

УДК 536.468

## ЗАЖИГАНИЕ ТОПЛИВНЫХ СУСПЕНЗИЙ, ПРИГОТОВЛЕННЫХ НА ОСНОВЕ ОТХОДОВ ОБОГАЩЕНИЯ УГЛЯ И НЕФТЕПРОДУКТОВ

К. Ю. Вершинина, С. Ю. Лырщиков, П. А. Стрижак

Томский политехнический университет, 634050 Томск, [vershininaks@gmail.com](mailto:vershininaks@gmail.com)

Представлены результаты экспериментального исследования условий и характеристик зажигания суспензионных топлив, приготовленных на основе типичных отходов углеобогащения и нефтепереработки. Основное внимание уделено анализу отличий характеристик и условий зажигания органоводоугольных топлив, приготовленных с использованием отходов обогащения каменных углей: тощего, коксующегося, слабоспекающегося, жирного, газового, длиннопламенного. Установлены время задержки и минимальная (пороговая) температура зажигания исследуемых топлив. Сформулированы заключения о влиянии свойств и концентраций компонентов топлива на характеристики инициирования горения.

Ключевые слова: органоводоугольное топливо, отходы углеобогащения, отработанное масло, зажигание, время задержки зажигания.

DOI 10.15372/FGV20180316

### ВВЕДЕНИЕ

В соответствии с экспертными прогнозами [1–4] уголь в ближайшие десятилетия удержит лидирующие позиции в мировом энергетическом балансе. Согласно отчетам Международного энергетического агентства [1, 2] почти 41 % мировой электроэнергии в 2013 г. произведен путем сжигания угля. В 2014–2016 гг. этот показатель возрос до 46 %.

К сожалению, процессы добычи, переработки и использования угля в промышленности оказывают сильное воздействие на окружающую среду. В частности, при обогащении угля образуется большое количество отходов (10 ÷ 15 % от объема рядового угля). Такие отходы формируются ежегодно в количестве сотен миллионов тонн и хранятся в отвалах и накопителях, что влечет загрязнение окружающей среды [1–3]. Выбросы углекислого газа, оксидов серы и азота, летучей золы, образующиеся при пылеугольном сжигании, являются причиной повышенной заболеваемости в крупных городах [5–8]. В регионах добычи и сжигания угля регистрируется загрязнение почвы и воды тяжелыми металлами [9]. Выбросы угольных электростанций вызывают выпадение кислотных осадков (дождей) [10] и др. Посколь-

ку сжигание угля связано с изменениями биосферы, влияющими на здоровье человека, поиск способов снижения антропогенного воздействия процессов переработки и сжигания угля вызывает особый интерес.

Одним из направлений, позволяющих достаточно масштабно и полезно задействовать горючие промышленные отходы (например, отходы флотационного обогащения угля, неостребованные нефтепродукты, отработанные турбинные, моторные, трансформаторные и другие масла), а также низкосортные угли, является их сжигание в составе композиционных жидких топлив. В литературе такие топлива часто называют (в зависимости от компонентного состава) водоугольными (ВУТ) [11–13] и органоводоугольными (ОВУТ) [14, 15]. Развитие технологий ВУТ и ОВУТ способствует не только безопасной утилизации отходов, расширению топливной сырьевой базы, но и сокращению выбросов опасных тяжелых оксидов (по сравнению с традиционным высокотемпературным сжиганием угольной пыли). Исследования [16–20] иллюстрируют экологические преимущества сжигания суспензионных топлив, которые в основном обусловлены пониженной температурой горения, а также способностью водяного пара поглощать оксиды серы и азота.

Использование флотационных отходов обогащения как основного горючего компонента ВУТ и ОВУТ представляет особый

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 15-19-10003).

© Вершинина К. Ю., Лырщиков С. Ю., Стрижак П. А., 2018.

интерес в экономическом, экологическом и энергетическом аспектах. Такие отходы называются фильтр-кеками, и они типичны для регионов с развитой угледобывающей промышленностью. Фильтр-кек представляет собой суспензию ВУТ — смесь воды (в среднем  $40 \div 50$  %), угольных частиц (средний размер не более 200 мкм) и негорючей минеральной составляющей.

В целях разработки эффективных технологий сжигания отходов в настоящей работе исследованы процессы зажигания и горения одиночных капель ОБУТ, приготовленных на основе типичных отходов угле- и нефтепереработки.

## МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Методика основана на помещении одиночной капли топлива на миниатюрный спай малоинерционной термопары (рис. 1). Этот метод широко используется для изучения процессов воспламенения и горения капель ОБУТ [15] и ВУТ [12]. Исследования проводились с применением высокоскоростной видеорегистрации, программного обеспечения Tema Automotive, оптического метода Particle Image Velocimetry [15].

