

УДК 536.468

Эволюция во времени температуры капли композиционного жидкого топлива при взаимодействии с потоком нагретого воздуха*

Д.О. Глушков, А.В. Захаревич, П.А. Стрижак, С.В. Сыродой

Томский политехнический университет

E-mail: pavelspa@tpu.ru

С использованием малоинерционного термоэлектрического преобразователя и системы высокоскоростной (до 10^5 кадров в секунду) видеорегистрации изучены макроскопические закономерности изменения температуры в центре капли трехкомпонентного (уголь, вода, нефтепродукт) композиционного жидкого топлива (КЖТ) в течение индукционного периода при разной интенсивности нагрева потоком воздуха с варьируемыми параметрами: температурой 670–870 К, скоростью движения 1–4 м/с. Проведены исследования для двух групп составов КЖТ: на основе бурого угля и отхода обогащения (КЕК) каменного угля. Для оценки влияния жидкого горючего компонента КЖТ на характеристики процесса зажигания исследован соответствующий состав двухкомпонентного водоугольного топлива (ВУТ). Выделены стадии инертного прогрева капель КЖТ и ВУТ с характерным размером, соответствующим радиусу 0,75–1,5 мм, испарения влаги и жидкого нефтепродукта (для КЖТ), термического разложения органической части угля, зажигания газовой смеси, выгорания углерода. Установлены закономерности изменения температуры капель КЖТ и ВУТ на каждой из выделенных стадий в условиях совместного протекания фазовых превращений и химического реагирования. Проведен сравнительный анализ времен задержки зажигания и полного сгорания капель рассмотренных топливных композиций при варьировании их размеров, температуры и скорости движения потока окислителя.

Ключевые слова: композиционное жидкое топливо, водоугольное топливо, капля, поток воздуха, теплоперенос, зажигание.

Введение

В последнее время достаточно актуален вопрос о перспективах применения жидких топлив на основе водоугольных суспензий [1–21] в качестве энергоресурсов не только для нужд промышленной энергетики, но и для крупного сектора транспортной отрасли. Согласно результатам соответствующих фундаментальных исследований и технико-экономического анализа выявлено несколько преимуществ топливных составов на основе водоугольных суспензий по сравнению с традиционными видами твердого (уголь) и жидкого (мазут) топлив. В качестве основных выделены [14–20]: взрывобезопасность водоугольных суспензий на стадиях топливоподготовки, транспортировки и хранения, относительно невысокое содержание вредных веществ в продуктах их сгорания, экономичность эксплуатации энергоустановок и другие.

* Исследование выполнено за счет средств РНФ (проект № 15–19–10003).

Известные результаты экспериментальных и численных исследований, в частности [1–15], послужили основой для разработки наиболее полных физических и математических моделей [16–21], достаточно хорошо описывающих процессы теплопереноса, фазовых превращений и химического реагирования при взаимодействии капель двухкомпонентных водоугольных топлив (ВУТ) с высокотемпературными (более 1000 К) потоками окислителя. Использование таких моделей способствует изучению влияния различных параметров (компонентный состав топлива, способ и время приготовления, условия и интенсивность теплообмена в системе «капля–окислитель» и другие) на интегральные характеристики отдельных стадий (инертный прогрев, испарение влаги, термическое разложение угля, выход летучих и формирование горючей смеси, газофазное воспламенение летучих, гетерогенное загорание углерода) индукционного периода и процесса в целом.

В настоящее время представляется интересным решение задачи возможного включения в состав типичных ВУТ жидкого горючего компонента (до 20 % относительной массовой концентрации) [22–26]. Это может позволить не только увеличить объемы утилизации отработанных нефтепродуктов, но и повысить тепловыделение в процессе горения водоугольных суспензий. Для приготовления таких топливных композиций предполагается использовать отходы обогащения и переработки углей (КЕК, каменноугольная смола), отработанные нефтепродукты из маслосистем энергоустановок (турбин, насосов, двигателей внутреннего сгорания и др.) и механизмов (редукторов, гидроприводов, трансмиссий и др.), сточные воды, пластификатор (или смачиватель). Теплофизические и кинетические параметры трехкомпонентных композиционных жидких топлив (КЖТ) [22–26], а также условия, необходимые для их зажигания, могут существенно отличаться от условий инициирования горения ВУТ. В связи с этим актуальной является задача определения минимальных параметров, например, размера капли, температуры и скорости потока воздуха в системе «капля–окислитель» для зажигания и последующего стабильного горения топлива с целью его использования в качестве энергоресурса на объектах промышленной энергетики. Для решения задачи предполагается адаптация экспериментальной методики [11]. Подход, изложенный в работе [11], заключается в исследовании динамики изменения температуры одиночной капли ВУТ при помощи миниатюрного термоэлектрического преобразователя в процессе зажигания потоком разогретого воздуха.

