3.3). Из таблицы 3.3 видно, что в газовой фазе присутствуют горючие газы в различных количествах:  $CO$ ,  $H$ ,  $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $C_2H_6$ ,  $C_3H_8$ ,  $C_4H_{10}$ . Таким образом, парокислородная конверсия мазута привела к образованию водородсодержащего топливного газа. Поэтому, интенсификация химических процессов конверсии углеводородного сырья, в частности мазута в водородсодержащий топливный синтез-газ на основе использования и сжигания высокодисперсных водомазутных эмульсий может быть рассмотрена, как весомая альтернатива современным термokatалитическим процессам переработки жидкого топлива.

Таблица 3.3 - Концентрационное распределение углерод, водород содержащих частиц, молекул и конденсированного углерода (моль/кг) в газовой фазе в зависимости от температуры окисления мазута в системе вода-воздух

$$C_{H_2O} = 15 \%, T = 500 - 3000 \text{ K}, P = 0,1 \text{ МПа}$$

T	C <sub>(e)</sub>	C	CO	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	H	H <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>
500	34.56	1.9·10 <sup>-22</sup>	0.0001	0.24	20.46	2.8·10 <sup>-20</sup>	0.51	3.1·10 <sup>-5</sup>	5·10 <sup>-10</sup>	1.2·10 <sup>-14</sup>
750	39.73	1.9·10 <sup>-22</sup>	0.22	0.70	14.61	7.2·10 <sup>-12</sup>	13.3	0.0001	8·10 <sup>-9</sup>	6.1·10 <sup>-13</sup>
1000	45.87	1.9·10 <sup>-22</sup>	6.04	0.36	2.98	1.1·10 <sup>-7</sup>	41.7	3.7·10 <sup>-5</sup>	1·10 <sup>-9</sup>	9.4·10 <sup>-14</sup>
1250	46.39	1.0·10 <sup>-20</sup>	8.43	0.01	0.43	2·10 <sup>-5</sup>	48.5	3.9·10 <sup>-6</sup>	1·10 <sup>-10</sup>	3.4·10 <sup>-15</sup>
1500	46.60	1.0·10 <sup>-15</sup>	8.54	0	0.10	9·10 <sup>-4</sup>	49.3	7.2·10 <sup>-7</sup>	1·10 <sup>-11</sup>	3.0·10 <sup>-16</sup>
1750	46.58	3.9·10 <sup>-12</sup>	8.55	0	0.03	0.012	49.4	2.1·10 <sup>-7</sup>	3·10 <sup>-12</sup>	5.2·10 <sup>-17</sup>
2000	46.29	1.8·10 <sup>-8</sup>	8.55	3.0·10 <sup>-5</sup>	0.01	0.089	49.4	8.5·10 <sup>-8</sup>	1·10 <sup>-12</sup>	1.3·10 <sup>-17</sup>
2250	45.36	2.2·10 <sup>-7</sup>	8.55	1.0·10 <sup>-5</sup>	0.009	0.41	49.1	4.1·10 <sup>-8</sup>	4·10 <sup>-13</sup>	4.7·10 <sup>-18</sup>
2500	40.21	1.0·10 <sup>-5</sup>	8.55	4.6·10 <sup>-6</sup>	0.005	1.37	47.9	2.1·10 <sup>-8</sup>	1·10 <sup>-13</sup>	1.7·10 <sup>-18</sup>
2750	12.54	0	8.55	2.3·10 <sup>-6</sup>	0.003	3.64	44.2	1.0·10 <sup>-8</sup>	6·10 <sup>-14</sup>	5.3·10 <sup>-19</sup>
3000	0	0	8.55	1.5·10 <sup>-6</sup>	0.001	8.22	40.4	3.5·10 <sup>-9</sup>	1·10 <sup>-14</sup>	7.5·10 <sup>-20</sup>

Осуществлен расчет и сравнение термодинамических параметров системы: мазут-воздух и мазут-вода-воздух (табл. 3.4). Показано, что в системе мазут-вода-воздух значение энтропии выше, соответственно больше взаимодействующих частиц.