Капля топлива, подвешенная на спае термопары (платинородий-платиновая, диапазон измерения  $273 \div 1873$  К, систематическая погрешность  $\pm 1$  К, инерционность не более 0.1 с, диаметр спая 0.1 мм), помещалась в камеру сгорания, представляющую собой полый цилиндр из жаростойкого кварцевого стекла (внутренний диаметр 0.1 м, длина 1 м). В стенке цилиндра вдоль оси симметрии выполнены три отверстия (диаметром 9 мм) для измерения температуры окислителя и размещения в

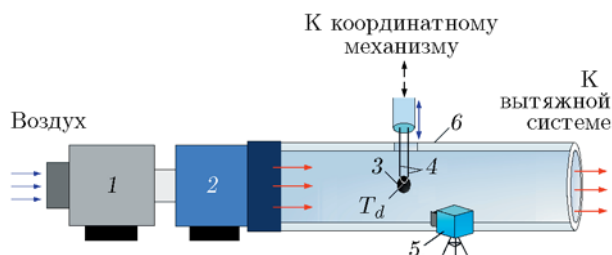


Рис. 1. Схема экспериментального стенда:

1 — нагнетатель воздуха, 2 — нагреватель воздуха, 3 — капля топлива, 4 — малоинерционная термопара, 5 — видеокамера, 6 — полый цилиндр [15]

камере сгорания термопары с каплей топлива. Начальный радиус капель ОБУТ составлял около 1 мм. Температура в камере сгорания варьировалась от 600 до 1000 К. Скорость потока окислителя менялась от 0.5 до 3 м/с.

Регистрировались: температура ( $T_g$ ) и скорость ( $v_g$ ) потока окислителя; температура в центре капли ( $T_d$ ); начальный размер (средний радиус  $R_d$ ) капли топлива; время задержки зажигания ( $\tau_d$ ), горения ( $\tau_b$ ) и полного сгорания ( $\tau_c = \tau_d + \tau_b$ ). Параметр  $\tau_d$  охватывает время от начала нагрева (помещения капли в камеру сгорания) до начала гетерогенного зажигания углеродного остатка (контролировалось одновременное выполнение неравенства  $T_d \geq T_g$  и достижение скорости изменения  $T_d$  не менее 10 К/с [15]). Параметр  $\tau_b$  представляет собой время от момента зажигания углеродного остатка до его выгорания (характеризуется отклонением  $T_d$  от установившегося значения (при  $\tau \rightarrow \infty$ ) не более чем на  $0.05T_d^{\max}$  ( $T_d^{\max}$  — максимальная температура капли в процессе горения)).

Методы оценки систематических и случайных ошибок аналогичны описанным в работе [15]. Каждая серия экспериментов состояла из 10 измерений при идентичных условиях для обеспечения удовлетворительной воспроизводимости результатов. Погрешности средств измерений, используемых в работе, приведены в табл. 1.

В качестве основного горючего компонента исследуемых топлив использованы фильтр-кеки разных марок каменного угля: тощего, коксующегося, слабоспекающегося, жирного, длиннопламенного, газового. При флотации необогащенный уголь промывается водой с добавлением специализированных реагентов, затем разделяется на концентрат и отход. Используемая для промывки вода подается в специальные резервуары, где осаждаются частицы угля. Водоугольная суспензия откачивается и направляется на ленточные прессы для вытеснения воды. В результате формируется влажный остаток (смесь воды, частиц угля и минерального компонента), называемый фильтр-кеком. Размер твердых частиц фильтр-кека около 100 мкм. В табл. 2, 3 представлены результаты технического и элементного анализа используемых фильтр-кеков.

Жидкий горючий компонент является вторым в суспензиях ОБУТ. В данной работе использованы преимущественно отходы нефтя-

Таблица 1

## Характеристики средств измерений

Измеряемая физическая величина	Средство измерения	Систематическая погрешность
Температура окислителя $T_g$	Термоэлектрические преобразователи (хромель-алюмелевые термопары)	$\pm 3$ К, инерционность не более 10 с
Скорость потока окислителя $v_g$	Анемометр UnionTest AN110	$\pm 3$ %
Объемная концентрация кислорода в воздухе	Газоанализатор Testo 340	$\pm 0.2$ %
Радиус капли $R_d$	Высокоскоростная камера Phantom Miro M310, ПО Tema Automotive	$\leq 4$ %
Температура в центре капли $T_d$	Термоэлектрический преобразователь (платина-платинородиевая термопара)	$\pm 1$ К, инерционность не более 0.1 с
Время задержки зажигания $\tau_d$	Термоэлектрический преобразователь (платина-платинородиевая термопара)	$\pm 1$ К, инерционность не более 0.1 с
	Высокоскоростная камера Phantom Miro M310, ПО Tema Automotive	$\leq 4$ %
Время полного сгорания $\tau_c$	Высокоскоростная камера Phantom Miro M310, ПО Tema Automotive	$\leq 4$ %

Таблица 2

## Свойства фильтр-кеков (после высушивания)

Фильтр-кек угля	Технический анализ			Элементный состав, % (daf)		
	Зольность, %	Летучие, % (daf)	Теплота сгорания, МДж/кг	С	Н	О + N + S
Коксующегося	26.46	23.08	24.83	87.20	5.090	7.53
Длиннопламенного	36.99	41.47	19.24	73.27	4.904	21.83
Газового	33.82	43.11	22.16	75.12	4.638	20.24
Слабоспекающегося	50.89	30.16	15.23	87.47	5.039	7.36
Тощего	21.20	16.09	26.92	90.13	4.255	5.52
Жирного	57.67	45.24	20.9	73.16	4.999	21.84

Таблица 3

## Свойства влажных фильтр-кеков

Фильтр-кек угля	Массовая доля воды, %	Теплота сгорания, МДж/кг
Коксующегося	43.5	14.03
Длиннопламенного	56.8	8.31
Газового	53.0	10.41
Слабоспекающегося	37.9	9.46
Тощего	39.1	16.42
Жирного	37.9	12.91

Таблица 4

## Свойства жидких нефтепродуктов

Образец	Плотность при 293 К, кг/м <sup>3</sup>	Влажность, %	Зольность, %	Температура вспышки, К	Температура зажигания, К	Теплота сгорания, МДж/кг
Отработанное автомобильное масло	871	0.28	0.78	405	491	44.1
Отработанное турбинное масло	868	—	0.03	448	466	45.1
Отработанное трансформаторное масло	877	—	—	421	442	44.9
Отработанное компрессорное масло	887	—	0.023	458	502	45.2
Мазут	1 000	6.12	4.06	438	513	39.4

ного происхождения. Основные свойства нефтепродуктов представлены в табл. 4. Массовая доля жидкого горючего компонента в топливной суспензии варьировалась в диапазоне  $5 \div 15$  %.

