

УДК 536.468

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГОРЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ ТОПЛИВ НА ОСНОВЕ ТОРФА, НЕФТИ И ВОДЫ

© 2019 г. К. Ю. Вершинина^{1,*}, В. В. Дорохов^{1,**}, Г. С. Няшина^{1,***}, Д. С. Романов^{1,****}

¹ Томский политехнический университет, 634050 Томск, Россия

*e-mail: vershininaks@gmail.com

**e-mail: dorohov45@yandex.ru

***e-mail: gsn1@tpu.ru

****e-mail: sterel123@mail.ru

Поступила в редакцию 01.03.2019 г.

После доработки 28.03.2019 г.

Принята к публикации 03.06.2019 г.

Изучены необходимые условия и интегральные характеристики процессов зажигания и последующего горения смесевых топлив, приготовленных на основе торфа, сырой нефти и воды. Топливные смеси сжигались в модельной камере сгорания в виде слоя (навески), капле суспензии и гранул при температуре 300–900°C. Результаты сопоставлялись с данными, полученными при сжигании в аналогичных условиях тощего каменного угля. Экспериментальные результаты иллюстрируют энергетическую и экологическую целесообразность совместного сжигания торфа и нефтесодержащих компонентов в топливно-энергетическом цикле. Как показали проведенные исследования, смесевые топлива имеют достаточно высокий энергетический и экологический потенциал и могут применяться в качестве основного или дополнительного источника энергии.

Ключевые слова: торф, сырая нефть, композиционное топливо, зажигание, выбросы

DOI: 10.1134/S0023117719050104

ВВЕДЕНИЕ

В условиях нестабильности энергетического рынка и ограниченности известных резервов основных энергоресурсов проблема развития новых подходов для получения энергии становится очень значимой [1]. Основные мировые тенденции сформировались в направлении повышения эффективности использования традиционных видов топлив, снижения эмиссии вредных веществ, улучшения безопасности и независимости на всех этапах получения тепловой и электрической энергии [2]. Большое внимание уделяется вовлечению биоресурсов, низкосортных топлив [3, 4] и отходов [5] в энергетический сектор экономики.

Запасы торфа и нефти велики на территории Томской области. В регионе достаточно хорошо развиты нефтедобыча и нефтехимическое производство. Разработка, добыча и переработка торфа практически не проводятся. Несмотря на значительные резервы (около 29 млрд т торфа при средней влажности 40%), степень их задействования не превышает 5%. Из-за высокой влажности и низкой доли углерода торф считается низкосортным топливом, применение которого в энергетике ограничено. В настоящей работе рассматрива-

ется подход, который предполагает использование торфа в составе топливной смеси на основе воды и нефти. Последняя применяется для увеличения теплотворной способности топлива и может быть заменена в реальных технологиях на отработанные масла или нефтешламы.

В исследовании [4] топлива готовили на основе мазута, торфа, опилок и древесного угля, изучали влияние ряда свойств компонентов (влажности, зольности, размера частиц и др.) на реологические характеристики суспензий. Согласно [4], древесные отходы и торф могут применяться для создания топлив на основе мазута, пригодных для сжигания в существующих котельных установках. Данное исследование является развитием экспериментальной работы [4], а также ряда других работ (в частности, [3, 6]) и направлено на определение экологических и энергетических параметров совместного сжигания торфа и сырой нефти в составе композиционных топливных смесей.

Цель работы — определение и анализ необходимых условий и основных характеристик процессов зажигания и горения (в том числе эмиссии оксидов серы и оксидов азота) топливных смесей на основе торфа, воды и сырой нефти.

Таблица 1. Результаты технического и элементного анализа торфа и каменного угля

Топливо	W^a , %	A^d , %	V^{daf} , %	Q^a , МДж/кг	C^{daf} , %	H^{daf} , %	N^{daf} , %	S_t^d , %	O^{daf} , %
Торф	9.90	22.80	74.80	11.80	52.06	6.31	3.58	0.20	37.85
Уголь тощий	2.89	18.07	15.07	27.65	87.97	4.10	2.23	0.53	5.03

Таблица 2. Свойства нефти

Плотность при 20 °С, кг/м ³	Влажность, %	Температура вспышки, °С	Температура зажигания, °С	Высшая теплота сгорания, МДж/кг
869	0.05	54	78	43.2

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для подготовки топливных смесей использовались торф (Суховское месторождение, Томская обл., Россия), сырая нефть (Герасимовское месторождение, Томская обл., Россия) и вода. Основные свойства горючих компонентов представлены в табл. 1, 2. Проводили сравнение параметров зажигания и горения исследуемых топлив с традиционным твердым топливом, в качестве которого применялась пыль тощего угля, свойства которого приведены в табл. 1.

Твердые топлива (торф, уголь) предварительно измельчали в быстроходной роторной мельнице (*Pulverisette 14*), а затем просеивали через сита для извлечения частиц со средним размером 150–200 мкм. Для сжигания готовили следующие составы топливных композиций (с учетом указанных относительных массовых долей): 1 – 25% вода, 25% нефть, 50% торф; 2 – 70% нефть, 30% торф; 3 – 50% нефть, 50% торф. Компоненты в соответствии с установленными пропорциями смешивали лабораторным роторным гомогенизатором (*IKAT18*) в течение 5–8 мин. Данная продолжительность смешивания, по результатам тестовых попыток, наиболее приемлемая для всех типов смесей с точки зрения получения однородного топлива. Для первой топливной смеси (суспензии) сначала в течение 3–4 мин подготавливали водонефтяную эмульсию, к которой добавляли твердый горючий компонент. Длительность смешения водонефтяной эмульсии и торфа составляла 5–8 мин.