Цель настоящей работы — экспериментальное исследование с использованием малоинерционного термоэлектрического преобразователя и системы высокоскоростной видеорегистрации эволюции во времени температуры капли типичного композиционного жидкого топлива при инициировании горения в условиях радиационно-конвективного подвода энергии.

Экспериментальный стенд и методы исследований

Изучение взаимосвязанных физико-химических процессов в течение индукционного периода выполнено с использованием стенда, схема которого представлена на рис. 1. Состав регистрирующей аппаратуры аналогичен основным контрольно-измерительным средствам, применяемым в исследованиях [27–29].

В полости цилиндра из кварцевого стекла 1 с внутренним диаметром 0,1 м, длиной 1 м, нагнетателем 2 мощностью 0,25 кВт с расходом газа не более 1200 л/мин и нагревателем 3 мощностью 11 кВт с максимальной температурой на выходе 950 К формировался поток атмосферного воздуха. При помощи пульта управления 4 задавался режим функционирования устройств 2 и 3. Скорость движения (V_g) и температура (T_g) потока окислителя в цилиндре 1 варьировались в диапазонах 1–4 м/с и 670–870 К соответственно. Скорость движения измерялась анемометром UnionTest AN110 с погрешностью $\pm 3\%$

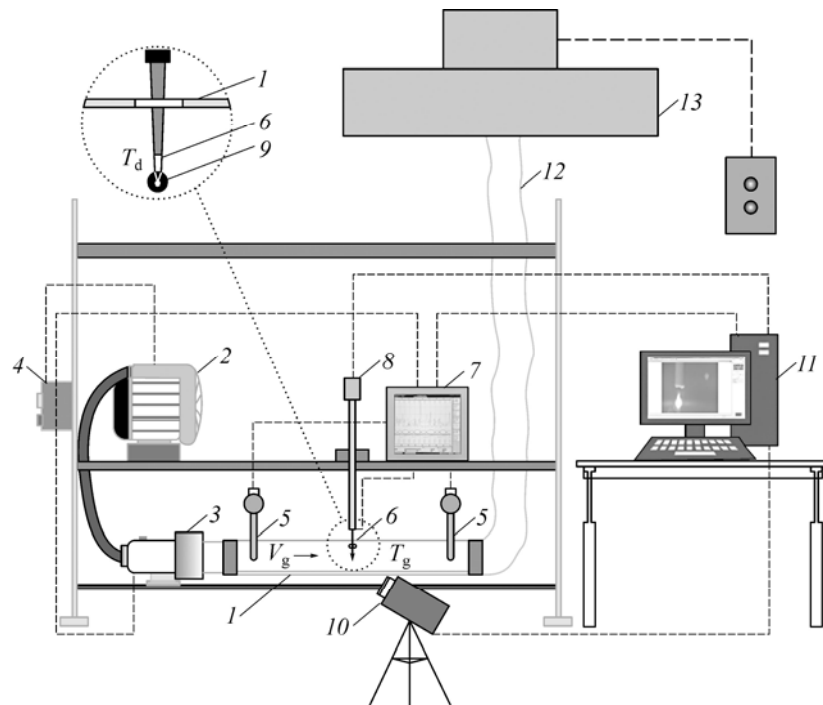


Рис. 1. Схема экспериментального стенда.

1 — полый стеклянный цилиндр, 2 — нагнетатель, 3 — воздухонагреватель, 4 — пульт управления, 5, 6 — термоэлектрические преобразователи, 7 — регистратор, 8 — моторизованное координатное устройство, 9 — капля топлива, 10 — высокоскоростная видеокамера, 11 — компьютер, 12 — воздуховод, 13 — вытяжная вентиляция.

