

НЕКОТОРЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЭКОЛОГИЧНОГО СЖИГАНИЯ ВОДОУГОЛЬНЫХ СМЕСЕЙ

З.А. Мансуров^{1,2*} и В.Г. Сальников²

¹Институт проблем горения, ул. Богенбай батыра, 172, Алматы, Казахстан

²Казахский национальный университет им. аль-Фараби, пр. аль-Фараби, 71, Алматы, Казахстан

АННОТАЦИЯ

Проведен анализ актуальных проблем декарбонизации связанный с выделением CO₂ при горении угля, одного из основных видов топлива для энергетических установок в мире и в особенности в Казахстане, и перспективных путей решения связанных с этим экологических проблем. Рассмотрены способы переработки угольного топлива в виде водоугольной суспензии. Описана экспериментальная установка по эмульгированию дизельного топлива и характеристики выбросов при его использовании. Рассмотрен механизм горения водоугольной суспензии и возможность эффективного снижения эмиссии CO₂ за счет ее использования.

Ключевые слова: декарбонизация, CO₂, горение угля, водоугольное топливо.

1. Введение

Глобальные и региональные климатические изменения являются серьезным вызовом для человечества в XXI столетии. Согласно данным Всемирной метеорологической организации [1], последнее десятилетие XXI века было самым теплым за всю историю наблюдений. Установлено, что 2016, 2019 и 2020 годы входят в тройку самых теплых лет. Средняя глобальная температура в период с 2017 по 2021 год (на основе данных до июля) является одной из самых высоких за всю историю наблюдений и, по оценкам, на 1,06–1,26 °C выше доиндустриального уровня 1850–1900 годов.

При этом становится все более очевидным, что реализация целей Парижского соглашения по климату отстает от графика [2], а решение задач, связанных с уменьшением углеродного следа, сопряжено с рядом технологических и экономических проблем. При этом пандемия, вызванная распространением COVID-19, обусловила лишь незначительное снижение выбросов углекислого газа в атмосферу.

2. Пути декарбонизации экономики

«В 2021 году объемы выбросов ископаемого топлива вернулись к прежним значениям, показатели концентрации парниковых газов продолжают расти, и под воздействием антропогенных факторов формируются неблагоприятные погодные условия, которые сказываются на здоровье, жизни и средствах к существованию людей на всех континентах. Без быстрого и крупномасштабного сокращения объемов выбросов парниковых газов ограничить потепление в пределах 1,5 °C будет невозможно, что приведет к катастрофическим последствиям для людей и планеты, от которой мы зависим», – сказал Генеральный секретарь ООН Антониу Гутерриш в предисловии к докладу «Единство в науке».

«На протяжении всего периода пандемии мы слышим, что мы должны обеспечивать восстановление по принципу «лучше, чем было», чтобы вывести человечество на более устойчивый путь и избежать наихудших последствий изменения климата для общества».

*Ответственный автор

E-mail: zmansurov@kaznu.edu.kz (З.А. Мансуров)

и экономики. Этот доклад показывает, что пока в 2021 году мы движемся не в том направлении», – сказал Генеральный секретарь Всемирной метеорологической организации (ВМО) профессор Петтери Таалас.

И действительно, анализ показывает, что наблюдаемый рост температуры приводит к существенной перестройке общей циркуляции атмосферы (ОЦА) и, как следствие, увеличению повторяемости опасных и особо опасных явлений в атмосфере, таких как засухи, наводнения, пожары, сели, оползни и др. Эти процессы, в свою очередь, способствуют нарушению естественного круговорота углекислого газа в атмосфере (рис. 1.). В результате его концентрация в атмосфере продолжает повышаться.

Территория Казахстана, находящаяся в континентальной части Евразийского континента, равноудалена от Мировых океанов на значительное расстояние, прогревается более значительными темпами, чем земной шар в среднем. За период 1976–2020 гг. коэффициент линейного тренда среднегодовой температуры воздуха составил $+0,18\text{ }^{\circ}\text{C}/10$ лет для земного шара и $+0,32\text{ }^{\circ}\text{C}/10$ лет для Казахстана.

Ожидаемые изменения режима температуры и осадков на территории Казахстана на средне- и долгосрочную перспективу получены на основе сценарных оценок вероятного изменения температуры приземного воздуха и количества осадков по ансамблю из 21 сопряженной модели общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО) [3] для двух репрезентативных траекторий концентрации парниковых газов и аэрозолей в атмосфере – РТК4.5 (средний сценарий) и РТК8.5 (жесткий сценарий). При этом РТК4.5 – это стабилизационный сценарий, согласно которому радиационное воздействие стабилизируется к

2100 г. примерно на уровне $4,5\text{ Вт}/\text{м}^2$. РТК8.5 – сценарий высокой радиационной нагрузки, при котором она будет продолжать расти после 2100 г. По этому сценарию стабилизация концентрации произойдет только к 2250 г. При этом концентрация CO_2 в атмосфере будет порядка 2000 ppm, что примерно в 7 раз выше ее доиндустриального уровня [4].

На Международном климатическом саммите в Глазго COP26 было заявлено о необходимости декарбонизации экономики с целью снижения уровня антропогенной нагрузки на климатическую систему до безопасного уровня. Его участники подписали итоговое соглашение, цель которого – максимальное сокращение выбросов парниковых газов в атмосферу к 2030 году. Но эксперты отмечают, что суммарно взятые участниками саммита обязательства недостаточны для удержания глобального потепления в рамках $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Цели, прописанной шесть лет назад в Парижском соглашении, первые итоги которого подводились на COP26.