В соответствии с требуемыми пропорциями компоненты топлива предварительно взвешивали на электронных аналитических весах ViBRA HT 84RCE. Для приготовления топлива применялся гомогенизатор Homogenizer MPW-302. Длительность смешивания компонентов суспензии в рабочем стакане (объем 0.25 л) гомогенизатора составляла около  $8 \div 10$  мин до получения топлива (по методике [15]).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Процесс воспламенения и последующего горения капель композиционного жидкого топлива различных составов имеет общую основу, но может характеризоваться некоторыми особенностями (например, диспергированием твердых частиц, эффектами вскипания и микровзрывов) в зависимости от свойств и концентрации компонентов. Характерные кадры исследуемого процесса представлены на рис. 2. Зажигание капли ОБУТ включает в себя следующие основные стадии: инертный прогрев топлива, испарение влаги из приповерхностного слоя, испарение жидкого нефтепродукта, термическое разложение органической части угля в приповерхностном слое капли, формирование смеси воздуха и горючих газов в окрестности капли, газофазное зажигание смеси воздуха, паров нефтепродукта и летучих, прогрев

углеродного остатка, его гетерогенное зажигание и последующее горение. В [21] приведен подробный анализ выделенных стадий, на базе которого разработаны физическая и математическая модели исследованных процессов. В настоящей работе в целом регистрировались аналогичные стадии, но выявлены и масштабные по временным интервалам отличия данных стадий при сравнении ОБУТ с разными концентрациями и свойствами компонентов (в проведенных экспериментах выбор компонентов был существенно шире, чем в [21]).

При помещении капли композиционного жидкого топлива в камеру сгорания начинается ее прогрев. Этот этап можно считать инертным с точки зрения реализации реакций окисления. При прогреве капли влага с поверхности ускоренно испаряется, поглощая энергию внешней газовой среды. Признаками, идентифицирующими эту стадию, являются трансформация поверхности капли (включая диспергирование частиц, вскипание воды, см. рис. 2, *a*), изменение ее размера, а также переход от глянцевого вида поверхности капли к матовому. Эти признаки выражены в большей или меньшей степени контрастно в зависимости от компонентного состава топлива. После обезвоживания наружного слоя капли начинаются процессы термического разложения частиц угля и испарения отработанного турбинного масла. Следует отметить, что процессы в капле композиционного жидкого топлива идут не одновременно, а послойно. Помимо этого, процессы, начинающиеся в верхних слоях, могут несколько замедляться (тормозиться) за

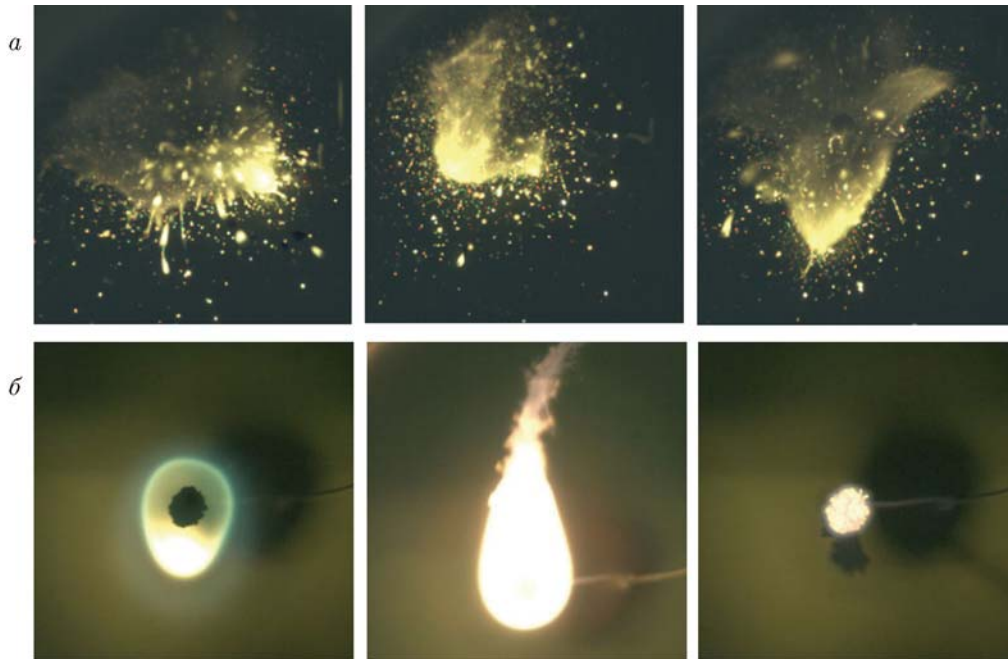


Рис. 2. Видеограммы зажигания и горения капель ОВУТ: «микровзрывное» горение топлива (а), стадии газозафного и гетерогенного горения топлива (б)

счет стока тепла в глубокие слои капли топлива, где сохранились неразложившаяся угольная масса, нефтепродукт, а также вода. При достижении определенных значений концентрации горючих продуктов термического разложения угля и паров отработанного турбинного масла при данной температуре реализуется газозафное воспламенение (рис. 2, б). Прогорание горючей смеси в окрестности капли топлива способствует дополнительному прогреву всей массы топлива и особенно поверхности. При достаточном прогреве реализуется гетерогенное зажигание твердой части топлива. Последующее гетерогенное горение углеродного остатка сопровождается, как правило, частичным диспергированием некоторых частиц и фрагментов и завершается выгоранием углерода и образованием зольного остатка.