и дискретностью измерения 0,1 м/с. Объемная концентрация кислорода в воздухе после прохождения нагревателя определялась при помощи газоанализатора Testo 340 с погрешностью $\pm 0,2\%$, дискретностью измерения 0,01 %. В широких диапазонах варьирования значений скорости движения и температуры потока воздуха концентрация окислителя составляла $20,5 \pm 0,1\%$.

Цилиндр 1 (рис. 1) имел три технологических отверстия, каждое диаметром $9 \cdot 10^{-3}$ м, расположенных на боковой стенке вдоль оси симметрии. Расстояние между этими отверстиями составляло около 0,4 м. Первое и третье отверстия по направлению движения воздуха применялись для установки термоэлектрических преобразователей 5 общепромышленного исполнения с номинальной статической характеристикой: хромель-алюмель, диапазон измеряемых температур 273–1373 К, систематическая погрешность ± 3 К, постоянная времени не более 10 с. С использованием второго отверстия термоэлектрический преобразователь 6 (в специальном исполнении) с номинальной статической характеристикой: платинородий-платина, диапазон измеряемых температур 273–1873 К, систематическая погрешность ± 1 К, постоянная времени не более 1 с, перемещался моторизованным координатным устройством 8 со скоростью 0,5 м/с в полость цилиндра 1. Сигналы с преобразователей 5 и 6 поступали на регистратор 7 и использовались для контроля значений температуры воздуха в соответствующих сечениях цилиндра 1, а также для измерения температуры T_d капли топлива 9. Генерация капель, характерный размер которых соответствует радиусу 0,75–1,5 мм, на спай термоэлектрического преобразователя 6, имеющего диаметр около 0,1 мм, выполнялась электронными дозаторами Finnpipette Novus двух моделей с разными рабочими диапазонами: с объемом 1–10 мкл, погрешностью 2,5 %, дискретностью установки 0,01 мкл и с объемом 10–100 мкл, погрешностью 1,5 %, дискретностью установки 0,1 мкл.

Процессы, протекающие в течение индукционного периода, регистрировались высокоскоростной монохромной видеокамерой 10 со скоростью съемки более 3000 кадров в секунду при полном разрешении 1280×800 пикселей. В результате анализа данных регистратора 7 и видеозаписей камеры 10 посредством компьютера 11 установлена характерная эволюция во времени температуры T_d при реализации последовательных стадий зажигания капель КЖТ и ВУТ. Специализированное программное обеспечение Tema Automotive [30, 31] с алгоритмом непрерывного слежения в области видеозаписи применялось для определения характерных размеров капель 9, их положения относительно спая термоэлектрического преобразователя 6, а также особенностей зажигания топливных композиций на основе водоугольных суспензий. Обработка изображений при определении радиуса (R_d) состояла в измерении не менее шести диаметров капли в различных сечениях и вычислении искомого значения R_d . Систематическая погрешность измерения R_d не превышала 5 %. Контроль процесса обволакивания спая термоэлектрического преобразователя 6 пленкой КЖТ или ВУТ с допусаемым отклонением по толщине пленки не более 10 % относительно среднего значения позволил обоснованно утверждать о совпадении центров капли 9 и спая термоэлектрического преобразователя 6. В первом приближении регистрируемые данные соответствуют температуре (T_d) в центре капли топливной композиции. Систематические погрешности измерения T_g и T_d для каналов, состоящих из термоэлектрических преобразователей 5 и 6 соответственно, а также регистратора 7, не превышали 0,3 и 0,2 %.

Покадровый анализ видеозаписей исследуемых процессов, выполненных со скоростью 1000 кадров в секунду, позволил установить моменты иницирования и прекращения горения, а также соответствующие им значения времен задержки зажигания (τ_d) и полного сгорания (τ_c) капель топливных композиций, отсчитываемые от момента ввода капли 9 в канал 1. Систематические погрешности измерения τ_d и τ_c составляли $0,5 \cdot 10^{-3}$ с. Идентификация событий осуществлялась программно с помощью автотриггера по изображению. Алгоритм слежения контролировал значения интенсивности (от 0 до 255) оттенков серого (от черного цвета до белого) в области видеозаписи. Горению образца соответствовал диапазон интенсивности 220–255. При обнаружении значения из этого диапазона регистрировался момент зажигания. После завершения процесса горения отслеживался момент снижения интенсивности до значения, соответствующего нижнему пределу диапазона горения. Анализ данных, полученных для τ_d и τ_c , и их сопоставление с соответствующими результатами эволюции во времени температуры капель позволили сформулировать критерии иницирования и прекращения горения в соответствии с теоретическими следствиями экспериментальных [32, 33] и численных [34–38] исследований. Зажиганию соответствует одновременное выполнение двух условий: температура капли должна превышать температуру источника нагрева ($T_d > T_g$) — потока разогретого воздуха; скорость изменения температуры капли (dT_d/dt) должна превышать 10 К/с. Окончание экзотермического процесса характеризуется снижением температуры твердого остатка до значения, соответствующего температуре источника нагрева $T_g \pm 0,05T_d^{\max}$, где T_d^{\max} — максимальная температура капли в процессе горения.