Одной из основных причин этого называется невозможность отказа от использования ископаемых видов топлива и, прежде всего, угля. По словам министра экологии Индии Бупендера Ядава [5], развивающиеся страны не могут обещать отказ от ископаемого топлива, когда у них на повестке дня стратегия развития и борьба с бедностью. Хотя климатический пакт признает, что для достижения «цели $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ » потребуется сократить общемировые выбросы углекислого газа на 45% к 2030 году относительно уровня 2010-го.

Таким образом, в настоящее время и в обозримом будущем полностью отказаться от использования углеродосодержащих источников энергии не позволяют технологические и экономические аспекты развития цивили-

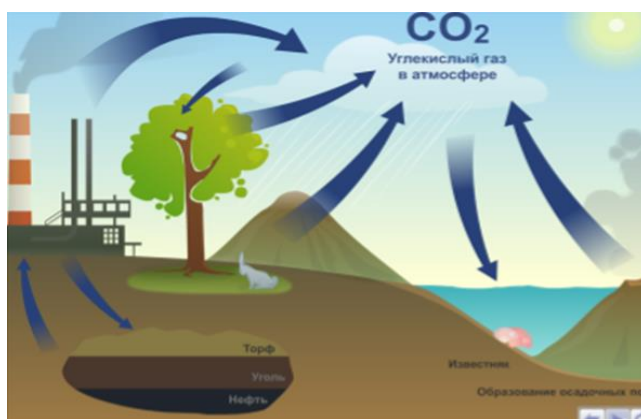


Рис. 1. Круговорот CO_2 в атмосфере.

зации. Скорее надо вести речь об углеродной нейтральности. Но в отличие от большинства определений, которые подразумевают под углеродной нейтральностью полный отказ от выбросов углерода, мы считаем, что углекислый газ (CO_2) является важной составной частью атмосферного воздуха, благодаря которому в природе происходит процесс фотосинтеза и формируется биосфера. Поэтому скорее необходимо говорить не о полном отказе от эмиссии углекислого газа, а о достижении баланса между выбросами CO_2 и его поглощением. Именно это целесообразно считать углеродной нейтральностью. В этом контексте, на наш взгляд, перспективны два направления:

1) Разработка перспективных технологий сжигания традиционных источников энергии (уголь, нефть, газ), направленных на максимально возможное снижение выбросов парниковых газов. Данные технологии получения энергии могут быть использованы для социально-экономического развития стран во время переходного периода на пути к усовершенствованным технологиям на основе альтернативных источников энергии.

2) Инвентаризация и развитие естественных и искусственных резервуаров CO_2 для достижения баланса между его поступлением и поглощением.

Другими словами, в качестве компромисса можно рассматривать обязательства стран сократить выбросы CO_2 до уровня, соответствующего углеродной емкости территории. Тогда вполне достижимой будет цель Климатического пакта по удержанию глобального потепления на уровне $1,5^\circ\text{C}$. В контексте вышесказанного, в соответствии с общемировой тенденцией снижения эмиссии углеродсодержащих вредных выбросов актуальной проблемой является переход на альтернативные технологии.

Современные ограничения на топливные ресурсы и ограничения на загрязнение окружающей среды направили исследовательские программы по всему миру на внедрение новых методов и методик, которые не только обеспечивают рационализацию потребления топлива, но и поддерживают низкий уровень выбросов от различных устройств, в которых происходит их сгорание.

В Казахстане, имеющем огромные запасы угля, выработка электроэнергии на ТЭЦ, работающих на угле, составляет 84% всей энергетики. В связи с этим проведен анализ разработок по использованию водоугольного

топлива. Мировые запасы угля в несколько раз превышают запасы других видов топлива. По оценкам, запасов угля хватит на 200–250 лет. Это солидный срок, учитывая, что запасы нефти и газа должны истощиться гораздо раньше. Большая часть угля используется на электростанциях, которые вырабатывают почти 40% мировой электроэнергии, основными потребителями которой являются электроэнергетика и металлургия.

Мировой лидер в производстве угля – Китай, где в 2014 г. было добыто более 3,7 млрд тонн. США находятся на втором месте в мире по объему добычи угля, где в 2014 г. произведено 916,2 млн т угля, на третьем – Индия (668,4 млн т), на четвертом – Австралия (491,2 млн т), на пятом – Индонезия (470,8 млн т).

В России, занимающей шестое место по добыче угля в мире, обладающей 5,5% мировых запасов угля (около 200 млрд т), в 2014 г. произведено 4,4% общемирового объема добываемого угля. В 2015 г. в России добыто 373,3 млн т [6-7].

Проведенные оценки применяемых в российской энергетике видов энергетических топлив показали, что масса загрязняющих веществ, образующихся при сжигании 1 тонны условного топлива (тут) газа, составляет около 5 кг/тут, а при сжигании 1 тут жидких топлив и угля в 60 раз больше, около 3000 кг/тут. Таким образом, приведенные данные показывают, что значительное негативное воздействие на окружающую среду оказывают угольные и мазутные ТЭС, которые в основном используются для выработки электроэнергии.

Важно разработать комплексную программу снижения выбросов CO_2 . Одним из путей является создание высокоэффективных горелочных устройств на основе водоугольных смесей с содержанием H_2O 40–90%. Основная идея – использовать энергию разложения H_2O до OH и H и за счет их экзотермических реакций достигать высокой теплотворной способности. Следует отметить работы последних лет в этой области.