Рис. 3 иллюстрирует изменение температуры в центре капель ОВУТ в процессе нагрева. Участки кривых с монотонным повышением температуры до значения температуры подведенного разогретого воздуха соответствуют эндотермическим процессам (испарение жидких компонентов, термическое разложение угля). Участки кривых, на которых температура в центре капли резко возрастает и начинает превышать температуру внешней газозой среды, соответствуют воспламенению летучих, а

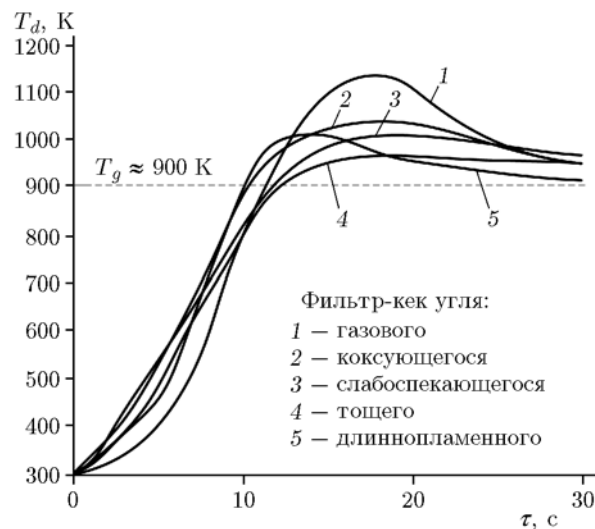


Рис. 3. Изменение во времени температуры в центре капель ОВУТ, содержащих разные марки фильтр-кека (90 %) и отработанное турбинное масло (10 %) ( $R_d \approx 1$  мм,  $T_g \approx 900$  К,  $v_g \approx 1.5$  м/с)

затем и сгоранию коксового остатка.

Согласно результатам [15] теплота сгорания ОВУТ равна сумме теплот сгорания каждого компонента в соответствии с его массовой долей в топливной композиции. Результаты расчета теплоты сгорания ОВУТ, приготов-

Таблица 5  
Теплота сгорания ОБУТ (90 % влажного фильтр-кека, 10 % отработанного компрессорного масла)

Фильтр-кек угля	Теплота сгорания, МДж/кг
Коксующегося	17.15
Длиннопламенного	11.99
Газового	13.89
Слабоспекающегося	13.03
Тощего	19.29
Жирного	16.14

Таблица 6  
Минимальные температуры устойчивого зажигания капель ОБУТ (90 % влажного фильтр-кека, 10 % отработанного турбинного масла) при  $R_d \approx 1$  мм,  $v_g \approx 2$  м/с

Фильтр-кек угля	Температура зажигания, К
Коксующегося	840
Длиннопламенного	780
Газового	845
Слабоспекающегося	900
Тощего	860
Жирного	800

ленных на основе фильтр-кеков разных марок и отработанного компрессорного масла, представлены в табл. 5. Как видно из табл. 3 и 5, теплота сгорания суспензий с добавлением жидкого горючего компонента значительно превышает теплоту сгорания ВУТ на основе фильтр-кеков (см. табл. 3), поскольку теплотворная способность нефтепродуктов высока и даже превышает аналогичный параметр углей с высоким метаморфизмом. Безусловно, при увеличении массовой доли нефтепродукта в составе ОБУТ теплота сгорания будет расти. Однако значительное увеличение (от 20 % и более) массовой доли нефтяных компонентов приходит в противоречие с экологическим аспектом, поскольку антропогенные выбросы заметно увеличатся при сжигании ОБУТ с высокой долей нефтепродуктов [19, 20]. Следует отметить, что для интенсификации зажигания, а также увеличения теплотворной способности ОБУТ на основе отходов вместо нефтепродуктов могут использоваться добавки растительного происхождения (например, отходы лесопи-

ления [22], древесный уголь [23], растительные масла [24]), а также высокорреакционные бурые угли [25].

В табл. 6 и на рис. 3–5 приведены характеристики зажигания суспензионных топлив, полученных из отходов. Использование фильтр-кеков с достаточно низким содержанием золы и высокой концентрацией летучих компонентов (например, фильтр-кека коксующегося угля) является перспективным в плане снижения затрат на иницирование горения суспензии ОБУТ. Поэтому время задержки и предельная температура зажигания топлив, приготовленных на основе таких компонентов, минимальны по сравнению с суспензиями других составов (табл. 6, рис. 4). Например, максимальное отличие времен задержки зажигания ОБУТ, достаточно существенно отличающихся содержанием летучих (на основе газового и тощего фильтр-кека), составляет около 23 %. С другой стороны, использование компонентов с высокой зольностью, которая для некоторых фильтр-кеков (например, слабоспекающихся и жирных углей) составляет около 50 %, приводит к увеличению затрат на иницирование горения ОБУТ. В частности, относительно низкое начальное содержание влаги и большое количество летучих веществ в беззольной части фильтр-кеков слабоспекающегося и жирного углей не дают улучшения характеристик воспламенения ОБУТ на их основе, поскольку увеличение минеральных компонентов в топливе замедляет (подавляет) зажигание. Использование угольных компонентов с низкой зольностью и высоким содержанием летучих способствует зажиганию топлива при более низкой температуре внешней газовой среды (см. табл. 6).