Выбор времени приготовления также основано на заключениях работ [7, 8]. По данным [7], при изменении времени гомогенизации от 3 до 10 мин наблюдалось варьирование инерционности зажигания каплей суспензии на 0.5–1 с в диапазоне температур нагрева 550–700 °С. Установленный диапазон изменения времени задержки зажигания можно считать достаточно узким для рассматриваемых топлив, поэтому в дальнейшем можно определять время смешивания, исходя из задачи достижения однородности состава. Также следует отметить, что по результатам исследования [8], увеличение времени гомогенизации топлив на

основе торфа и масла в 3 раза (от 3 до 9 мин) оказало очень малое влияние на скорость расслоения при хранении суспензии в течение 24, 34 и 48 ч. Таким образом, можно заключить, что выбранное время смешивания компонентов соответствует известным заключениям о влиянии этого фактора на процессы хранения и зажигания композиционных топлив, а также согласуется с потенциальными возможностями современных систем приготовления топлива на тепловых станциях и котельных.

Каждое топливо сжигалось в виде одиночной капли (начальный размер 2 ± 0.15 мм), навески – слоя (масса около 0.02 г) и одиночной гранулы (начальный размер 5 ± 0.15 мм). Гранулят готовили из исходной топливной смеси путем выдержки его в емкости под действием груза массой около 1 кг в течение 24 ч. В результате выдержки нефть проникала в пористую структуру торфа. Формировались масляные агломераты – частицы, по форме близкие к сферическим. Для сжигания отбирались гранулы с близкими размерами около 5 мм. Начальные размеры капель и гранул определялись по начальным изображениям, зафиксированных видеокамерой. Систематическая погрешность определения начального размера образца топлива с соответствующими разрешениями видеокамер не превышала 4%.

Для сжигания топлива применяли трубчатую муфельную печь, температура (T_g) в которой варьировалась в диапазоне 300–1000 °С. Топливные образцы помещали в камеру сгорания с помощью координатного механизма с приводным устройством. Схема экспериментального стенда представлена на рис. 1. Одиночные капли суспензий помещали на спай термопары, которая встраивалась в стержень координатного механизма. В случае изучения сжигания слоя и гранулята навеску топлива помещали на металлическую сетку, закрепленную на стержне координатного механизма. Процессы нагрева, зажигания и горения записывали на высокоскоростную (до 10^5 кадр/с) видеокамеру.

В экспериментах определяли значения следующих параметров топлива: время задержки газофазного и гетерогенного воспламенения (τ_d); ми-

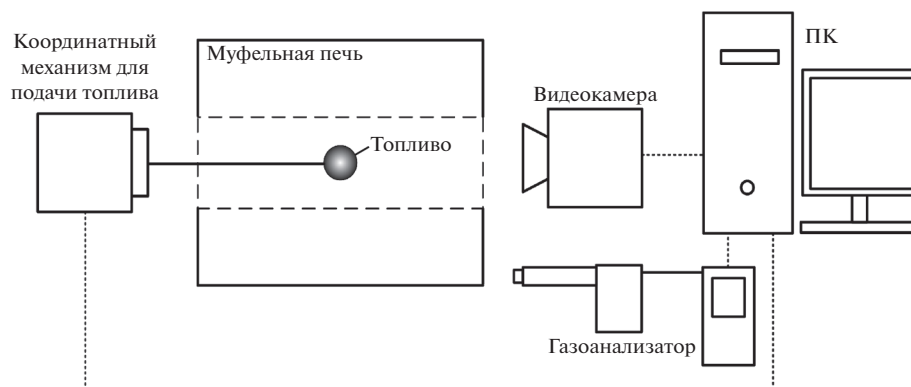


Рис. 1. Схема экспериментального стенда.

нимальная температура зажигания ($T_g^{\min}$); максимальная температура в зоне горения ($T_d^{\max}$); теплота сгорания (Q_s^a); концентрация оксидов серы (SO_x) и оксидов азота (NO_x) в продуктах сгорания.

По кадрам видеозаписи определяли не только характерные особенности физико-химических превращений при нагреве топлива, но также значения времени задержки газофазного и гетерогенного воспламенения топлива. Время задержки газофазного воспламенения определяли как интервал от начала нагрева топлива до первой вспышки. Времена задержки гетерогенного зажигания определяли с использованием цветовой модели RGB, согласно которой значение градиента 255 соответствует белому цвету, значение градиента 0 — черному. Принималось, что горению образца соответствовал диапазон RGB 220–255. Временем задержки гетерогенного зажигания считался интервал от момента входа капли (навески) топлива в камеру сгорания до достижения параметра *Threshold* значения 220 в любой точке поверхности твердого остатка топлива. Описанный подход — альтернатива классическому методу, при котором зажигание и горение образца топлива контролируется по показаниям термопары, установленной внутри капли или частицы топлива [9, 10]. В некоторых случаях (например, при диспергировании или высокой пористости топлива) использование термопары для определения времени задержки зажигания и длительности выгорания затруднено. Используемый в настоящей работе подход применяется для определения характеристик горения угольных частиц [11], капель суспензий [6] и жидких компонентов (например, дизеля и глицерина [12]).