3. Традиционные способы переработки угольного топлива

В теплоэнергетических установках традиционно выделяют три вида сжигания твердых топлив: факельное (пылевидное), слоевое и вихревое [8-10]. На рис. 2. представлена схема, где отображены разновидности способов сжигания твердого топлива. В зависимости от

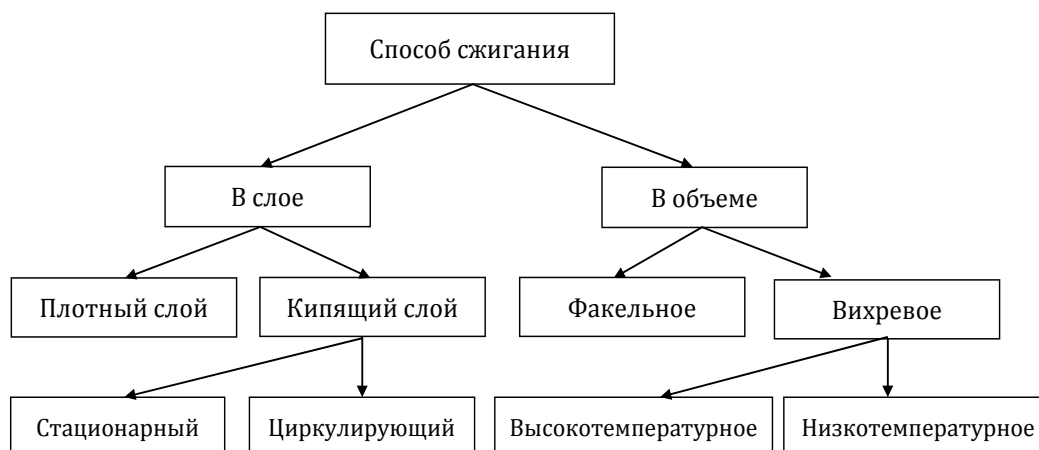


Рис. 2. Способы сжигания твердого органического топлива.

мощности котла, марки угля и условий работы котельного агрегата выбирается наиболее подходящий способ сжигания твердого топлива.

4. Факельное сжигание

При факельном сжигании топливо в пылевидном состоянии вдувается в камеру сгорания через горелки вместе с необходимым для горения окислителем. В зоне активного реагирования происходит процесс горения с образованием факела горящего топлива, заполняющего объем топочной камеры. Температура в зоне активного горения порядка 1300–1500 °С. Продолжительность пребывания частиц топлива в зоне активного горения от 0,5 до 2 с. Для уменьшения механического недожога твердое топливо перед поступлением в топку предварительно подсушивают и тщательно размалывают до пылевидного состояния.

При камерном сжигании угольной пыли летучие вещества, выделяющиеся в процессе ее прогрева и термического разложения, сгорают в факеле, образуя с воздухом гомогенную смесь, что способствует разогреву твердых частиц (кокса) до температуры воспламенения, а также стабилизирует факел. При сгорании летучих компонентов расходуется главным образом кислород первичного воздуха. Горение летучих ускоряет прогрев коксовых частиц и их воспламенение. Горение же коксовых частиц происходит, в основном, за счет кислорода вторичного воздуха.

В настоящее время в промышленной теплоэнергетике основным является факель-

ное сжигание, когда в топочную камеру через прямоточные или вихревые горелки подаются потоки топлива и воздуха или топливовоздушной смеси (а иногда – еще и газы рециркуляции). Реже применяются циклонно-вихревой способ, низкотемпературный вихрь и кипящий слой.

5. Технология сжигания твердого топлива в виде водоугольной суспензии

Водоугольное топливо (ВУТ), водоуголь – жидкое топливо, которое получают путем смешивания измельченного угля, воды и пластификатора. Используется на теплогенерирующих объектах, в основном как альтернатива природному газу и мазут, что позволяет существенно сократить затраты при производстве тепловой и электрической энергии. Для приготовления ВУТ используют низкокалорийные и тощие угли и отходы углеобогащения, а также создают на их основе композиционные водо-торфоугольные, водо-нефте-угольные и другие топливные составы.

Капельно-факельное сжигание является на сегодня основным способом сжигания ВУТ, особенно в котлах малой и средней мощности. На рис. 3 представлена упрощенная схема устройства котельной по сжиганию ВУТ. Водоугольное топливо доставляется на котельную в готовом виде.

К недостаткам технологии сжигания ВУТ можно отнести достаточно высокие требования к горелочному устройству (форсунке). На первых этапах применения ВУТ имел место высокий абразивный износ форсунок. Напри-

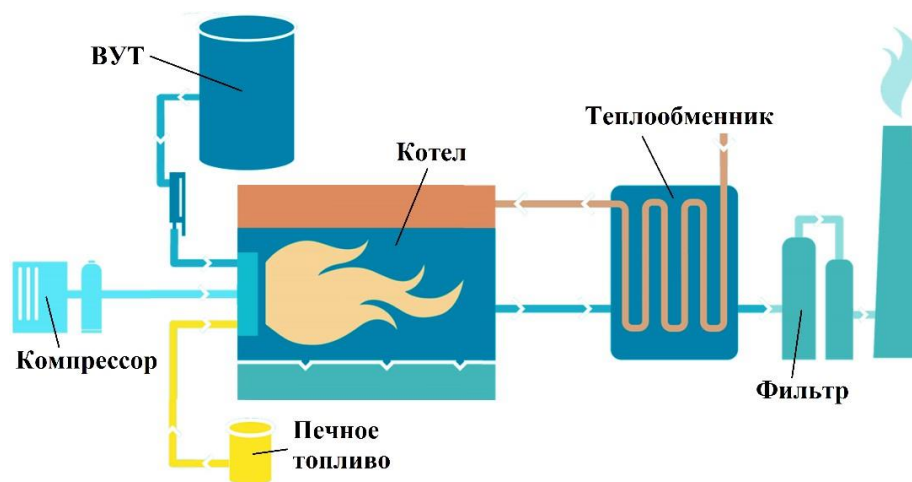


Рис. 3. Типовая схема устройства котельной по сжиганию ВУТ.