Инерционность зажигания суспензионного топлива возрастает, если применять в качестве основного компонента фильтр-кек высокой влажности (более 50 %), поскольку испарение воды при зажигании ОБУТ является наиболее энергоемким эндотермическим процессом ( $\approx 2$  МДж/кг). Кроме того, по мере увеличения влажности доля горючей массы уменьшается. Также следует отметить, что водяной пар вблизи капли и в порах приповерхностного слоя препятствует испарению жидкого горючего продукта и термическому разложению органической массы угля и замедляет нагрев топлива. Например, при 870 К длительность иницирования горения более влажного ОБУТ

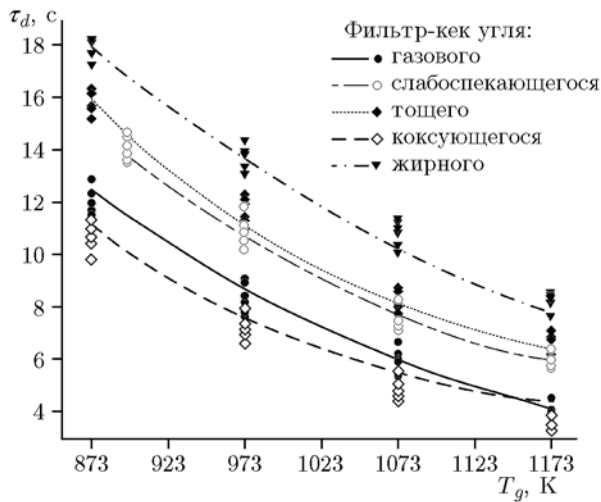


Рис. 4. Зависимость времени задержки зажигания капле ОВУТ (10 % мазута) от температуры окислителя при варьировании в составе топлива марки фильтр-кека ( $R_d \approx 1.3$  мм,  $v_g \approx 0.5$  м/с)

на основе фильтр-кека газового угля превышает почти на 16 % аналогичный параметр ОВУТ на основе фильтр-кека коксующегося угля.

В первом приближении кривые на рис. 4 также иллюстрируют достаточно близкие времена задержки зажигания композиций ОВУТ, полученных из отходов обогащения угля разных марок. Однако для более зольных топлив с низким содержанием летучих компонентов регистрировалась повышенная инерционность зажигания. Так, например, максимальное отклонение времени задержки зажигания топлив на основе максимально и минимально зольных фильтр-кеков (жирного и тощего углей соответственно) составляет около 23 %.

При увеличении температуры интенсифицируются фазовые и химические превращения на поверхности и в глубинных слоях капле ОВУТ (испарение влаги и нефтяного компонента, выделение летучих, окисление продуктов термического разложения угля и паров нефтепродукта в газовой фазе, нагревание и гетерогенное воспламенение углерода). Поэтому повышение температуры в камере сгорания в диапазоне  $880 \div 1170$  К приводило к уменьшению продолжительности инициирования горения коксового остатка на  $35 \div 45$  %. Следует также отметить, что с увеличением температуры в камере сгорания и уменьшением размера капли различия в задержке зажигания ОВУТ разных составов становятся менее заметными.

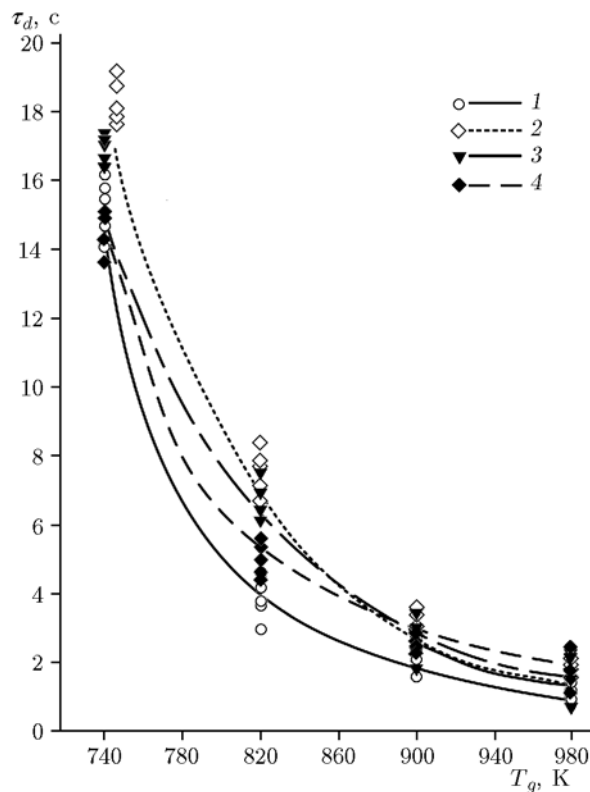


Рис. 5. Зависимость времени задержки зажигания капле ОВУТ на основе фильтр-кека коксующегося угля (90 %) от температуры окислителя при варьировании в составе топлива жидкого горючего компонента ( $R_d \approx 1$  мм,  $v_g \approx 1.5$  м/с):