При идентичных начальных условиях, определяемых параметрами R_d , T_g , V_g , проводилось от 6 до 10 экспериментов. В случае уменьшения температуры воздуха от максимальных значений ($T_g = 870$ К) до предельных (минимальных, необходимых для зажигания КЖТ) число экспериментов в серии возрастало. Это обуславливалось увеличением разброса соответствующих экспериментальных данных. Для температуры T_d в серии экспериментов значения отличались от средних не более чем на 2,5 %. Для времен задержки зажигания и полного сгорания КЖТ отличия, характеризующие в основном случайные погрешности, не превышали 4 %.

Таблица 1

Результаты технического и элементного анализа образцов КЕКа и углей

№	Технический анализ				Элементный состав		
	W^a , %	A^d , %	V^{daf} , %	Q_{st}^r , МДж/кг	C, %	H, %	(O+N+S), %
1	–	26,46	23,08	24,83	79,79	4,49	15,72
2	14,11	4,12	47,63	22,91	73,25	6,52	20,23
3	10,09	8,52	40,19	24,82	77,46	6,25	16,29

1 — КЕК на основе каменного угля марки К, 2 — бурый уголь марки Б2, 3 — каменный уголь марки Д.

Результаты и обсуждение

Относительно невысокие значения параметров источника тепла ($T_g = 670\text{--}870\text{ K}$, $V_g = 1\text{--}4\text{ м/с}$) по сравнению с параметрами, характерными для топочных камер энергетических установок ($T_g > 1200\text{ K}$), позволили установить особенности изменения температуры капли топлива в условиях низкотемпературного [36–38] зажигания, т.е. при предельных условиях реализации процесса.

Экспериментальные исследования проводились для трех составов топлив с различными по основным свойствам [39–41] компонентами: КЖТ № 1 — 53 % КЕК обогатительной фабрики «Северная» Кемеровской области + 41,5 % вода + 5 % отработанное автомобильное моторное масло марки Total + 0,5 % пластификатор марки Неолас; КЖТ № 2 — 55 % бурый уголь марки Б2 Балахтинского месторождения Красноярского края + 39 % вода + 5 % отработанное автомобильное моторное масло марки Total + 1 % пластификатор марки Неолас; ВУТ — 50 % каменный уголь марки Д Листвянского месторождения Новосибирской области + 50 % вода. КЕК является отходом обогащения каменного угля марки К. В ходе технологического процесса угольная порода промывается водой с применением поверхностно-активных веществ. В дальнейшем происходит разделение угля по фракциям на грохотах. Вода, использованная для промывки породы, подается в специальные емкости, где происходит осаждение частиц угля. Водугольная суспензия откачивается и пропускается через ленточные пресс-фильтры для отжима воды. Влажный остаток, с содержанием в нем массовой долей сухого угля 56,5 %, представляет собой КЕК. Во всех составах топлив средний размер частиц угольной пыли составлял около 100 мкм. Приготовление композиционных топлив выполнялось в течение 10 минут с использованием гомогенизатора MPW-324 аналогично [42, 43]. В табл. 1 приведены результаты технического и элементного (в пересчете на сухое беззольное состояние) анализа КЕКа и углей. Характеристики отработанного автомобильного моторного масла и пластификатора представлены в табл. 2 и 3.