мер, на Новосибирской ТЭЦ-5 первые форсунки служили не более 40 часов. Определенные ограничения применимости ВУТ связаны с его склонностью к расслаиванию в течение суток-двух, что требует использования специальных присадок-пластификаторов. Так как процесс горения водоугольного топлива весьма нестабилен, то существует необходимость разрабатывать особую геометрию котлов и особое расположение точек подачи топлива и воздуха для обеспечения циркуляции горячих горючих газов в зоне воспламенения. Одним из основных инструментов для оптимизации конструкции котлов являются численные методы, позволяющие исследовать аэродинамику, процессы тепломассообмена и горения водоугольного топлива в топочной камере.

6. Обзор методов горения ВУТ

Процессы горения распыленных водоугольных капель в своей основе являются многостадийными и в общих чертах повторяют аналогичные процессы с традиционным жидким топливом, а также угольными частицами. Но вместе с тем есть и существенные отличия. Основными отличиями процесса воспламенения и горения капли водоугольной суспензии от горения пылевидного твердого и распыленного жидкого топлива являются: низкотемпературная активация реакционной поверхности топлива на стадии воспламенения, возрастание удельной реакционной поверхности в основной зоне процесса горения и интенсификация процесса горения за счет реакции углерода топлива с водяным паром, протекающая параллельно основной реакции горения.

В период высокого интереса к водоугольному топливу, в особенности в 80-х годах прошлого века, было выполнено большое количество исследований, направленных на создание эффективных технологий использования ВУТ. Если говорить о процессах воспламенения и горения ВУТ, то на основе выполненных как экспериментальных [11-12], так и теоретических работ [13-19] выделяют следующие основные стадии: прогрев капли ВУТ, испарение воды, содержащейся внутри капли, выход и горение летучих веществ, содержащихся в угле, и выгорание углерода. Последняя стадия занимает наибольшее время и составляет 90–95% от времени жизни капли. Проведено большое количество исследований, направленных на изучение влияния характеристик ВУТ, окружающих условий на процессы испарения, воспламенения и горения, а также были предложены математические модели, описывающие данные процессы. Так, в работе [20] исследовано горение агломерата, образованного частицами водоугольного топлива, состоящего из частиц углерода и воды. Рассматривалось влияние характеристик углеродных частиц в агломерате, размер которых изменялся от 75 до 300 нм, на скорость его горения. Было показано, что уменьшение размеров частиц в агломерате не приводило к значительному возрастанию скорости горения.

Введение воды в топливо имеет два основных эффекта: (i) физическое воздействие в качестве регулятора распыления топлива, усиливающего режим предварительного смешивания топлива, и (ii) химическое воздействие в результате термической диссоциации воды при высокой температуре на активные

радикалы (гидроксил – OH и атом водорода – H), которые ускоряют окисление продуктов неполного сгорания, таких как твердые частицы (ТЧ), C_nH_m , и CO [18]. Более того, взаимодействие сажи и углеводородов с водяным паром приводит к образованию молекулярного водорода (H_2) [21]. В этом случае наблюдается глобальный положительный экологический эффект; снижение местной температуры (за счет потерь энергии на испарение воды) приводит к значительному снижению NO_x , а существование активных радикалов приводит к окислению CO и сажи. Таким образом, использование вода в дизельном топливе (ЭВДТ) оказывает благоприятное воздействие на соотношение сажа/ NO_x .

Во многих исследованиях влияние размера капель дисперсной фазы на характеристики эмульсии изучается путем смешивания различных порций двух монодисперсных эмульсий [22,23]. Сами авторы [23] заявили, что использование этой методики для приготовления различных монодисперсных эмульсий разного среднего размера невозможно. С другой стороны, подтверждено, что использование мембранной эмульгации позволяет получать монодисперсные эмульсии [24-26]. Таким образом, изменение размера пор мембраны приведет к получению эмульсии с различным средним размером капель при фиксированном (или без ухудшения) распределении по размерам. Степень однородности выражается коэф-

фициентом дисперсии (δ), определяемым как интервал размеров между размером частиц, до которого совокупный процент количества частиц составляет 90% (D_{90}), и размером, соответствующим совокупному процентному количеству 10% (D_{10}), относящемуся к среднему размеру частиц (D_{50}):

$$\delta = (D_{90} - D_{10})/D_{50}$$

Чем меньше значение коэффициента дисперсии, тем лучше однородность эмульсии и тем уже распределение по размерам; при $\delta < 0,4$ эмульсия рассматривается как монодисперсная эмульсия.

Подходящий эмульгатор необходим для поддержания стабильной структуры эмульсии в течение более длительного времени без коалесценции. Кроме того, для применения в двигателях рекомендуется использовать эмульгатор, в составе которого отсутствуют такие источники выбросов, как азот, сера и ароматические кольца. Эмульгатор обладает способностью растворяться в масле (липофильном или гидрофобном) и воде (гидрофильной) с различной степенью растворимости, выраженной гидрофильно-липофильным балансом (ГЛБ).

Для примера приведем данные по горению водо-топливной эмульсии (ВТЭ) в дизельном двигателе. Подготовка ЭВДТ была осуществлена с использованием экспериментальной установки, схема которой показана на рис. 4.