1 — отработанное турбинное масло, 2 — мазут, 3 — отработанное компрессорное масло, 4 — отработанное трансформаторное масло

На рис. 5 приведены зависимости времени задержки зажигания капле ОВУТ на основе исходного (влажного) отхода обогащения угля от температуры в камере сгорания при варьировании в ОВУТ жидкого горючего компонента. Различия наиболее заметны в области относительно низких температур ( $720 \div 820$  К). Как показали эксперименты, суспензии с добавлением отработанных трансформаторного и турбинного масел характеризуются меньшим временем задержки зажигания по сравнению с ОВУТ с добавкой мазута. Масла по сравнению с мазутом являются более летучими нефтепродуктами, легче испаряются и воспламеняются при более низкой температуре окислителя. Поэтому отличие времен задержки зажигания ОВУТ с турбинным маслом и ОВУТ с мазутом достаточно значительно (см. рис. 5) —

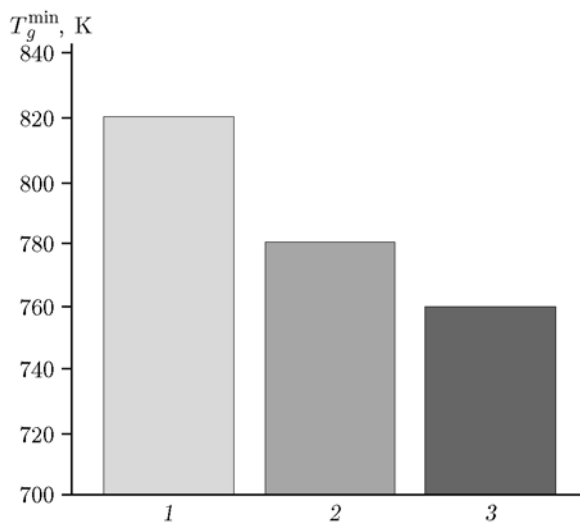


Рис. 6. Предельные температуры зажигания капле ОВУТ ( $R_d \approx 1$  мм), приготовленных на основе фильтр-кека длиннопламенного угля (90 %) с добавлением различных жидких горючих компонентов:

1 — мазут, 2 — отработанное трансформаторное масло, 3 — отработанное автомобильное масло

2 ÷ 6 с в диапазоне температуры окислителя 720 ÷ 980 К. Зажигание ОВУТ при более низких температурах нагрева обеспечивается наличием в суспензии жидких горючих компонентов с низкой температурой вспышки и воспламенения и низкой теплотой испарения (рис. 6). Этот вывод особенно важен для суспензий, получаемых из отходов обогащения угля, которые в сравнении с угольной пылью являются достаточно зольными и содержат меньше летучих веществ, теплота сгорания которых может значительно ускорить нагрев и воспламенение коксового остатка. Важно отметить, что использование добавок жидких нефтепродуктов в ОВУТ на основе угольной пыли (особенно бурого угля) может привести к увеличению инерционности и предельных температур зажигания, но во всех случаях добавление масла или некоторых других нефтепродуктов (с высокой теплотворной способностью) повысит теплоту сгорания готовой топливной суспензии. Увеличение концентрации жидкого горючего компонента в ОВУТ приводит к изменению характеристик и условий зажигания. В частности, при варьировании доли отработанного турбинного масла в композиции на основе фильтр-кека коксующегося угля в диапазоне 0 ÷ 15 % пороговая (минимальная) температура зажигания снижа-

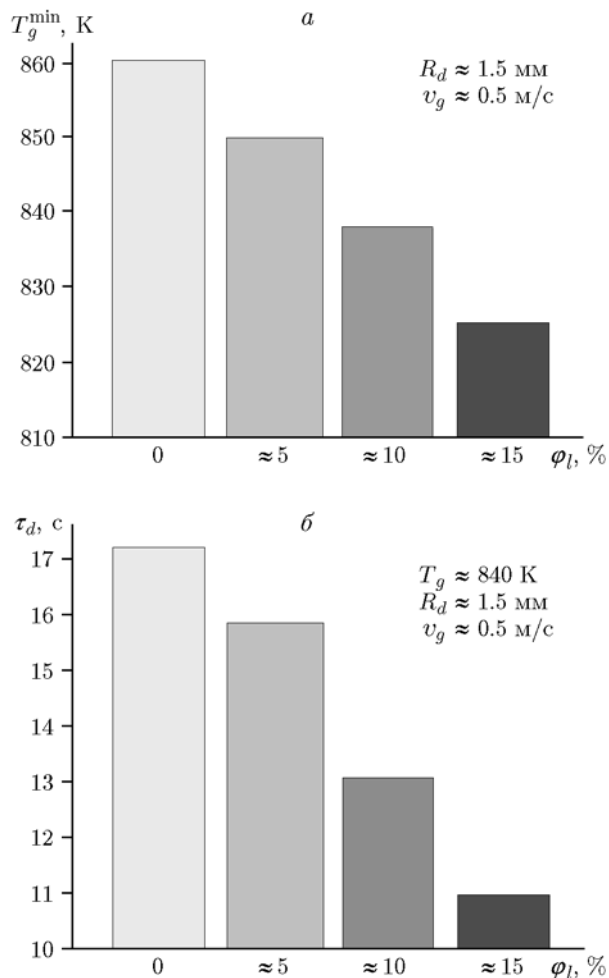


Рис. 7. Минимальная температура (а) и время задержки зажигания (б) капле ОВУТ, состоящего из влажного фильтр-кека коксующегося угля и отработанного турбинного масла, при варьировании массовой доли масла

лась на 25 ÷ 30 К, время задержки зажигания уменьшалось на 25 ÷ 35 % (рис. 7).