Для определения максимальной температуры твердого остатка топлива в процессе горения использовали тепловизор (температурная чувствительность <30 мК, детектор 640×480 , максимальная измеряемая температура 1197°C). Характеристики зажигания и горения топлив определяли путем усреднения не менее 5–7 по-

вторяемых измерений. Для измерения концентраций оксидов серы и азота в продуктах сгорания навески топлива применялся газоанализатор с группой сенсоров по газам: O_2 (диапазон измерения 0–21%, погрешность 0.1%), CO (диапазон измерения 0–10000 ппм, погрешность 100 ппм), CO_2 (диапазон измерения 0–20%, погрешность 0.1%), NO_x (диапазон измерения 0–2000 ппм, погрешность 10 ппм), SO_x (диапазон измерения 0–2000 ппм, погрешность 10 ппм). При газоанализе при каждой температуре получали не менее четырех повторяемых измерений, на основании которых получали зависимость концентраций NO_x и SO_x от температуры в камере сгорания. Подробное описание процедур и погрешностей используемой методики приведены в работе [13].

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Все исследуемые топливные смеси, независимо от способа сжигания, характеризовались общими механизмами процессов зажигания и горения, которые типичны для твердых и жидких органических топлив. Подвод тепла к топливу приводил к интенсификации прогрева органической массы и увеличению скорости эндотермических процессов — испарения жидких компонентов (нефти и воды), а также разложения молекул органических веществ торфа с последующей диффузией летучих во внешнюю среду. При достаточном прогреве топлива в окрестности его поверхности формируется горючая гомогенная смесь, состоящая из нефтяных паров, летучих и воздуха, которая воспламеняется и горит в газовой фазе. На рис. 2 представлены зависимости времени задержки газофазного зажигания различных топлив от температуры в камере сгорания. Время задержки газофазного зажигания иллюстрирует время, которое затрачивается на реализацию эндотермических процессов в приповерхностных слоях после попадания топлива в камеру сгорания. Этот параметр является достаточно важным для рассматриваемых топлив, поскольку они содержат

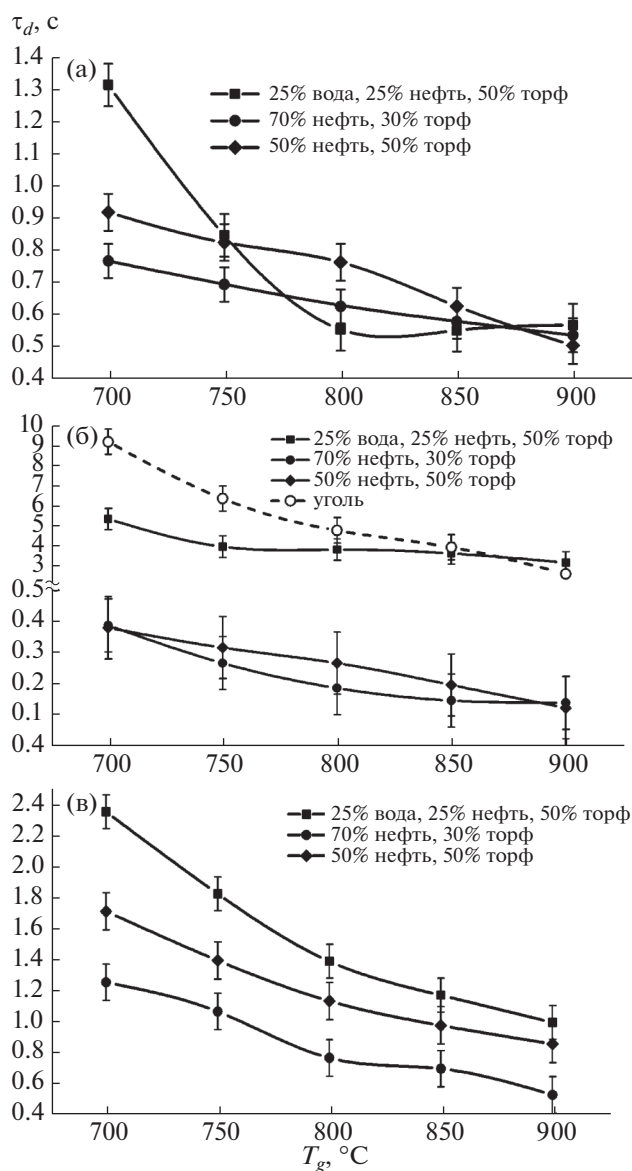


Рис. 2. Времена задержки газофазного зажигания композиционных топлив и угля: при сжигании капли суспензии (а); при сжигании слоя (б); при сжигании гранулы (в).

высокую долю жидкого горючего компонента, который воспламеняется и выгорает в газовой фазе. В условиях топочного горения тепловыделение от газофазного факела будет способствовать прогреву и воспламенению как жидкой, так и твердой составляющей каждой последующей порции смесового топлива, поступающей в камеру сгорания.

На рис. 2 хорошо видно, что при увеличении температуры от 700 до 900 °C времена задержки газофазного зажигания нелинейно снижаются для всех видов топлив и при разных способах их сжигания. В среднем, диапазон снижения τ_d (рис. 2) варьировался для разных топлив в диапазоне 25–