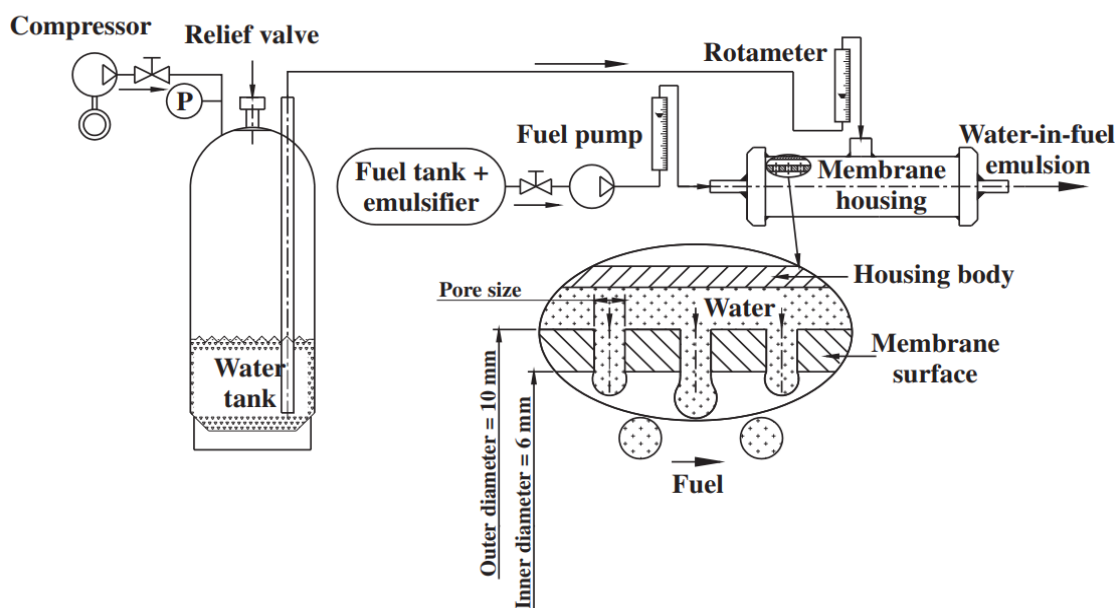


Рис. 4. Экспериментальная установка для приготовления эмульсии на основе мембранного эмульгирования [24].

Установка [27] основана на эмульгировании с использованием цилиндрической керамической мембраны с внутренним диаметром 6 мм, наружным диаметром 10 мм, длиной 22 см, пористостью 50% и размером пор 0,2 мкм или 0,45 мкм. Для повышения стабильности эмульсии был добавлен эмульгатор для смешивания *span'80* и *tween'60* (0,5 % по объему). В этом случае каждый эмульгатор добавляли к соответствующему растворимому с концентрацией 0,5%, т.е. твин'60 (ГЛБ = 14,9) был добавлен в воду, а *span'80* (ГЛБ = 4,3) был добавлен в дизельное топливо. В этом случае среднее значение ГЛБ = 9,2. Поскольку материал мембраны гидрофильный, мембрану сначала погружают в дизельное топливо (включая *span'80*) и дают ей высохнуть с помощью сжатого воздуха перед подачей воды. Предыдущий шаг был ре-

комендован (погружение мембраны в гидрофильные реагенты, было легко использовать дизельное топливо) для предотвращения образования водяной пленки из-за низкого отделения соседних капель воды от гидрофильной поверхности [27].

Все эксперименты проводились при ламинарном течении дизельного топлива внутри цилиндрической мембраны (число Рейнольдса не превышало 800). Приготовленная эмульсия была визуально охарактеризована с помощью оптического микроскопа *Micromed 3* (версия 3-20) с цифровой камерой *DCM-510* для захвата структуры эмульсии и системы динамического рассеяния света *Horiba LB-550* для получения распределения капель воды по размерам.

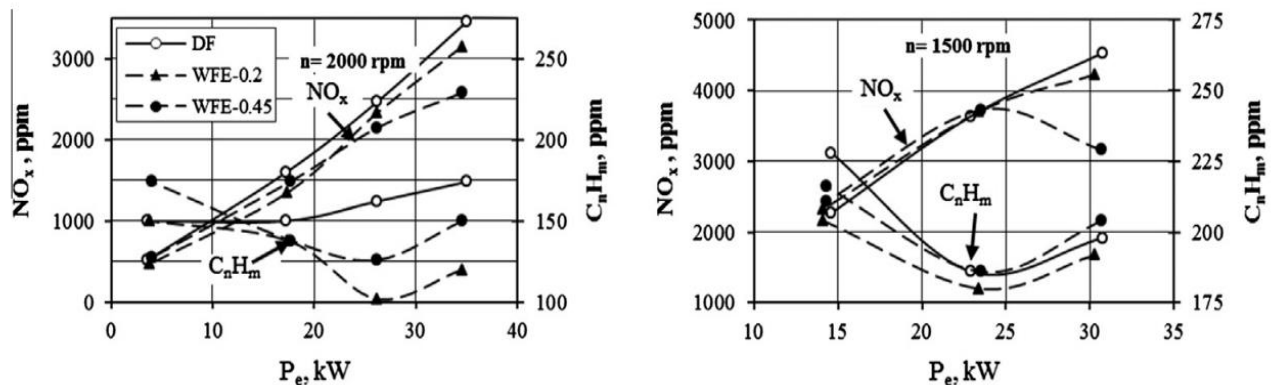


Рис. 5. Изменение концентрации выбросов (оксидов азота и несгоревших углеводородов) при нагрузке двигателя при частоте вращения двигателя (n) 1500 и 2000 об/мин с использованием дизельного топлива (ДФ) и топлива с различной структурой (ВТЭ -0,2 и ВТЭ -0,45) после месяца их приготовления.