Оценивать оптимальность составов исследованных топлив можно с позиций энергетического, экономического и реологического аспектов. Согласно известным результатам (см., например, [11–14]) влажность суспензий ВУТ и ОВУТ в среднем должна изменяться в пределах 40 ÷ 50 % для обеспечения требуемых условий транспортировки и распыла. В этом плане использование в топливе фильтр-кека представляется перспективным, поскольку влажность отходов флотации изначально (после углеобогатительной фабрики) составляет 40 ÷ 50 %. Кроме того, фильтр-кеки достаточно стабильны (вследствие наличия флок-



лянтов). Суспензии на их основе не расслаиваются в течение нескольких (не менее пяти) дней, что исключает необходимость введения дополнительных стабилизаторов в суспензию.

Массовая доля жидкого горючего компонента может варьироваться в диапазоне  $5 \div 15$  %. Добавление 10 % жидкого горючего компонента, как показали эксперименты, существенно меняет характеристики и условия зажигания капель ОВУТ. Увеличение концентрации масла или другого нефтепродукта до 20 % и более не представляется перспективным по техническим причинам.

Применение флотационных отходов углеобогащения при приготовлении суспензий ОВУТ представляет экономический интерес по причине того, что не требует значительных затрат. В частности, поскольку исходный гранулометрический состав фильтр-кека составляет в среднем  $80 \div 150$  мкм, из технологического цикла можно исключить стадию сушки и достаточно энергозатратную стадию дробления твердого горючего компонента. Важно отметить, что при использовании фильтр-кека или другого влажного отхода углеобогащения минимизируется риск возгорания на этапах транспортировки, хранения и разгрузки, поскольку горючее является не высушенной пожароопасной угольной пылью, а водной суспензией. Положительной предпосылкой выступают также низкие транспортные издержки.

Экологическая привлекательность суспензий ОВУТ и ВУТ заключается в возможности утилизации промышленных отходов одновременно с выработкой энергии. Важным аспектом является кратное снижение эмиссии тяжелых оксидов в продуктах сгорания суспензионных топлив по сравнению с угольной пылью за счет снижения температуры в зоне горения и способности паров воды поглощать оксиды серы и азота [16]. С позиций энергетического потенциала исследованные суспензии вызывают интерес тем, что вовлечение отходов в энергетику приводит к получению альтернативного традиционным углю и мазуту топлива с низкой стоимостью. Установлены наиболее привлекательные составы ОВУТ по критерию минимизации температуры и времени задержки зажигания и максимизации теплоты сгорания. Обозначенным критериям соответствуют топлива, приготовленные на основе фильтр-кеков коксующегося, длиннопламенного, газового углей с добавкой трансформаторного, турбинного или

компрессорного масла (10 % масс.).

## ВЫВОДЫ

1. Результаты экспериментального исследования иллюстрируют возможность вовлечения большой группы промышленных отходов (отходов флотационного обогащения углей разных марок, отработанных масел, водонефтяных эмульсий) в энергетический сектор экономики в качестве компонентов композиционных жидких топлив различного состава.

2. Для широкого промышленного применения ОВУТ на основе отходов необходимы добавки, которые интенсифицируют зажигание и увеличивают теплоту сгорания суспензии. Для этого целесообразно использовать отработанные масла, а также фильтр-кеки в смесях с менее инертными и зольными твердыми горючими компонентами.

3. Все исследованные жидкие горючие компоненты (турбинное, трансформаторное, автомобильное, компрессорное масла) увеличивают теплоту сгорания и температуру горения топливной суспензии и снижают температуру и время задержки зажигания суспензии ОВУТ.

4. Результаты экспериментов позволяют прогнозировать диапазон изменения характеристик зажигания топлив, полученных из отходов углеобогащения. В частности, минимальные температуры зажигания в топках котельных агрегатов, вероятно, не будут значительно отличаться от установленных в лабораторных условиях, поскольку нет факторов, существенно изменяющих данный параметр. Время задержки зажигания в топочных условиях, скорее всего, не превысит значений, полученных в настоящем исследовании, поскольку сжигание композиционного жидкого топлива в топке предполагает движение газового потока, взаимодействие капель топливного аэрозоля между собой, накопление горючих паров нефтепродукта в замкнутом объеме и усиленный вклад конвективного теплового потока.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Coal Information** 2012. — Luxembourg: Intern. Energy Agency, 2012.
2. **Key World Energy Statistics**. 2014. — Paris: Intern. Energy Agency, 2014.
3. **International Energy Outlook with Projections to 2040**. — Washington: U.S. Energy Information Administration, 2013.