Таблица 3.4 - Сравнительные характеристики термодинамических параметров системы: мазут-воздух и мазут-вода-воздух

системы	мазут-воздух	мазут-вода-воздух
<i>температура, K</i>	<i>500-750</i>	<i>500-950</i>
термодинамические параметры		
энтропия S, кДж/(кг·K)	2.49-3.28	7.44-11.49
энтальпия I, кДж/кг	(-498) – (-94,7)	(-3252) – (-162)
внутренняя энергия U, Дж/кг	(-510) – (-125)	(-3307) – (-452)
число Прандтля ( Pr= γ/D)	0.68-0.59	0.69-0.47
доля конденсированной фазы (z)	0.79-0.78	0.41-0.54

Величины энтальпии и внутренней энергии отрицательные в пределах температуры от 500 до 750 K для системы мазут-воздух, а для системы мазут-вода-воздух от 500 до 950 K, поэтому в системе мазут-вода-воздух больше химических превращений. Число Прандтля для системы мазут-вода-воздух меньше, и она более подвержены к разбавлению; доля конденсированной фазы (z) составляет 0,79/0,41 при 500 K и 0,78/0,54 при 950 K, соответственно образование конденсированного углерода (C<sub>K</sub>) в 2 раза меньше в системе мазут-вода-воздух. Таким образом, термодинамические параметры тоже показали в эффективности использования системы мазут-вода-воздух в процессах снижения газовых выбросов, в том числе сажи в промышленных котельных установках.

**Практическая реализация системы мазут-вода-воздух.** Результаты термодинамического моделирования системы мазут-вода-воздух показали, что физико-химической основой окисления водомазутных эмульсий является эффективная организация процесса горения парогазовой смеси за счет микродробления топливной смеси, т.е. фактически, в замене традиционного катализатора - водой обратных эмульсий, приводящей к ускорению химических процессов за счет увеличения поверхности контакта взаимодействующих фаз. С учетом изложенных выше обстоятельств микродробление топливной смеси, а именно мазута и сточной воды достигнуто в разработанном роторно-пульсационном аппарате (Маймеков З.К.). При этом полученные обратные эмульсии имели полидисперсный характер с размерами частиц от 8,92 до 75,12 мкм (табл. 3.5) и они реализованы в промышленных котлоагрегатах типа Е-1/9М(3) Мостостроительного отряда Кыргызской железной дороги, г. Бишкек с технической характеристикой дымовой трубы:  $H = 18$  м,  $D = 0,5$  м,  $V_{г.см} = 0,889$  м<sup>3</sup>/с,  $t_{д.г.} = 220$  °С,  $F = 1$ ,  $v = 5,0$  м/с (см. раздел 2 диссертации).

Таблица 3.5 - Линейное распределение частиц водомазутной эмульсии в топливной смеси:  $H = 0,04$  м,  $\rho_K = 775$  кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_{H_2O} = 1000$  кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_{Э+К} = 820$  кг/м<sup>3</sup>,  $\eta_{Э+К} = 2,46 \cdot 10^{-3}$  Па·с,  $K = 2,5 \cdot 10^{-3}$  м/с

время, мин	масса осадка, мг	кол. вып. осадка во времени, %	скорость оседания, м/с	радиус частиц, мкм	диаметр частиц, мкм
3	5	22,73	0,012	29,51	59,02
5	9	18,18	0,0091	22,79	45,57
8	12	12,63	0,0072	18,07	36,14
11	14	9,10	0,0061	15,41	30,82
15	16	9,09	0,0053	13,20	26,40
20	18	9,09	0,0046	11,43	22,86
30	19,5	6,82	0,0037	9,33	18,66
40	20	2,27	0,0032	8,08	16,16
50	20,5	2,27	0,0029	7,23	14,46
70	21	2,27	0,0024	6,11	12,22
90	21,5	2,28	0,0021	5,39	10,78
110	22	2,27	0,0019	4,87	9,75
130	22	0	0,0018	4,48	8,96

Выше отмечено, что процессы приготовления и сжигания водомазутной эмульсии апробированы согласно разработанной принципиальной технологической схеме в промышленных котлоагрегатах типа Е-1/9М(3) Мостостроительного отряда Кыргызской железной дороги, г. Бишкек (рис.3.3). Согласно схеме мазут после прохождения подогревателя мазута (I), фильтров грубой (II, III, IV) и тонкой (V, VI, VII) очистки, насосами подаются в роторно-пульсационные аппараты РПА (VIII, IX). Вода из бака (X) поступает в РПА. На основе смеси, состоящей из 85% мазута и 15% воды, образуются полидисперсные водомазутные эмульсии, и они направляются в форсунки, а

затем в зону горения. Управление расхода потоков на трубопроводах осуществляется вентилями (1-20,22-24,26-29) и обратными клапанами (21,25). Технические характеристики установки: электродвигатель, кВт (об/мин) - 4,0 (1500); расход мазута, 0,1-0,15 м<sup>3</sup>/час; расход воды, 0,01 – 0,015 м<sup>3</sup>/час; температура воды и ВМЭ, 40 - 45°С (прерывистая линия на рис.3: направление и путь водомазутной эмульсии).