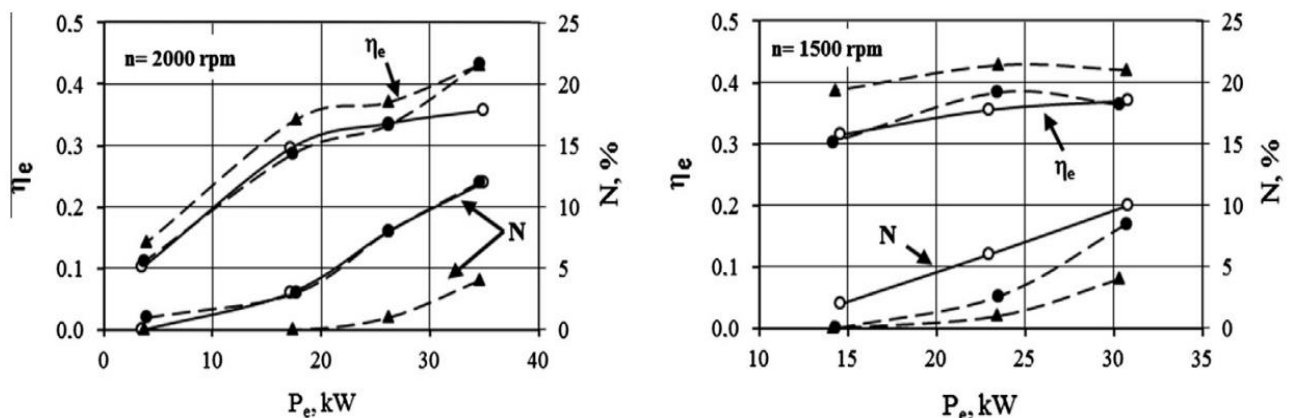


Рис. 6. Изменение уровня дыма выхлопных газов (N) и механического КПД эффективного тормоза двигателя (η_e) при нагрузке двигателя при частоте вращения двигателя (n) 1500 и 2000 об/мин с использованием дизельного топлива (ДФ) и ВТЭ с различной структурой (ВТЭ -0,2 и ВТЭ -0,45) после месяца их подготовки. [24].

Эксперименты на двигателе проводились с использованием трехцилиндрового дизельного двигателя с турбонаддувом (диаметр цилиндра 105 мм, ход поршня 120 мм при степени сжатия 15), установленного на испытательном стенде двигателя *SAK-H-670*.

На заключительном этапе работы были исследованы характеристики дизельного двигателя, работающего на традиционном дизельном топливе (обозначенном как ДТ) и ЭВДТ с различными структурами (с использованием мембраны с размером пор 0,2 мкм и 0,45 мкм; обозначенные как ВТЭ -0,2 и ВТЭ -0,45 соответственно) (рис. 5 и 6) [27].

По сравнению с дизельным топливом использование ВТЭ снижает концентрацию NO_x и C_nH_m в выхлопных газах и снижает уровень дыма выхлопных газов (N).

Оставшееся время до истечения газа может быть слишком низким, чтобы окислить образовавшуюся сажу во время крекинга топлива с помощью активных радикалов, образующихся в результате диссоциации воды. Таким образом, количество выделяемой сажи может не изменяться или даже увеличиваться из-за снижения температуры в результате испарения воды и низкого теплосодержания. Но увеличение площади контакта между водой и топливом для эмульсии меньшего размера каплей воды увеличивает тепло- и массообмен между топливом и водой, и поэтому процесс смешивания улучшается в дополнение к лучшему распределению образующихся активных радикалов, что приводит к заметному снижению уровня дыма.

Таким образом, структура эмульсии оказывает явное влияние на характеристики двигателя; большое влияние ВТЭ, имеющий большой размер каплей воды, оказывает на выбросы оксидов азота, в то время как уменьшение размера каплей воды влияет на выбросы несгоревших углеводородов и уровень задымленности выхлопных газов.

7. Заключение

На основании результатов исследовательской работы установлено, что присутствие в смеси наночастиц угля положительно влияет на сгорание угольно-водной смеси. Показано, что в период возможного топливного кризиса угольно-водные смеси могут играть заметную роль в качестве доступного, экологически чистого эффективного топлива, способствуя решению указанных проблем.

Литература

- [1]. WMO, State of the Global Climate 2020. No. 1264. – Switzerland: World Meteorological Organization, 2021. – P.56.
- [2]. Доклад «Единство в науке», 2021 год. <https://cc.voeikovmgo.ru/ru/novosti/sobytiya/1358-doklad-edinstvo-v-nauke-2021-god>
- [3]. Переведенцев Ю.П. Теория климата: учебное пособие. – 2-е изд. перераб. и доп. – Казань: Казан. гос. ун-т, 2009. – 504 с.
- [4]. IPCC, 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. – New York: Cambridge University Press 2013. – P.1535.
- [5]. <https://www.bbc.com/russian/news-59277560>
- [6]. Кузнецов В.А. Математическое моделирование процессов тепло- и массообмена для перспективных технологий энергетического использования угольного топлива. Дис на соискание степени к.т.н., Красноярск, 2018. – С.125
- [7]. Плакиткин Ю.А., Плакиткина Л.С., Дьяченко К.И. Угольная промышленность России на мировом рынке угля: тенденции перспективного развития // Уголь. – 2016. – №7. – С.12–16.
- [8]. Минерально-сырьевая база угольной промышленности России: Т. 2. Регионы и бассейны / под ред. А.Е. Евтушенко, Ю.Н. Малышева. – М.: Издательство МГУ, 1999. – 445 с.
- [9]. Бирюков А.Б., Дробышевская И.П., Рубан Ю.Е. Сжигание и термическая переработка органических топлив. Твердое топливо: Учебное пособие. – Донецк: «Ноулидж» Донецкое отделение, 2014. – 79 с.
- [10]. Хзмалян Д.М., Каган Я.А. Теория горения и топочные устройства. Учебное пособие для студентов высших учебных заведений. – М.: Энергия, 1976. – 488 с.
- [11]. Десягин Г.Н. Вопросы теории горения водоугольной суспензии в потоке воздуха. Сжигание высокообводненного топлива в виде водоугольных суспензий. – М.: Наука, 1967. – С.45–55.
- [12]. Бабий В.И. Воспламенение и горение каплей водоугольной суспензии // Мат. 9 Всерос. симп. по горению и взрыву. – Черногловка. – 1989. – С.56–59.
- [13]. Саломатов В.В., Кравченко И.В. Теоретическое исследование горения капли водоугольного топлива. Часть I. Стадия прогресса // Горение и плазмохимия. – 2007. – Т.5, №3. – С.178–188.
- [14]. Саломатов В.В., Кравченко И.В. Теоретическое исследование горения капли водоугольного топлива. Часть II. Стадия испарения // Горение и плазмохимия. – 2007. – Т.5, №3. – С.189–198.