45%. Однако для топливной смеси с добавлением воды при ее сжигании в виде одиночной капли (рис. 2, а) и гранулы (рис. 2, в), варьирование T_g приводило к более заметному снижению времени задержки газофазного зажигания — примерно на 57 и 62% соответственно. В целом для топлив с добавлением воды характерна большая инерционность газофазного зажигания (рис. 2), что связано с высокой удельной теплотой парообразования воды, которая в несколько раз превышает аналогичный параметр нефти и тепловой эффект термического разложения торфа (около 0.2 и 0.3 МДж/кг соответственно). Интересно отметить, что для одиночной капли суспензии с добавлением воды (рис. 2, а) при увеличении температуры свыше 750 °C скорость снижения времен задержки газофазного зажигания существенно увеличивается и значения этого параметра становятся меньше, чем у смесей без добавления воды. Скорее всего, данный эффект обусловлен интенсификацией режима микровзрывного дробления капель многокомпонентных топлив [14] с повышением температуры. При дроблении исходной капли удельная площадь реагирования существенно возрастает, доступ молекул кислорода к горючему веществу облегчается, прогрев и выгорание происходят интенсивнее. Именно по этим причинам микровзрывное дробление капель суспензионных топлив рассматривается специалистами [15, 16] как явление, способное улучшить и облегчить технологический процесс сжигания. Следует отметить, что из всех рассмотренных топливных композиций фрагментация наблюдалась только для смесей с добавлением воды, поскольку последняя, при переходе в газообразное состояние, способствует нарастанию давления в “корпусе” капли и последующему резкому выбросу горючих и водяных паров. Зарегистрированный эффект хорошо согласуется с результатами других исследований. В частности, в работе [16] установлено, что эффективная массовая скорость горения выше для капли водоугольного топлива, чем для “обезвоженной” частицы. Данный эффект, согласно [16], связан, скорее всего, с реакцией водяных паров и углерода, а также с явлением микровзрывного распада (частичной или полной фрагментации) капли на этапе испарения влаги и выхода летучих, благодаря которому значительно увеличивается площадь поверхности окисления.

Установлено, что увеличение доли торфа в безводных смесях не оказывало существенного влияния на изменение времени задержки газофазного зажигания при сжигании топлива в виде слоя (рис. 2, б). В случае сжигания гранулы (рис. 2, в) это отличие заметнее (разница в пределах 30–40%), что обусловлено, скорее всего, более выраженным эффектом стока тепла к центру крупной (диаметр ≈ 5 мм) гранулы, за счет кото-

рого происходит частичное торможение процессов зажигания по сравнению со сжиганием слоя или одиночных капель суспензий. На примере гранулированных топлив можно видеть, что чем выше доля нефтепродукта, тем быстрее достигается критическая концентрация его горючих паров в приповерхностной зоне топливного образца, и, как следствие, условия газофазного зажигания достигаются за малый временной интервал (рис. 2,в).

Как показали эксперименты, при температурах выше 800°C газофазное зажигание навески каменноугольной пыли происходит с временной задержкой, близкой к аналогичному параметру суспензии с добавлением воды (рис. 2,б). Однако при более низких температурах внешней газовой среды длительность протекания эндотермических процессов для угольной пыли больше в 1.6–1.8 раза, чем для суспензии, что, в первую очередь, связано с наличием в составе композиционного топлива высокой (25%) доли нефти, увеличивающей реакционную способность смеси при более низких температурах нагрева.

После завершения стадии интенсивного газофазного горения реализуется гетерогенное зажигание и последующее выгорание твердого остатка топлива. Влияние температуры в камере сгорания на времена задержки гетерогенного зажигания топлив представлены на рис. 3. Данный параметр иллюстрирует длительность физико-химических процессов, протекающих до достижения условий зажигания твердой составляющей композиционного топлива. Для исследуемых смесей гетерогенное зажигание коксового остатка реализовывалось на заключительной стадии пламенного горения топлива, поскольку этот процесс препятствует свободной диффузии молекул кислорода к твердому остатку топлива, разогретому выше температуры зажигания. Наиболее быстрое гетерогенное зажигание регистрировалось для топливных смесей в виде капель суспензий (рис. 3,а), наиболее длительное — для гранул (рис. 3,в). Для этих двух подходов времена задержки гетерогенного зажигания топлив одинаковых составов отличались в 3–10 раз, что обусловлено более длительным горением в газовой фазе у гранул вследствие их больших размеров. Наименьшие времена задержки гетерогенного зажигания характерны составам с добавлением воды, как при суспензионном, так и при гранулированном сжигании (рис. 3,а,в). Это обусловлено меньшей долей горючих веществ (по сравнению с безводными смесями), а также доминированием микровзрывного дробления топливного образца. Для слоевого сжигания (рис. 3,б) эти эффекты были выражены слабее, и время задержки зажигания состава с добавлением воды превышало в 1.5–1.7 раза аналогичный параметр, зарегистрированный для смесей без добавления воды.