Измерения и расчет концентраций загрязняющих веществ в дымовых газах проводили в процессах сжигания мазута (табл.6) и водомазутных эмульсий (табл.7) с учетом параметров дымовой трубы: Н=18м, D=0,5м, объема газо-воздушной смеси V<sub>г.см</sub>=0,889 м<sup>3</sup>/с, температуры дымовых газов t<sub>д.г.</sub>=220°С, скорости осаждения частиц F=1, скорости ветра  $\lambda$ =5,0 м/с.

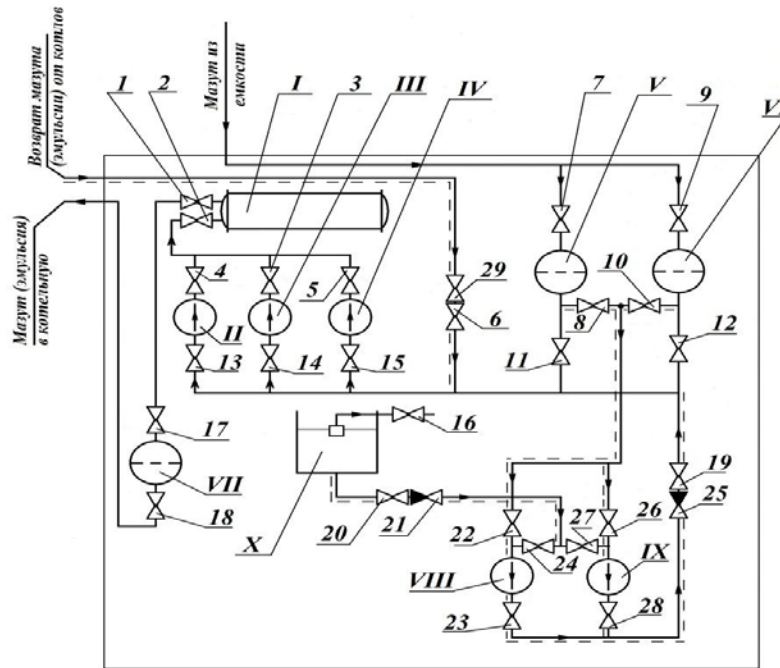


Рисунок 3.3. - Принципиальная технологическая схема приготовления и сжигания водомазутной эмульсии в промышленных котлоагрегатах типа Е-1/9-М (3): I - подогреватель мазута; II, III, IV - фильтры грубой очистки; V, VI, VII - фильтры тонкой очистки; VIII, IX- роторно-пульсационные аппараты; X- бак для воды; 1-20, 22-24, 26-29 -вентили; 21, 25 - обратные клапаны.

Таблица 3.6 - Сжигание мазута и расчет концентраций загрязняющих веществ в газовой фазе

компоненты газовых выбросов	ПДК, мг/м <sup>3</sup>	кол. веществ, выбрасываемых в атмосферу		сумма максимальных приземных концентраций (доли ПДК), создаваемых выбросами источника
		макс., г/с	сум., т/год	
СО	3,0	0,071	2,242	0,00356
NO <sub>x</sub>	0,085	0,069	2,186	0,12205
SO <sub>2</sub>	0,5	0,444	14,016	0,13351
C <sub>x</sub> H <sub>y</sub>	1,5	1,067	33,638	0,10695
<b>сажа</b>	<b>0,15</b>	<b>0,046</b>	<b>1,458</b>	<b>0,04611</b>

Таблица 3.7 - Сжигание водомазутных эмульсий и расчет концентраций загрязняющих веществ в газовой фазе

компоненты газовых выбросов	ПДК, мг/м <sup>3</sup>	кол. веществ, выбрасываемых в атмосферу		сумма максимальных приземных концентраций (доли ПДК), создаваемых выбросами источника
		макс., г/с	сум., т/год	
СО	3,0	0,021	0,673	0,00145
NO <sub>x</sub>	0,085	0,023	0,729	0,04953
SO <sub>2</sub>	0,5	0,427	13,455	0,12299
C <sub>x</sub> H <sub>y</sub>	1,5	0,391	12,334	0,04901
<b>сажа</b>	<b>0,15</b>	<b>0,012</b>	<b>0,364</b>	<b>0,02005</b>