В результате проведенных экспериментальных исследований выявлены типичные стадии индукционного процесса для капель КЖТ и ВУТ (рис. 2): инертный прогрев приповерхностного слоя капли, испарение влаги и жидкого горючего компонента, характеризующиеся изменением структуры поверхности с «глянцевой» на «матовую» и уменьшением размера капли, термическое разложение органической части угля, выход летучих, формирование и зажигание парогазовой смеси, появление локальной зоны воспламенения углерода и перемещение фронта горения по поверхности и в глубь капли.

Таблица 2

Характеристики отработанного автомобильного моторного масла

Показатель	Значение
Плотность при 293 К, кг/м ³	871
Влажность, % масс	0,28
Зольность, % масс	0,78
Температура вспышки, К	405
Температура воспламенения, К	491
Теплота сгорания, МДж/кг	43,98

Таблица 3

Характеристики пластификатора

Показатель	Значение
Плотность при 293 К, кг/м ³	954
Внешний вид	Бесцветная жидкость
Содержание ПАВ, % масс	25
pH раствора	6,5

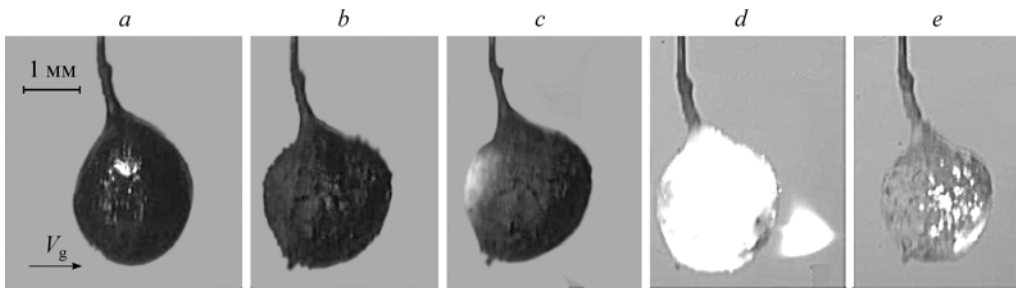


Рис. 2. Кадры видеogramмы реализации типичных стадий зажигания капли КЖТ № 1 при $V_g \approx 4$ м/с, $T_g \approx 870$ К, $R_d \approx 1$ мм.

a — инертный прогрев, *b* — испарение влаги и жидкого горючего компонента, термическое разложение органической части угля, выход летучих, *c* — формирование локальных зон зажигания, *d* — газофазное зажигание продуктов термического разложения и испарения, *e* — выгорание углерода; $\tau = 0,15$ (*a*), 5,68 (*b*), 7,79 (*c*), 15,23 (*d*), 25,94 (*e*).

Данные об изменении температуры капель (рис. 3–5) рассмотренных составов топлив позволили выделить несколько особенностей. В частности, приведенные на рис. 3–5 аппроксимационные кривые T_d иллюстрируют существенную долю времени инертного прогрева (до 30 %), интенсивных фазовых превращений и химического реагирования (до 70 %) в длительности переходного процесса, соответствующего τ_c . При относительно низких температурах источника нагрева ($T_g < 600$ К) изменение температуры капель КЖТ и ВУТ носит монотонный характер, что свидетельствует о минимальной роли эндотермических фазовых превращений и экзотермического химического реагирования. В этом случае происходит равномерный прогрев капли до температуры, соответствующей значению T_g (кривые 1–4 на рис. 3, кривые 1–3 на рис. 4 и 5). Увеличение температуры потока воздуха выше 600 К ведет к интенсификации процессов теплопереноса на границе «капля–окислитель», что, в свою очередь, влияет на скорости испарения жидких горючих и негорючих компонентов, а также термического разложения органической части угля. Зависимости $T'_d = f(\tau)$ становятся существенно немонотонными. При этом минимальные значения температур окислителя (при $V_g \approx 4$ м/с), необходимые для зажигания

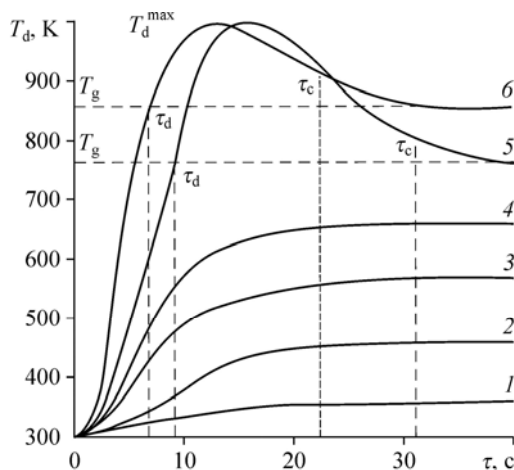


Рис. 3. Температура капли КЖТ № 1 с $R_d \approx 1$ мм в процессе взаимодействия с потоком воздуха при $V_g \approx 4$ м/с и разных $T_g = 370$ (1), 470 (2), 570 (3), 670 (4), 770 (5), 870 (6) К.