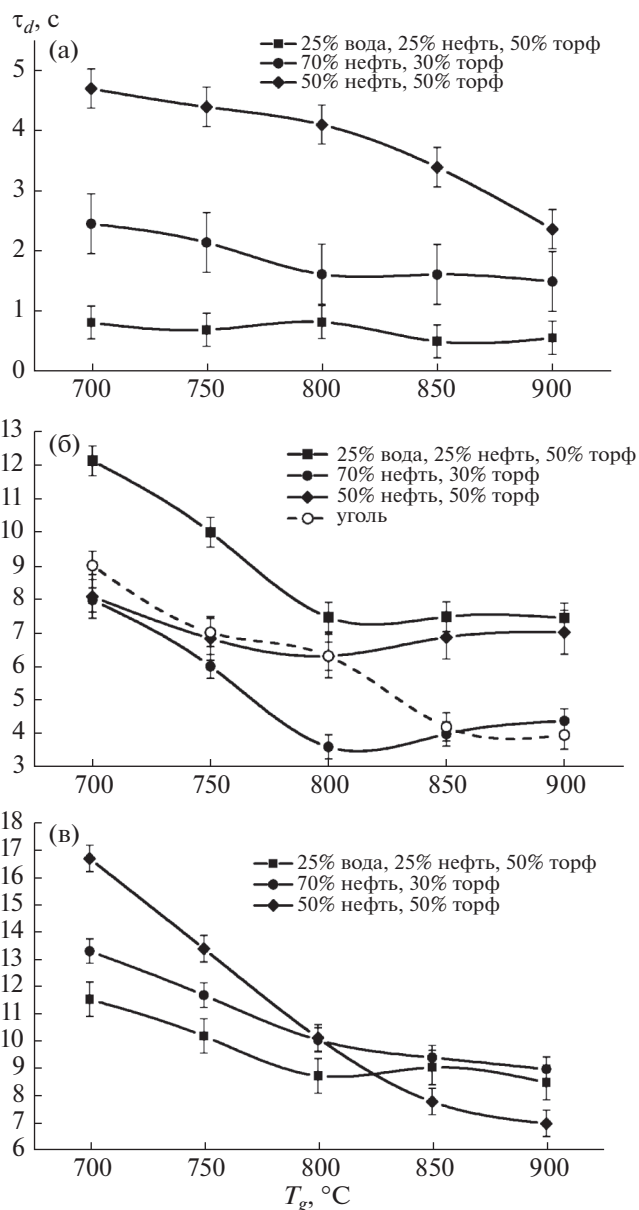


Рис. 3. Времена задержки гетерогенного зажигания композиционных топлив и угля при сжигании капли суспензии (а); при сжигании слоя (б); при сжигании гранулы (в).

Установлено (рис. 3), что увеличение доли торфа с 50 до 70% в безводных смесях приводило к росту времени задержки зажигания в 1.3–1.8 раза. Полученные результаты показывают, что скорость формирования газофазного факела заметно снижается при увеличении доли твердой составляющей топливной смеси и, как следствие, время задержки зажигания коксового остатка увеличивается. Кроме того, увеличение доли торфа приводит к увеличению влажности полученной смеси, что также оказывает влияние на длительность прогрева и инерционность гетерогенного зажига-

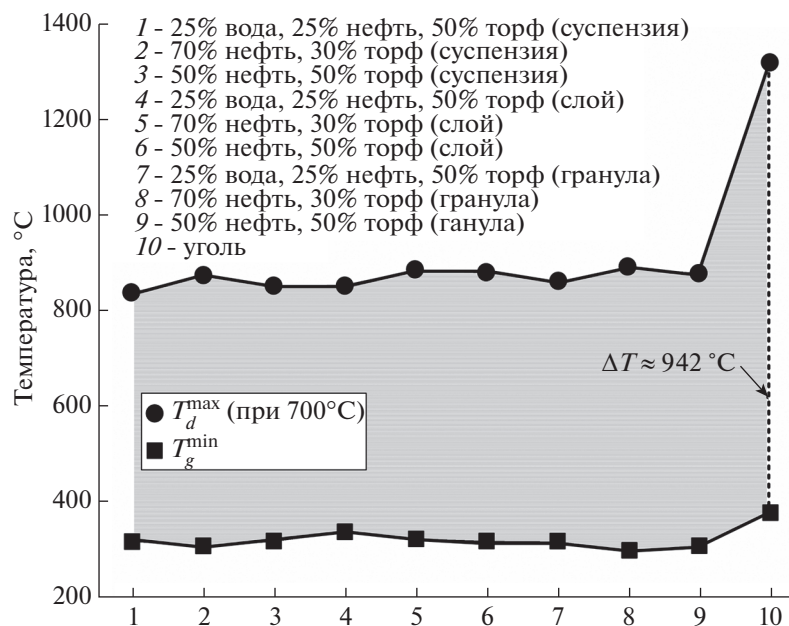


Рис. 4. Минимальные температуры зажигания и максимальные температуры горения композиционных топлив и угля.

ния топлива. С ростом T_g отличия времен задержки зажигания при варьировании состава топлива и способа его сжигания (рис. 3) становятся менее выраженными за счет нелинейного ускорения эндотермических процессов и реакции окисления горючих составляющих. При увеличении T_g в диапазоне 700–900°C зарегистрировано снижение времени задержки гетерогенного зажигания в 1.3–2.2 раза. При сравнении полученных данных с характеристиками зажигания угольной пыли (рис. 3, б) можно сделать вывод о том, что вследствие достаточно невысокой доли летучих веществ в угле (табл. 1) и более короткого интервала времени их выгорания в газовой фазе значения времени зажигания твердого остатка угля сопоставимы с аналогичным параметром для смесей на основе торфа и нефти.

На рис. 4 приведены экспериментально установленные значения минимальной температуры ($T_g^{\min}$) в камере сгорания, необходимой для гетерогенного зажигания твердого остатка топлива. При достижении $T_g^{\min}$ обеспечивались зажигание и горение всех компонентов топливных смесей — как твердого, так и жидкого. Показаны максимальные значения температуры, зафиксированные при горении твердого остатка топлив. Значения $T_g^{\min}$ для топливных смесей варьировались в диапазоне 310–340°C, $T_d^{\max}$ — в диапазоне 840–890°C. Наименьшие значения $T_g^{\min}$ характерны топливам с высокой долей нефтепродукта, однако, в целом, диапазон температур зажигания разных топлив можно считать очень близким, что

также справедливо для максимальных температур коксового остатка в процессе горения (рис. 4). При горении угольной пыли регистрировались самые высокие температуры твердого остатка — около 1320°C, что было ожидаемым результатом, поскольку для угля доминирует гетерогенный режим горения и подъем температуры реализуется на соответствующей стадии горения, чего нельзя сказать о топливных смесях на основе торфа и нефти. Однако тепловыделение рассмотренных топлив отличается достаточно существенно (табл. 3). Наименьшая удельная теплота сгорания типична для смесей с добавлением воды вследствие замещения горючей массы на негорючий компонент. Наибольшее тепловыделение можно получить при сжигании топлива с составом “70% нефть, 30% торф”. При снижении доли торфа в этой смеси до 50% теплота сгорания, соответственно, уменьшается примерно на 20%.