В таблицах 3.8 и 3.9 приведены сравнительные характеристики сажи, полученные в процессах сжигания мазута и водомазутной эмульсии в различных типах промышленных котлоагрегатах средней и малой мощности (ДКВР- 2,5- 13, ДКВР- 6,5- 13, ДЕ- 10-14, ДЕ- 25 -14, ГМ- 50, Б- 25- 15, ДКВР- 4/13, ПТВМ- 30М, КЕ<sub>в</sub>- 4- 14) с указанием: высоты (H<sub>тр</sub>), диаметра дымовой трубы (D<sub>тр</sub>), объема газо-воздушной смеси (V<sub>д.г</sub>), температуры дымовых газов (T<sub>д.г</sub>), скорости ветра (U<sub>в</sub>), концентрации сажи (С), годовых выбросов сажи в газовой фазе (Маймеков З.К., Самбаева Д.А., Молдобаев М.Б.). Здесь следует отметить, что при сжигании водомазутных эмульсий снижаются концентрации сажи (предмет настоящих исследований), а также концентрации основных газовых компонентов (СО, NO<sub>x</sub>, C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>, SO<sub>2</sub>), которые подробно исследованы в других работах (Маймеков З.К., Самбаева Д.А. и др.).

Таблица 3.8 - Снижение концентраций загрязняющих веществ в дымовых газах промышленных котлоагрегатов типа Е-1/9М(3) при сжигании водомазутных эмульсий

компоненты газовых выбросов	количество вредных веществ						снижение газовых выбросов, %
	мазут			водомазутная эмульсия			
	мг/м <sup>3</sup>	г/с	т/год	мг/м <sup>3</sup>	г/с	т/год	
SO <sub>2</sub>	500	0,444	14,016	480	0,427	13,455	4,06
NO <sub>x</sub>	78	0,069	2,186	26	0,023	0,729	66,67
СО	80	0,071	2,242	24	0,021	0,673	70,00
C <sub>x</sub> H <sub>y</sub>	1200	1,067	33,638	440	0,391	12,334	63,33
<b>сажа</b>	<b>52</b>	<b>0,046</b>	<b>1,458</b>	<b>13</b>	<b>0,012</b>	<b>0,364</b>	<b>75,00</b>

Таким образом, системы приготовления и сжигания водомазутной эмульсии широко апробированы на ряде промышленных котлоагрегатов.



Отмечено, что во всех котлоагрегатах концентрация сажи при сжигании водомазутной эмульсии уменьшилась в среднем на 67%.

Результаты проведенных исследований показывают, что в эмульсиях обратного типа (вода в мазуте), когда вода в виде мельчайших капелек диаметром 10-100 мкм равномерно распределена по всей массе мазута, способствует более эффективному процессу сгорания жидкого топлива, снижению сажеобразования и уменьшению содержания в выбросах вредных веществ (табл. 3.8 и 3.9).

Таблица 3.9 - Снижение концентрации сажи в дымовых газах в процессе сжигания мазута и водомазутной эмульсии (данные работы Маймекова З.К., Самбаевой Д.А., <sup>(x)</sup>Молдобаева М.Б.)

Котлоагрегаты	$H_T$ , м	$D_T$ , м	$V_{д.г.}$ , м <sup>3</sup> /с	$T_{д.г.}$ , °С	$U_v$ , м/с	$C_{сажа}^{Маз}$ , мг/м <sup>3</sup>	$m_{сажа}^{Маз}$ , т/Г	$C_{сажа}^{ВМЭ}$ , мг/м <sup>3</sup>	$m_{сажа}^{ВМЭ}$ , т/Г	Сниж. сажи, %
ДКВР- 2,5- 13 ДКВР- 6,5- 13 ДЕ- 10-14	32	0,6	14,86	120	3,4	11	1,7	3	0,46	<b>72</b>
ДЕ- 25 -14 ГМ)	80	3,0	9,32	130	1,5	35	10,96	8	2,5	<b>77</b>
ГМ- 50 ДКВР- 6,5/13 Б- 25- 15 (ГМ)	63	3,0	110,8	130	4,3	44	153,93	14	48,98	<b>68</b>
ДКВР- 4/13 ПТВМ- 30М	40 40	2 2	2,5 39,72	185 185	3,7 3,7	55 30	4,34 21,81	21 14	1,66 10,18	<b>61</b> <b>53</b>
КЕ <sub>в</sub> - 4- 14(2)	25	1,0	5,44	130	3,0	61,5	4,39	20,3	1,45	<b>67</b>
<sup>(x)</sup> Е- 1/9 М(3)	<b>18</b>	<b>0,5</b>	<b>0,889</b>	<b>220</b>	<b>5.0</b>	<b>52</b>	<b>1,458</b>	<b>13</b>	<b>0,364</b>	<b>75</b>