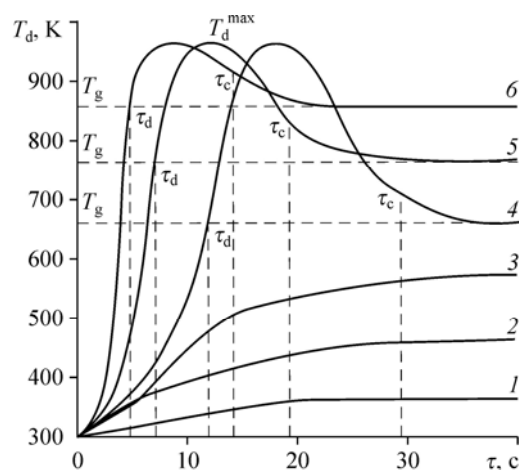


Рис. 4. Температура капли КЖТ № 2 с $R_d \approx 1$ мм в процессе взаимодействия с потоком воздуха при $V_g \approx 4$ м/с и разных $T_g = 370$ (1), 470 (2), 570 (3), 670 (4), 770 (5), 870 (6) К.

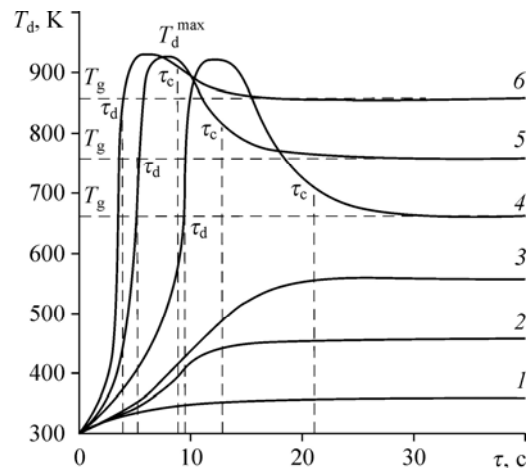
Рис. 5. Температура капли ВУТ с $R_d \approx 1$ мм в процессе взаимодействия с потоком воздуха при $V_g \approx 4$ м/с и $T_g = 370$ (1), 470 (2), 570 (3), 670 (4), 770 (5), 870 (6) К.

капель размерами $R_d \approx 1$ мм, составляют для КЖТ № 1 около 770 К, для КЖТ № 2 и ВУТ — 650–670 К. Изменение температуры источника влияет на уменьшение длительности стадии инертного прогрева и, соответственно, на время задержки зажигания. Например, при увеличении T_g с 770 до 870 К для КЖТ № 1 и с 670 до 870 К для КЖТ № 2 и ВУТ времена задержки зажигания изменяются на 30, 59 и 56 % соответственно. Проведенные оценки для основных компонентов топливных композиций показали, что характерные времена инертного прогрева частиц угля в несколько раз меньше аналогичного параметра для капель воды, сопоставимых по размерам, при идентичных условиях нагрева. Теплота парообразования воды более чем в десять раз превышает теплоту термического разложения угля. Как следствие, большая часть подводимой к капле водоугольной суспензии энергии затрачивается на фазовый переход.

Тренды $T_d = f(\tau)$ на рис. 3–5, соответствующие условиям зажигания водоугольных суспензий, иллюстрируют максимум тепловыделения в течение всего индукционного периода на стадии выгорания углерода (рис. 2). В условиях интенсивного экзотермического реагирования испарение жидких компонентов и термическое разложение органической части угля не ведут к заметному уменьшению скорости роста температуры T_d . Ее экстремум достигается в результате совместного протекания процессов выгорания углерода и летучих в окрестности капли. По окончании горения T_d принимает некоторое постоянное значение, соответствующее температуре источника T_g . При $\tau > \tau_c$ отсутствуют какие-либо физико-химические превращения, протекающие с выделением энергии.