На рис. 5 представлены зависимости максимальных концентраций оксидов серы и азота в продуктах сгорания исследуемых топливных смесей, а также угольной пыли при варьировании температуры нагрева. Также показаны результаты [17], соответствующие сжиганию суспензии на основе бурого угля, воды и мазута. Концентрации оксидов серы и азота зависят от ряда факторов, основными из которых являются состав топлива (содержание серы и азота), температура горения и избыток воздуха. Сжигание топлив проводилось при идентичных условиях, поэтому полученные результаты позволяют проводить анализ с акцентом на компонентный состав топлив и температурные условия.

Скорость протекания процессов испарения, термического разложения, зажигания и горения

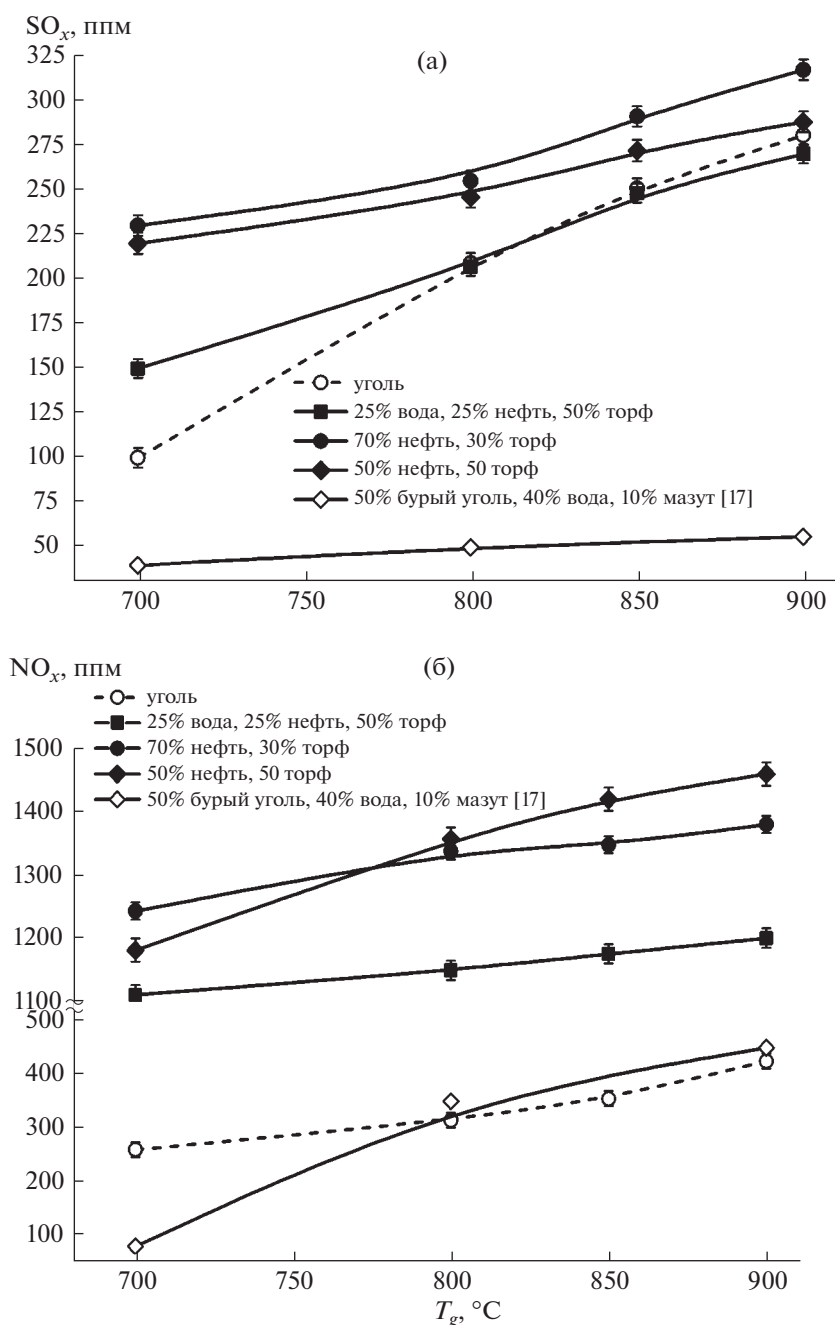


Рис. 5. Концентрации оксидов серы (а) и оксидов азота (б) в продуктах сгорания топлив при изменении температуры в камере сгорания.

существенно возрастает с увеличением теплового потока, подводимого к топливу. Рост T_g в интервале 700–900°C при сжигании смесевых топлив приводил к увеличению эмиссии SO_x в 1.3–1.8 раза и NO_x в 1.1–1.3 раза. Для угольной пыли характерно более существенно увеличение выбросов при росте температуры в камере сгорания. Концентрации SO_x возрастали в 2.5 раза, NO_x – в 1.6 раза (рис. 5), что связано с меньшими скоростями горения угля при более низких температу-

рах нагрева по сравнению со смесями на основе торфа и нефти.