Повышение эффективности сгорания водомазутной эмульсии по сравнению с мазутом объясняется явлением микровзрыва (Маймеков З.К.). Сущность его заключается в том, что вследствие большой разницы в температурах кипения воды (100°С) и мазута (300°С) каждая капля обратной эмульсии в процессе термического эффекта увеличивается в объеме под действием образовавшегося внутри водяного пара, а затем разрывается на части. Внутри топочное дробление капель в котлоагрегатах, обусловленное микровзрывами, резко увеличивает реакционную поверхность и улучшает смешение горючего с воздухом. Соответственно, капли водомазутной эмульсии сгорают быстрее, чем исходные капли мазута. На повышение скорости выгорания ВМЭ позитивное влияние оказывает увеличение концентраций в зоне горения активных радикалов (О, Н, ОН), обусловленные за счет введение водных присадок в жидкое топливо.

## ВЫВОДЫ

1. В процессе сжигания водомазутной эмульсии концентрации сажи в газовой фазе уменьшилась из-за увеличения атомарного водорода в газовой фазе, т.е. ростом отношений  $H/C$ , а также изменением концентрации конденсированного углерода (моль/кг): (мазут без воды  $C_{(c)} = 63,3$  моль/кг); мазут с **5 %**  $H_2O$ ,  $C_{(c)} = 54,96$ ; мазут с **10 %**  $H_2O$ ,  $C_{(c)} = 50,45$ ; мазут с **15 %**  $H_2O$ ,  $C_{(c)} = 46,3$ . Показано, что отношение  $H/C$  в случае сжигание водомазутной эмульсии выше в 2,26 раза по сравнению окислением мазута.
2. Линейные размеры частиц водомазутной эмульсии определены методом седиментационного анализа, и они имеют полидисперсный характер (диаметр от 8,96 до 59,02 мкм). Содержание воды в мазуте в процессе приготовления водомазутной эмульсии в промышленных котлоагрегатах контролировалось конденсаторным датчиком, вмонтированным на фланцевых соединениях трубопроводов мазутонасосной линии. Расходы воды автоматически поддерживалось эжектором-дозатором.
3. Изучены системы мазут-воздух, мазут-вода-воздух при широких пределах изменения температуры (от 500 до 3000 К) и соотношениях газожидкостных потоков (5-15 % воды в мазуте) при максимуме энтропии системы и выявлено изменение концентрации конденсированного углерода, т.е. соотношение  $H/C$  в процессе образования сажевых частиц в дымовых газах. Осуществлено термодинамическое моделирование системы: мазут-воздух, мазут-вода-воздух. Рассчитаны термодинамические параметры системы (энтропия, энтальпия, внутренняя энергия) и получены сравнительные их характеристики. Установлено концентрационное распределение водород, углерод, азот, сера и кислород содержащих молекул, частиц и конденсированного углерода в газовой фазе.
4. Разработана принципиальная технологическая схема приготовления и сжигания мазута в виде водомазутных эмульсий в промышленных котлоагрегатах типа Е- 1/9- М(3) Мостостроительного отряда Кыргызской железной дороги, г. Бишкек. Показано, что при сжигании водомазутных эмульсий в промышленных котлоагрегатах содержание сажи в дымовых газах снижается в среднем на 67 % за счет развитой поверхности контакта взаимодействующих фаз и более полного сгорания частиц водомазутных эмульсий. Получен акт внедрения от 20.07.2022 г.

## ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

Разработанная принципиальная технологическая схема по приготовлению и сжиганию водомазутных эмульсий в промышленных котлоагрегатах малой и средней мощности полезна для утилизации замазученной сточной воды и снижения концентрации вредных веществ, в том числе сажи в газовой фазе.

## СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

1. **Молдобаев М.Б.** Техногендик газдардын көлөмдүк концентрацияларынын температурага байланыштуу өзгөрүүсү [Текст] / М.Б. Молдобаев, Д.А. Бейшенкулова, Д.А. Самбаева, З.К. Маймеков // Известия вузов. Бишкек. – 2013 – №1. – С. 9-12 - Режим доступа: [http://www.science-journal.kg/media/Papers/ivk/2013/1/ivk\\_1-2013-10-13.pdf](http://www.science-journal.kg/media/Papers/ivk/2013/1/ivk_1-2013-10-13.pdf)
2. **Молдобаев М.Б.** Влияние воды в топливных эмульсиях на процессы образования и уменьшения концентрации сажи в газовой фазе [Текст] / З.К. Маймеков, Д.А. Самбаева, М.Б. Молдобаев, К.А. Кемелов // Известия вузов Бишкек. – 2014 – №5. – С. 8-11 - Режим доступа: <http://www.science-journal.kg/media/Papers/ivk/2014/5/ivk-2014-N5-8-11.pdf.pdf>
3. **Молдобаев М.Б.** Модифицирование топлива в виде водотопливных эмульсий с целью снижения концентрации сажи в газовой фазе / Д.А. Самбаева, М.Б. Молдобаев // Известия КГТУ им. И. Раззакова. Бишкек. – 2014. – № 33. С. 399-401  
Режим доступа: [https://www.elibrary.ru/download/elibrary\\_36614568\\_18809335.pdf](https://www.elibrary.ru/download/elibrary_36614568_18809335.pdf)
4. **Молдобаев М.Б.** Снижение концентрации сажи в газовой фазе на основе использования водотопливных эмульсий в котлоагрегатах типа КЕВ-4-14 / М.Б. Молдобаев, Д.А. Самбаев, З.К. Маймеков // Инженер. Бишкек. – 2015. – №9. – С. 354-358  
Режим доступа: [https://www.elibrary.ru/download/elibrary\\_44887352\\_45594003.pdf](https://www.elibrary.ru/download/elibrary_44887352_45594003.pdf)
5. **Молдобаев М.Б.** Модифицирование и сжигание жидкого топлива в виде водотопливных эмульсий в котлоагрегатах типа ДКВР-6,5-13 и снижение концентрации сажи в газовой фазе / М.Б. Молдобаев, Д.А. Самбаев, З.К. Маймеков, К.Т. Баканов // Материалы международной научной конференции «Техносферная безопасность: наука и практика». Бишкек. – 2015. – С. 117-122.
6. **Молдобаев М.Б.** Влияние воды в водотопливных эмульсиях на процессы снижения концентрации сажи в газовой фазе [Текст] / К.А. Кемелов, М. Б. Молдобаев, Д. А. Самбаева, З. К. Маймеков // Проблемы региональной экологии. – Москва. – 2016. – №4. – С. 30-36.  
Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=27390344>
7. **Moldobaev M.B.** Water is an effective additive to fuel oil to reduce the concentration of soot in the gas phase [Text] / D.A. Sambaeva, M.B. Moldobaev, K.A. Kemelov, Z.K. Maimekov // Journal of MJEN. – 2022. – Vol. No. 10(2). – P. 145-150.  
Режим доступа: <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/2531501>
8. **Молдобаев М.Б.** Сжигание водомазутных эмульсий в котлоагрегатах и снижение концентрации сажи в газовой фазе [Текст] / Самбаева Д.А., Молдобаев М.Б., Маймеков З.К. // Инженер. – 2023. – №26. – С. 85-99.  
Режим доступа: [https://www.elibrary.ru/download/elibrary\\_50096949\\_14421670.pdf](https://www.elibrary.ru/download/elibrary_50096949_14421670.pdf)
9. **Moldobaev M.B.** Forecasting and evaluation possibilities carbon footprint during combustion of fuel oil in medium and low power boilers [Text] / T.Z.

## УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

$V$  - удельный объем,  $\text{м}^3/\text{кг}$ ;  $S$  - энтропия,  $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ;  $I$  - полная энтальпия,  $\text{кДж}/\text{кг}$ ;  $U$  - полная внутренняя энергия,  $\text{кДж}/\text{кг}$ ;  $M$  - число молей,  $\text{моль}/\text{кг}$ ;  $C_p$  - теплоемкость при постоянном давлении,  $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ;  $G$  - энергия Гиббса,  $\text{кДж}/(\text{кмоль}\cdot\text{К})$ ;  $C_{p,g}$  - теплоемкость газовой фазы,  $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ;  $M_u$  - коэффициент динамической вязкости,  $\text{Па}\cdot\text{с}$ ;  $L_t$  - коэффициент теплопроводности,  $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ;  $Pr$  - число Прандтля;  $z$  - массовая доля конденсированных фаз;  $\text{NO}_x$  - суммарные оксиды азота,  $\text{мг}/\text{м}^3$ ;  $\text{C}_x\text{H}_y$  - углеводороды нефти,  $\text{мг}/\text{м}^3$ ;  $\text{C}_{(c)}$  - конденсированный углерод,  $\text{мг}/\text{м}^3$ ;  $C$  - рабочая концентрация,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $C^*$  - равновесная концентрация,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $C^0$  - начальная концентрация,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ; ПДК - предельно-допустимая концентрация,  $\text{мг}/\text{м}^3$ ;  $T$  - температура,  $\text{К}$ ;  $P$  - давление,  $\text{МПа}$ .