Отличие экстремумов (T_d^{\max}) для зависимостей $T_d = f(\tau)$ на рис. 3–5 обусловлено как составом топливных композиций, так и значениями теплоты сгорания твердых и жидких компонентов (табл. 1, 2). При этом увеличение доли отработанного автомобильного моторного масла в КЖТ приводит к росту T_d (рис. 6) за счет большей эффективной теплоты сгорания капли топлива при прочих равных условиях. Также на рисунке видно, что ввод жидкого горючего компонента с меньшей температурой воспламенения (по сравнению с углем) и теплотой фазового перехода (по сравнению с водой) влияет на изменение положения экстремума T_d во времени. Увеличение концентрации жидкого нефтепродукта в составе КЖТ характеризуется наличием стадии пламенного горения (рис. 2) продуктов испарения и термического разложения угля. Тепловыделение в малой окрестности капли ведет к более интенсивному прогреву ее приповерхностного слоя и, следовательно, к уменьшению времени задержки зажигания.

Важным следствием для практического приложения результатов изучения процессов горения ВУТ и КЖТ является хорошая корреляция зависимостей $T_d = f(\tau)$ (рис. 3–6) с графиками изменения температуры в окрестности частицы угля [39–41, 44] при реализации режимов газофазного и гетерогенного горения. Отсутствие кратковременных колебаний температуры, обусловленных наличием всплеск, в пределах переходного процесса — индукционного периода — позволяет сделать вывод о возможности применения составов на основе водоугольных суспензий в промышленной энергетике.



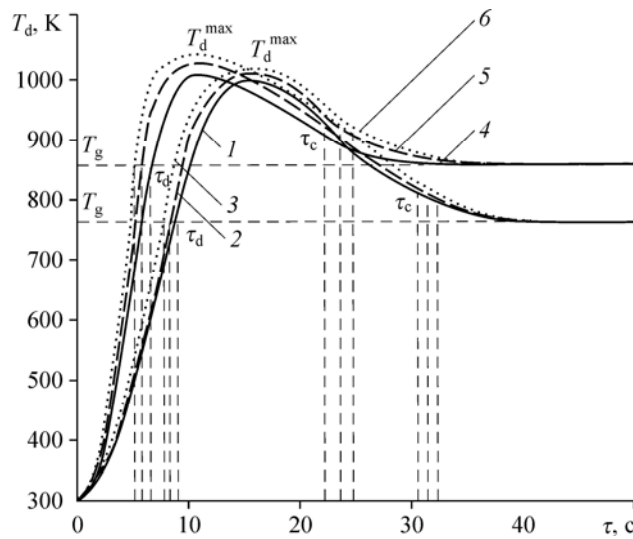


Рис. 6. Температура капли КЖТ № 1 с $R_d \approx 1$ мм с разной массовой долей отработанного автомобильного моторного масла в процессе взаимодействия с потоком воздуха при $V_g \approx 4$ м/с и $T_g \approx 770$ и 870 К.
 $T_g \approx 770$ К: 5 (1), 10 (2), 15 (3) %, $T_g \approx 870$ К: 5 (4), 10 (5), 15 (6) %.

Анализ результатов, представленных в табл. 4, позволил установить, что необходимые для зажигания КЖТ температуры окислителя имеют меньшие значения для более крупных образцов. Предельные (минимальные) температуры T_g на 80–110 К ниже для капель размерами $R_d \approx 1,5$ мм по сравнению со случаем $R_d \approx 0,75$ мм. Этот эффект, скорее всего, обусловлен взаимосвязанным влиянием концентрации компонентов газовой смеси (продуктов испарения и термического разложения) и ее температуры на скорость реакции окисления. С увеличением R_d возрастает площадь поверхности капли, с которой происходит испарение масла и выход летучих. Это ведет к повышению концентрации горючей газовой смеси в окрестности капли КЖТ. Согласно [45] скорость реакции окисления W_0 зависит от произведения концентраций окислителя (C_o) и горючего (C_f) и от температурного фактора аррениусовского вида $W_0 = C_o C_f k_0 \exp[-E/(R_f T_g)]$. Увеличение массовой доли C_f при условии $W_0 = \text{const}$ обуславливает уменьшение температуры, необходимой для иницирования процесса горения. В свою очередь, для капель меньших размеров характерны относительно малые времена индукционного периода. Однако относительно невысокая концентрация горючих газов в окрестности малых капель не всегда способствует развитию необратимого экзотермического процесса. В большинстве экспериментов для составов КЖТ и ВУТ при условиях $R_d \leq 0,5$ мм и $T_g \leq 650$ К происходило формирование локальных очагов зажигания с последующим быстрым их исчезновением без иницирования горения. Как следствие, эволюция во времени T_d малых капель протекает быстрее по сравнению с крупными каплями ($R_d > 0,5$ мм) при идентичных условиях теплообмена за счет меньшей длительности стадии инертного прогрева КЖТ, а также меньших на 150–200 К значений T_d^{max} .