Установлено, что из всех изученных композиционных топлив наименьшие концентрации SO_x и NO_x характерны топливу с добавлением 25% воды (рис. 5). Это обусловлено не только снижением общего серо- и азотосодержания смеси, но и химическим реагированием продуктов разложения воды с оксидами серы и азота. Кроме того, пары воды способствуют снижению температуры в зоне горения и соответствующему снижению

Таблица 3. Теплоты сгорания исследованных композиционных топлив и угля

25% вода, 25% нефть, 50% торф	70% нефть, 30% торф	50% нефть, 50% торф	Уголь тощий
16.7 МДж/кг	33.8 МДж/кг	27.5 МДж/кг	27.6 МДж/кг

формирования оксидов серы и азота. Наибольшими выбросами SO_x и NO_x характеризовался состав на основе 70% сырой нефти и 30% торфа (рис. 5). Полученный результат обусловлен, вероятнее всего, высоким содержанием серы в неочищенной нефти, при малой доли торфа и отсутствии дополнительной воды в итоговой смеси. Существует предположение, что наличие торфа в суспензиях способствует тому, что формирующиеся оксиды серы могут постепенно диффундировать внутрь частиц топлива через поры и реагировать с оксидами кальция, содержание которых в торфе может варьироваться от 0.5 до 4% (в зависимости от вида торфа) [18]. Согласно полученным данным, увеличение доли торфа в безводных смесях от 50 до 70% приводило к снижению концентраций SO_x и NO_x в пределах 30 и 80 ппм соответственно. Использование дополнительной воды в составе смеси более эффективно приводило к снижению выбросов SO_x на 40–80 ппм и NO_x на 130–190 ппм (рис. 5).

Высокие концентрации NO_x для смесей на основе нефти (рис. 5,б) обусловлены тем, что за счет высокой теплотворной способности нефти температура в зоне горения такого топлива значительно увеличивается и, как следствие, интенсифицируется окисление азота, содержащегося в воздухе с образованием термических NO_x . Следует отметить, что самые низкие значения выбросов NO_x зарегистрированы для угольной пыли (рис. 5,б). Это обусловлено не только сравнительно невысоким содержанием соединений азота в угле (табл. 1), но также и доминированием гетерогенного режима горения. Топливные смеси с добавлением нефти прогорают преимущественно в газовой фазе. При этом скорость их окисления в несколько раз больше, чем у угля, горение которого реализуется гетерогенно с более равномерным тепловыделением. Соответственно, это может являться основной причиной существенно меньших (в 3–4 раза) значений максимальных концентраций NO_x в продуктах сгорания угольной пыли по сравнению с другими изученными топливами. Несмотря на это, можно заключить, что с точки зрения минимизации выбросов оксидов азота, топливные смеси на основе торфа и нефти представляют большую опасность, чем традиционное пылеугольное топливо. Выбросы оксидов серы (рис. 5,а), выделяющиеся при горении угольной пыли можно считать сопоставимыми со значениями, характерными для смеси с добавлением воды. Отличия в этом случае не превышали 25 ппм. Они обусловлены тем, что введение воды снижает температуру в зоне горения. Соот-

ветственно, замедляются реакции, приводящие к формированию оксидов серы. Для существенного снижения значений оксидов серы целесообразно применение дополнительных примесей и добавок из биомассы (опилок, коры деревьев, солом, лесных горючих материалов, растительных маслосодержащих отходов и др.) [19].

Применение нефти совместно с торфом позволяет получать устойчивые топливные смеси, которые не имеют выраженной тенденции к расслоению (в течение 2–3 сут хранения не требовалось дополнительного перемешивания). Сырая нефть играет роль естественного стабилизатора, проникая в поры торфяных частиц. Также вероятно, что при этом нефть вытесняет кислород, содержащийся в поровых каналах торфа, и способствует получению более плотного топлива (в сравнении с исходным торфом, обладающим сравнительно низкой объемной плотностью). С экологической точки зрения увеличение доли торфа в смеси целесообразно, поскольку это позволяет заметно снизить негативный эффект от сгорания нефти. Однако при сжигании торфа характерно повышенное шлакообразование, поскольку минеральная часть торфа богата щелочноземельными и щелочными металлами (калием, кальцием, магнием, натрием) с низкими температурами размягчения и плавления. Кроме этого, за счет высокого содержания хлора (около 2000 мкг/г), при сжигании торфа образуются соли и хлорид калия, которые при высокой температуре агрессивно взаимодействуют с поверхностями оборудования. Также за счет высокого содержания железа, кремния, алюминия и кальция в торфе, при сжигании последнего, образуются силикатные стекла [20], усугубляющие шлакование и разрушение поверхностей теплотехнического оборудования. Таким образом, при увеличении доли торфа в составе смесевых топлив могут возрастать эксплуатационные затраты предприятия на удаление загрязнений и шлака с внутренних поверхностей котельного оборудования. Рассматриваемый в настоящей работе подход предусматривает сочетание низкокалорийного (торф) и высококалорийного компонента (сырая нефть) в составе однородной топливной смеси. Полученные данные позволяют предположить, что применение подобного подхода позволит снизить негативные эффекты (коррозия и шлакование), связанные со сжиганием торфа в чистом виде, а также получить топливо с высокой теплотой сгорания и приемлемыми параметрами воспламенения и горения (в сравнении с традиционным каменным углем).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Торф представляет большой интерес с точки зрения возможностей создания композиционных топливных смесей на его основе. В данной работе торф использовался совместно с сырой нефтью и водой. Как показали эксперименты, наиболее эффективным с точки зрения минимизации времени на инициирование горения является сжигание смесевых топлив в виде капель или гранул (по сравнению со слоевым методом). Важно отметить, что использование воды в составе топливных смесей при их капельном сжигании приводило к реализации микровзрывного дробления и, как следствие, существенному снижению времен задержки зажигания по сравнению со слоевым сжиганием топлива, а также параметрами зажигания безводных топливных смесей.