## РЕЗЮМЕ

диссертации Молдобаева Мирлана Болотбековича на тему: «Влияние воды в водотопливных эмульсиях на процессы образования и снижения сажи в газовой фазе» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 25.00.36 – геоэкология

**Ключевые слова:** мазут, вода, воздух, эмульсия, горение, концентрация, котлоагрегат, термодинамическое моделирование, энтропия, технологическая схема.

**Объект исследования:** системы мазут-воздух, мазут-вода-воздух и их геоэкологические состояния в промышленных котлоагрегатах

**Предмет исследования:** физико-химическая матрица системы; дисперсность водомазутной эмульсии; окисление мазута в системе вода-воздух; термодинамические и физико-химические характеристики системы; принципиальная технологическая схема приготовления и сжигания водомазутных эмульсий; снижение концентрации сажи в газовой фазе.

**Цель работы:** снижение концентрации сажи в дымовых газах путем приготовления и сжигания водомазутных эмульсий в промышленных котлоагрегатах типа Е-1/9М(3) Мостостроительного отряда Кыргызской железной дороги, г. Бишкек.

**Методы исследования и аппаратура:** термодинамическое моделирование деструкции системы: мазут-вода-воздух при максимуме энтропии; экспериментальное определение концентрации сажи в дымовых газах котлоагрегатов мультифункциональным и переносным газоанализаторами по стандартной методике 5506 и 5515 «NIOSH Manual of Analytical Methods»; установление дисперсности водомазутной эмульсии седиментационным анализом; определение содержания воды в мазуте конденсаторным датчиком.

**Полученные результаты и их новизна.** Термодинамическое моделирование процесса окисления системы мазут-воздух и мазут-вода-воздух показало изменение величины: энтропии, энтальпии, внутренней энергии, число Прандтля и содержание конденсированного вещества. Установлено влияние воды в водомазутных эмульсиях на процессы образования и уменьшения концентрации сажи (изменение  $C_k$  и  $H/C$ ) в газовой фазе. Отмечено, что при сжигании водомазутной эмульсии достигнуто увеличение содержания атомарного водорода в газовой фазе, т.е. отношение  $H/C$  выше в 2,26 раза по сравнению с сжиганием мазута; впервые составлена принципиальная технологическая схема приготовления и сжигания водомазутных эмульсий (ВМЭ) в промышленных котлоагрегатах типа Е-1/9М(3) Мостостроительного отряда Кыргызской железной дороги, г. Бишкек (получен акт внедрения от 19.07.2022г).

**Рекомендации по использованию.** Геоэкологические, химические, физико-химические, термодинамические параметры системы мазут-вода-воздух могут быть использованы в специальных курсах геоэкологии.

**Область применения.** Принципиальная технологическая схема приготовления и сжигания водомазутной эмульсии в промышленных котлоагрегатах полезны в процессах снижения углеродной нагрузки в окружающей природной среде.

**Молдобаев Мирлан Болотбековичтин «Отун-суу эмульсиясындагы суунун ыштын газ фазасында пайда болуу жана азаяу процессине болгон таасири» темада 25.00.36 - геоэкология адистиги боюнча техника илимдеринин кандидаты илимий даражасын изденип алуу үчүн жазылган диссертациясынын**

### **РЕЗЮМЕСИ**

**Негизги сөздөр:** мазут, суу, аба, эмульсия, күйүү, концентрация, меш, термодинамикалык моделдөө, энтропия, технологиялык схема.

**Изилдөө объектиси:** мазут-аба жана мазут-суу-аба системалары жана алардын өндүрүштүк мештердеги геоэкологиялык абалдары

**Изилдөөнүн предмети:** системалардын физика-химиялык матрицалары; эмульсиянын өлчөмү; суу-аба системасында мазуттун кычкылданышы; системанын термодинамикалык жана физика-химиялык мүнөздөмөлөрү; мазут-суу эмульсиясын даярдоо жана жагуунун принципиалдык технологиялык схемасы; газ фазасында ыштын концентрациясын азайтуу.

**Иштин максаты:** Кыргыз темир жол түйүнүнүн Бишкектеги көпүрө салуу бирикмесинин Е-1/9М(3) тибиндеги өндүрүштүк мештеринде мазут-суу эмульсиясын даярдоо жана жагуу менен түтүн газындагы ыштын концентрациясын азайтуу

**Изилдөөнүн методдору жана жабдуулар:** энтропиянын максималдык абалында мазут-суу-аба системасынын ажыроосун термодинамикалык моделдөө, мультифункционалдык жана динамикалык газ анализаторлордун негизинде 5506 и 5515 «NIOSH Manual of Analytical Methods» стандарттык методикалар аркылуу эксперименталдык жол менен түтүн газындагы ыштын концентрациясын аныктоо; мазут-суу эмульсиясынын өлчөмүн седиментациялык жол, ал эми конденсатордук датчик аркылуу мазуттагы суунун өлчөмүн аныктоо.