4. **Конторович А. Э., Эпов М. И., Эдер Л. В.** Долгосрочные и среднесрочные факторы и сценарии развития глобальной энергетической системы в XXI веке // Геология и геофизика. — 2014. — Т. 55, № 5–6. — С. 689–700.
5. **Liu W., Cai J., Huang C., Hu Y., Fu Q., Zou Z., Sun C., Shen L., Wang X., Pan J., Huang Y., Chang J., Zhao Z., Sun Y., Sundell J.** Associations of gestational and early life exposures to ambient air pollution with childhood atopic eczema in Shanghai, China // Sci. Total Environ. — 2016. — V. 572. — P. 34–42.
6. **Wu C., Shen F., Li Y., Tsao T., Tsai M., Chen C., Hwang J., Hsu S. H., Chao H., Chuang K., Chou C. C. K., Wang Y., Ho C., Su T.** Association of short-term exposure to fine particulate matter and nitrogen dioxide with acute cardiovascular effects // Sci. Total Environ. — 2016. — V. 569–570. — P. 300–305.
7. **Chen P., Kang S., Li C., Rupakheti M., Yan F., Li Q., Ji Z., Zhang Q., Luo W., Sillanpää M.** Characteristics and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in atmospheric aerosols in the Kathmandu Valley, Nepal // Sci. Total Environ. — 2015. — V. 538. — P. 86–92.
8. **Oliveira M. L., Marostega F., Taffarel S. R., Saikia B. K., Waanders F. B., DaBoit K., Baruah B. P., Silva L. F. O.** Nano-mineralogical investigation of coal and fly ashes from coal-based captive power plant (India): An introduction of occupational health hazards // Sci. Total Environ. — 2014. — V. 468–469. — P. 1128–1137.
9. **Noli F., Tsamos P.** Concentration of heavy metals and trace elements in soils, waters and vegetables and assessment of health risk in the vicinity of a lignite-fired power plant // Sci. Total Environ. — 2016. — V. 563–564. — P. 377–385.
10. **Singh S., Elumalai S. P., Pal A. K.** Rain pH estimation based on the particulate matter pollutants and wet deposition study // Sci. Total Environ. — 2016. — V. 563–564. — P. 293–301.
11. **Murko V. I., Fedyaev V. I., Karpenok V. I., Zasyupkin I. M., Senchurova Y. A., Riesterer A.** Investigation of the spraying mechanism and combustion of the suspended coal fuel // Therm. Sci. — 2015. — V. 19, N 1. — P. 243–251.
12. **Kijo-Kleczkowska A.** Combustion of coal-water suspensions // Fuel. — 2011. — V. 90. — P. 865–877.
13. **Zhang Y., Bo Y., Wu Y., Wu X., Huang Z., Zhou J., Cen K.** Flow behavior of high-temperature flue gas in the heat transfer chamber of a pilot-scale coal-water slurry combustion furnace // Particuology. — 2014. — V. 17. — P. 114–124.
14. **Jianzhong L., Ruikun W., Jianfei X., Junhu Z., Kefa C.** Pilot-scale investigation on slurrying, combustion, and slagging characteristics of coal slurry fuel prepared using industrial wastewater // Appl. Energy. — 2014. — V. 115. — P. 309–319.
15. **Glushkov D. O., Lyrshchikov S. Y., Shevyrev S. A., Strizhak P. A.** Burning properties of slurry based on coal and oil processing waste // Energy and Fuels. — 2016. — V. 30, N 4. — P. 3441–3450.
16. **Осинцев К. В.** Экспериментальное исследование вязкости водоугольной суспензии с бифракционным составом дисперсной фазы // Теплоэнергетика. — 2012. — Т. 59, № 6. — С. 21–27.
17. **Zhao X., Zhu W., Huang J., Li M., Gong M.** Emission characteristics of PCDD/Fs, PAHs and PCBs during the combustion of sludge-coal water slurry // J. Energy Inst. — 2015. — V. 88, N 2. — P. 105–111.
18. **Leckner B., Åmand L.-E., Lücke K., Werther J.** Gaseous emissions from co-combustion of sewage sludge and coal/wood in a fluidized bed // Fuel. — 2004. — V. 83, N 4–5. — P. 477–486.
19. **Dmitrienko M. A., Strizhak P. A.** Environmentally and economically efficient utilization of coal processing waste // Sci. Total Environ. — 2017. — V. 598. — P. 21–27.
20. **Nyashina G. S., Legros J.-K., Strizhak P. A.** Environmental potential of using coal-processing waste as the primary and secondary fuel for energy providers // Energies. — 2017. — V. 10 (405). — P. 1–11.
21. **Glushkov D. O., Syrodoy S. V., Zhakharevich A. V., Strizhak P. A.** Ignition of promising coal-water slurry containing petrochemicals: Analysis of key aspects // Fuel Proces. Technol. — 2016. — V. 148. — P. 224–235.
22. **Vershinina K. Y., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A.** Sawdust as ignition intensifier of coal water slurries containing petrochemicals // Energy. — 2017. — V. 140. — P. 69–77.
23. **Kuznetsov G. V., Lyrshchikov S. Y., Shevyrev S. A., Strizhak P. A.** Ignition of the coal-water slurry containing petrochemicals and charcoal // Energy and Fuels. — 2016. — V. 30, N 12. — P. 10886–10892.
24. **Valiullin T. R., Egorov R. I., Strizhak P. A.** Perspectives of the use of rapeseed oil for the doping of waste-based industrial fuel // Energy and Fuels. — 2017. — V. 31, N 9. — P. 10116–10120.
25. **Vershinina K. Y., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A.** Ignition characteristics of coal-water slurry containing petrochemicals based on coal of varying degrees of metamorphism // Energy and Fuels. — 2016. — V. 30, N 8. — P. 6808–6816.

*Поступила в редакцию 1/IX 2017 г.*