Снижение доли торфа при соответственном увеличении содержания нефти позволяет сократить инертный период прогрева и снизить время задержки зажигания, однако приводит к значительному увеличению концентраций оксидов серы и азота в продуктах сгорания топлива. Несмотря на снижение тепловой эффективности процесса выработки энергии, обусловленного снижением удельной теплотворной способности вследствие замены горючей массы на воду, наиболее привлекательным с точки зрения экологического и энергетического потенциала являлось топливо с составом “25% вода, 25% нефть, 50% торф”. При его сжигании в виде капли инерционность зажигания была наименьшей по сравнению с другими топливами. Эмиссия оксидов серы и азота при сжигании такого топлива также была наименьшей. Однако, как показали результаты экспериментов, максимальные выбросы оксидов азота при сжигании исследуемых смесей существенно превышают значения для угольной пыли. Это говорит о том, что, скорее всего, для повышения относительных и удельных экологических характеристик необходимо повышать долю воды или снижать долю нефти, либо применять дополнительные компоненты (например, биомассу) с целью обеспечения высоких значений комплексных критериев эффективности топлив на основе экологических, экономических и энергетических характеристик [19].

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено за счет средств Российского научного фонда (проект № 18-73-00013).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Yanik J., Duman G., Karlström O., Brink A. // J. Environ. Manage. 2018. V. 227. P. 155.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.08.068>

2. Cséfalvay E., Horváth I.T. // ACS Sustainable Chem. Eng. 2018. V. 6. № 7. P. 8868.
<https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b01213>
3. Бородюля В.А., Бучилко Э.К., Виноградов Л.М. // Теплоэнергетика. 2014. № 7. С. 36. [Thermal Engineering, 2014, vol. 61, no. 7, p. 497.
DOI: 10.1134/S0040601514040016]
4. Лиштван И.И., Фалюшин П.Л., Смолячкова Е.А., Коврик С.И. // ХТТ. 2009. № 1. С. 3. [Solid Fuel Chemistry, 2009, vol. 43, no. 1, p. 1.
DOI: 10.3103/S0361521909010017]
5. Буравчук Н.И., Гурьянова О.В. // ХТТ. 2018. № 5. С. 33. [Solid Fuel Chemistry, 2018, vol. 52, no. 5, p. 308.
DOI: 10.3103/S0361521918050038].
<https://doi.org/10.1134/S0023117718050031>
6. Zhu M., Zhang Z., Zhang Y., Liu P., Zhang D. // Appl. Energy. 2017. Vol. 185. P. 2160.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.11.087>
7. Вершинина К.Ю., Кузнецов Г.В. Стрижак П.А. // Кокс и химия. 2016. № 4. С. 8. [Coke and Chemistry, 2016, vol. 59, no. 4, p. 137.
DOI: 10.3103/S1068364X16040086].
8. Oren M.J., MacKay G.D.M. // Fuel. 1986. V. 65. № 5. P. 644.
[https://doi.org/10.1016/0016-2361\(86\)90358-3](https://doi.org/10.1016/0016-2361(86)90358-3)
9. Деягин Г.Н., Сметанников Б.Н. Исследование процесса воспламенения капли водоугольной суспензии // Сб. Новые методы сжигания твердых топлив и вопросы теории горения. М.: Наука, 1969. С. 84.
10. Бурдуков А.П., Карпенко Е.И., Попов В.И., Разваляев В.Н., Федосенко В.Д. // Физика горения и взрыва. 1996. Т. 32. № 4. С. 62.
11. Kim R., Jeon C. // Appl. Therm. Eng. 2014. V. 63. № 2. P. 565.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.11.055>
12. Setyawan H.Y., Zhu M., Zhang Z., Zhang D. // Energy. 2016. V. 113. P. 153.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.07.032>
13. Nyashina, G.S., Shlegel, N.E., Vershinina, K.Y., Strizhak, P.A. // Energy and Fuels. 2018. V. 32. № 11. P. 11398.
<https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.8b02826>
14. Ведрученко В.П. // Теплоэнергетика. 2000. № 2. С. 57.
15. Yao S.C., Manwani P. // Combust. Flame. 1986. V. 66. № 1. P. 87.
[https://doi.org/10.1016/0010-2180\(86\)90036-2](https://doi.org/10.1016/0010-2180(86)90036-2)
16. Burdakov A.P., Popov V.I., Tomilov V.G., Fedosenko V.D. // Fuel. 2002. V. 81. № 7. P. 927.
[https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(01\)00009-6](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(01)00009-6)
17. Няшина Г.С., Шлегель Н.Е., Лырищikov С.Ю. // ХТТ. 2017. Т. 1. № 6. С. 26. [Solid Fuel Chemistry, 2017, vol. 51, no. 6, p. 358.
DOI: 10.3103/S0361521917060064]
<https://doi.org/10.7868/S0023117717060044>
18. Badour C., Gilbert A., Xu C., Li H., Shao Y., Tourigny G., Preto F. // Can. J. Chem. Eng. 2012. V. 90. № 5. P. 1170.
<https://doi.org/10.1002/cjce.20620>
19. Nyashina G.S., Strizhak P.A. // Environmental Pollution. 2018. V. 242. P. 31.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.06.072>
20. Heikkinen R., Laitinen R.S., Patrikainen T., Tiainen M., Virtanen M. // Fuel Process. Technol. 1998. V. 56. № 1–2. P. 69.
[https://doi.org/10.1016/S0378-3820\(97\)00085-4](https://doi.org/10.1016/S0378-3820(97)00085-4)