**Алынган жыйынтыктар жана алардын жаңылыктары.** Мазут-аба, мазут-суу-аба системасы термодинамикалык моделденип: энтропия, энтальпия, ички энергия, Прандтль саны жана конденсирленген заттын өлчөмүнүн өзгөрүлүшүн көрсөттү. Эмульсиядагы суунун, газ фазасында пайда болгон ыштын концентрациясына болгон таасири белгиленди. Мазут-суу эмульсиясын жагууда газ фазасында атомардык суутектин өлчөмү, мазут жагууга салыштырмалуу көбөйдү, б.а. Н/С катнашы 2.26 эсе өстү; Кыргыз темир жол түйүнүнүн Бишкектеги көпүрө салуу бирикмесинин Е-1/9М(3) тибиндеги өндүрүштүк мештеринде мазут-суу эмульсиясын даярдоо жана жагуунун принципиалдык технологиялык схемасы биринчи жолу түзүлдү жана түтүн газындагы ыштын өлчөмү азайтылды (мекемеден ишке киргизүү акты алынды, 19.07.2022ж.).

**Колдонуу сунуштары.** Мазут-суу-аба системасынын геоэкологиялык, химиялык, физикалык-химиялык, термодинамикалык жыйынтыктары геоэкология билим багытында колдонулушу ыктымал.

**Колдонуу чөйрөсү.** Өндүрүштүк мештерде мазут-суу эмульсиясын даярдоо жана жагуунун принципиалдык технологиялык схемасы көмүртектин айлана-чөйрөдөгү жүгүн азайтууда керектүү.

## RESUME

**of the dissertation of Mirlan Moldobaev on the theme «Effect of water in water - fuel emulsion on formation and reduction processes of soot in gas phase» presented for the candidate of technical science degree on speciality 25.00.36 – geocology**

**Keywords:** fuel oil, water, air, emulsion, combustion, concentration, boiler unit, thermodynamic modeling, entropy, technological scheme

**The object of the research:** fuel oil-air systems, fuel oil-water-air systems and their geoecological conditions in industrial boilers.

**The subject of the research:** physico-chemical matrix of the system; dispersion of water-oil emulsion; fuel oil oxidation in the water-air system; thermodynamic and physico-chemical characteristics of the system; technological scheme for the preparation and combustion of oil-water emulsions; reduction of soot concentration in the gas phase.

**Objectives of the study:** the purpose of the work is to reduce the concentration of soot in flue gases by preparing and burning oil-water emulsions in boiler units of the E-1 / 9M(3) type of the Bridge Construction Detachment of the Kyrgyz Railway, Bishkek.

**Research methods and equipment:** thermodynamic modeling of the destruction of the system: mazut-water-air at maximum entropy; experimental determination of soot concentration in the flue gases of boiler units using the multifunctional gas analyzer and portable gas analyzer according to the standard method 5506 and 5515 "NIOSH Manual of Analytical Methods"; determination of dispersion of water-oil emulsion by sedimentation analysis; determination of the water content in mazut by a capacitive sensor.

**The results and their novelty.** Thermodynamic modeling of the process of oxidation of the fuel oil-air and fuel oil-water-air systems showed a change in the value of: entropy, enthalpy, internal energy, Prandtl number and the content of condensed matter. The effect of water in oil-water emulsions on the processes of formation and reduction of soot concentration (changes in C and H/C) in the gas phase has been established. It was noted that the increase in the hydrogen content in the gas phase was achieved during the combustion of the water-oil emulsion, i.e. the H/C ratio is 2.26 times higher compared to fuel oil combustion; for the first time, a basic technological scheme was drawn up for the preparation and combustion of mazut-water (MWE) in boiler units of the E-1 / 9M(3) type of the Bridge Construction Detachment of the Kyrgyz Railway, Bishkek ( an act of implementation dated 19.07.2022 was received).

**Applications.** Geoecological, chemical, physicochemical, thermodynamic parameters of the oil-water-air system can be used in special geocology courses.

**Application area.** The principal technological scheme for the preparation and combustion of oil-water emulsion in industrial boilers is useful in the process of reducing the carbon load in the environment.



Подписано в печать . . . 2023 г.  
Формат 60x84 1/16. Объем 1,5 п.л.  
Бумага офсет. Печать офсет. Тираж 100 экз.

ЧП «Сарыбаев Т.Т.»  
г. Бишкек, ул. Раззакова, 49  
т. 0 708 058 368