- [15]. Саломатов В.В., Кравченко И.В. Теоретическое исследование горения капли водоугольного топлива. Часть III. Стадия воспламенения // Горение и плазмохимия. – 2008. – Т.6, №1. – С.56–59.
- [16]. Саломатов В.В., Кравченко И.В. Теоретическое исследование горения капли водоугольного топлива. Часть IV. Стадия выгорания // Горение и плазмохимия. – 2008. – Т.6, №3. – С.171–178.
- [17]. Huang Z. et al. Theoretical analysis of CWM drop combustion history // Proc. 8-th Intern. Symp. Coal Slurry Fuels Preparation and Utilization. – USA, Orlando. Part 1, 1986. – P.343–358.
- [18]. Matthews K.J., Jones A.R. The effect of coal composition of coal-water slurry combustion and ash deposition characteristics // Proc. 8-th Intern. Symp. Coal Slurry Fuels Preparation and Utilization. USA, Orlando. Part 1, 1986. – P.388–407.
- [19]. Liu G.E., Law C.K. Combust of coal-water slurry droplets // Fuel. – 1986. – Vol.65. – P.171–176.
- [20]. Szekely G.A., Faeth G.M. Reaction of carbon black slurry agglomerates in combustion gases // Combustion Properties of Carbon Slurry Drops, in Nineteenth Symposium (International) on Combustion. Combustion Institute, Pittsburgh, 1983. – P.1077–1085.
- [21]. Zhao D., Yamashita H., Kitagawa K., Arai N., Furuhashi T. Behavior and effect on NO_x formation of OH radical in methane-air diffusion flame with steam addition. Combust Flame. – 2002. – Vol.130, №4. – P.352–360.
- [22]. Pal R. Effects of droplet size and droplet size distribution on the rheology of oil-in-water emulsions // In: 7th UNITAR international conference for heavy crude and tar sands proceedings to helga petri. Beijing, China, 27–30 October, 1998. – Paper No. 1998.05.
- [23]. Cheng C.-J., Chu L.-Y., Xie R. Preparation of highly monodisperse W/O emulsions with hydrophobically modified SPG membranes // J Colloid Interface Sci. – 2006. – Vol.300, №4. – P.375–382.
- [24]. Charcosset C, Limayem I, Fessi H. The membrane emulsification process – a review. Soc Chem Ind // J. Chem Technol Biotechnol. – 2004. – Vol.79. – P.209–218.
- [25]. Sedisheva S.A. The technology development for emulsification of liquids using ceramic membranes. PhD Dissertation, Moscow, 2011.
- [26]. Porras M., Solans C., Gonzalez C., Gutierrez J.M. Properties of water-in-oil (W/O) nano-emulsions prepared by a low-energy emulsification method // Colloids Surf A. – 2008. – Vol.324. – P.182–188.
- [27]. Attia A.M.A., Kulchitskiy A.R. Influence of the structure of water-in-fuel emulsion on diesel engine performance // Fuel. – 2014. – Vol.116 – P.703–708.

References

- [1]. WMO (2021) State of the Global Climate 2020. No. 1264. World Meteorological Organization, – Switzerland. P.56. ISBN 978-92-63-11264-4.
- [2]. Report «Unity in Science» [Doklad «Edinstvo v nauke»] (2021) <https://cc.voeikovmgo.ru/novosti/sobytiya/1358-doklad-edinstvo-v-nauke-2021-god>. (in Russian)
- [3]. Perevedentsev YuP (2009) Theory of climate: textbook. 2nd ed. revised and additional [Teoriya klimata: uchebnoe posobie. – 2-e izd. pererab. i dop.] Kazan state university, Kazan, RF. ISBN 978-5-98180-759-6. (in Russian)
- [4]. IPCC, 2013. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge Univ. Press, NY, USA. P.1535. ISBN 978-1-107-05799-1.
- [5]. <https://www.bbc.com/russian/news-59277560>
- [6]. Kuznetsov VA (2018) Mathematical modeling of heat and mass transfer processes for promising technologies for the energy use of coal fuel [Matematicheskoe modelirovanie processov teplo- i massoobmena dlya perspektivnykh tekhnologij energeticheskogo ispol'zovaniya ugol'nogo topliva] Dissertation for the degree of candidate of technical sciences. Krasnoyarsk, RF. P.125. (in Russian)
- [7]. Plakitkin YuA, Plakitkina LS, Dyachenko KI (2016) Coal [Ugol']. 7:12–16. (in Russian)
- [8]. Evtushenko AE, Malyshev YuN (1999) Mineral resource base of the Russian coal industry: in 2 vol. V.2. Regions and basins [Mineral'no-syr'evaya baza ugol'noj promyshlennosti Rossii: v 2 t. T. 2. Regiony i bassejny] MGGU Publishing House, Moscow, RF. 445 p. (in Russian)
- [9]. Biryukov AB, Drobyshevskaya IP, Ruban YuE (2014) Combustion and thermal processing of organic fuels. Solid fuel:Textbook. [Szhiganie i termicheskaya pererabotka organicheskikh topliv. Tverdoe toplivo: Uchebnoe posobie]. Knowledge, Donetsk, Ukraine. ISBN 978-617-579-971-0 (in Russian)
- [10]. Khzmalyan DM, Kagan YaA (1976) Theory of combustion and furnace devices. Textbook for students of higher educational institutions [Teoriya gorenija i topochnye ustrojstva. Uchebnoe posobie dlya studentov vysshih uchebnyh zavedenij]. Energy, Moscow, RF. (in Russian)
- [11]. Delyagin GN (1967) Questions of the theory of combustion of a water-coal suspension in an air stream. Combustion of highly watered fuel in the form of water-coal suspensions. [Voprosy teorii gorenija vodougol'noj suspenzii v potoke vozduha. Szhiganie vysokoobvodnennogo topliva v vide vodougol'nyh suspenzij]. Nauka, Moscow, RF. (in Russian)

- [12]. Babiy VI (1989) Ignition and combustion of drops of coal-water suspension [Vosplamnenie i gorenie kapel' vodougol'noj suspenzii]. Mat. 9 All-Russian symp. on fire and explosion. - Chernogolovka, USSR. P.56–59. (in Russian)
- [13]. Salomatov VV, Kravchenko IV (2007) Combustion and Plasma Chemistry [Gorenie i plazmohimiya] 5(3):178–188.
- [14]. Salomatov VV, Kravchenko IV (2007) Combustion and Plasma Chemistry [Gorenie i plazmohimiya] 5(3):189–198.
- [15]. Salomatov VV, Kravchenko IV (2008) Combustion and Plasma Chemistry [Gorenie i plazmohimiya] 6(1):56–59.
- [16]. Salomatov VV, Kravchenko IV (2008) Combustion and Plasma Chemistry [Gorenie i plazmohimiya] 6(3):171–178.
- [17]. Huang Z et al. (1986) Theoretical analysis of CWM drop combustion history. Proc. 8-th Intern. Symp. Coal Slurry Fuels Preparation and Utilization. Part 1, Orlando, USA. P.343–358.
- [18]. Matthews KJ, Jones AR (1986) The effect of coal composition of coal-water slurry combustion and ash deposition characteristics. Proc. 8-th Intern. Symp. Coal Slurry Fuels Preparation and Utilization. Part 1, Orlando, USA. P.388–407.
- [19]. Liu GE, Law CK (1986) Fuel 65:171–176 DOI:10.1016/0016-2361(86)90003-7
- [20]. Szekely GA, Faeth GM (1983) Reaction of carbon black slurry agglomerates in combustion gases. Combustion Properties of Carbon Slurry Drops, in Nineteenth Symposium (International) on Combustion. Combustion Institute, Pittsburgh, USA. P.1077–1085. DOI:10.1016/S0082-0784(82)80283-X
- [21]. Zhao D, Yamashita H, Kitagawa K, Arai N, Furuhashi T (2002) Combust Flame 130(4):352–360. DOI:10.1016/S0010-2180(02)00385-1
- [22]. Pal R (1998) Effects of droplet size and droplet size distribution on the rheology of oil-in-water emulsions. In: 7th UNITAR international conference for heavy crude and tar sands proceedings to helga petri. Beijing, China. Paper No. 1998.05.
- [23]. Cheng C-J, Chu L-Y, Xie R (2006) J Colloid Interface Sci. 300(4):375–382. DOI:10.1016/j.jcis.2006.03.056
- [24]. Charcosset C, Limayem I, Fessi H (2004) J Chem Technol Biotechnol 79:209–218. DOI:10.1002/jctb.969
- [25]. Sedisheva S.A. The technology development for emulsification of liquids using ceramic membranes. PhD Dissertation, Moscow; 2011 [in Russian].
- [26]. Porras M, Solans C, Gonzalez C, Gutierrez JM (2008) Colloids Surf A. 324:182–188. DOI:10.1016/j.colsurfa.2008.04.012
- [27]. Ali MA Attia, Kulchitskiy AR (2014) Fuel 116:703–708. DOI:10.1016/j.fuel.2013.08.057

Some problems of eco-friendly combustion of water-coal mixtures

Z.A. Mansurov^{1,2*} and V.G. Salnikov²

¹Institute of Combustion Problems, Bogenbay Batyr street, 172, Almaty, Kazakhstan

²Al-Farabi Kazakh National University, Al-Farabi Avenue, 71, Almaty, Kazakhstan

Abstract

An analysis was made of the actual problems of decarbonization associated with the release of CO₂ during the combustion of coal, one of the main types of fuel for power plants in the world and especially in Kazakhstan, and promising ways to solve related environmental problems. Methods for processing coal fuel in the form of a water-coal suspension are considered. An experimental plant for the emulsification of diesel fuel and the characteristics of emissions during its use are described. The mechanism of combustion of water-coal suspension and the possibility of effective reduction of CO₂ emission due to its use are considered.

Keywords: decarbonization, CO₂, coal combustion, water-coal fuel.

Су қоспаларын экологиялық тұрғыдан жағудың кейбір мәселелері

З.А. Мансуров^{1,2*} және В.Г. Сальников²

¹Жану проблемалары институты, Бөгенбай батыр к., 172, Алматы қ., Қазақстан

²әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық Университеті, әл-Фараби даңғ. 71, Алматы қ., Қазақстан

Аңдатпа

Әлемдегі және әсіресе Қазақстандағы электр станциялары үшін негізгі отын түрлерінің бірі болып табылатын көмірді жағу кезінде CO₂ бөлінуімен байланысты декарбонизацияның өзекті мәселелеріне және осыған байланысты экологиялық мәселелерді шешудің перспективалық жолдарына талдау жасалды. Көмір отынын су-көмір суспензиясы түріндегі өңдеу әдістері қарастырылған. Дизельдік отынды эмульсиялау бойынша тәжірибелік қондырғы және оны пайдалану кезіндегі шығарындылардың сипаттамалары сипатталған. Су-көмір суспензиясының жану механизмі және оны пайдалану есебінен CO₂ шығарындысын тиімді азайту мүмкіндігі қарастырылған.

Кілт сөздер: декарбонизация, CO₂, көмірдің жануы, су-көмір отыны.