Таблица 4

Минимальные температуры воздуха, необходимые для зажигания различных составов топливных композиций

Состав			R_d , мм
КЖТ №1	КЖТ №2	ВУТ	
$T_{\text{min}} \approx 810$ К	$T_{\text{min}} \approx 710$ К	$T_{\text{min}} \approx 680$ К	0,75 мм
$T_{\text{min}} \approx 770$ К	$T_{\text{min}} \approx 670$ К	$T_{\text{min}} \approx 650$ К	1 мм
$T_{\text{min}} \approx 710$ К	$T_{\text{min}} \approx 620$ К	$T_{\text{min}} \approx 610$ К	1,5 мм

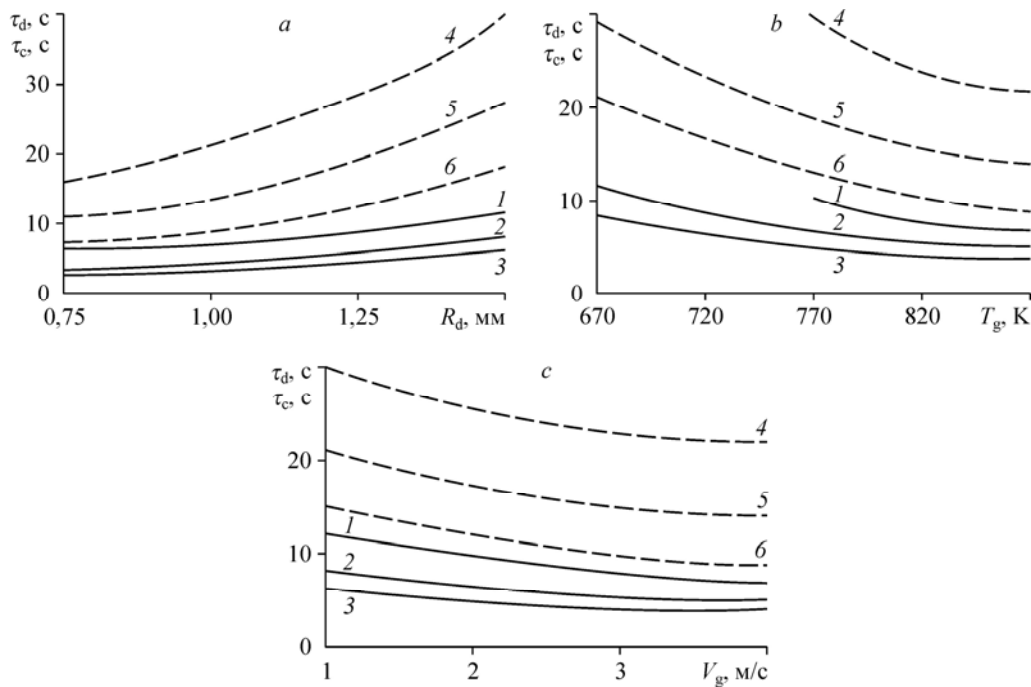


Рис. 7. Времена задержки зажигания (1 — КЖТ № 1, 2 — КЖТ № 2, 3 — ВУТ) и полного сгорания (4 — КЖТ № 1, 5 — КЖТ № 2, 6 — ВУТ) в зависимости от размера капли при $V_g \approx 4$ м/с и $T_g \approx 870$ К (а), температуры воздуха при $V_g \approx 4$ м/с, $R_d \approx 1$ мм (b), скорости воздуха при $T_g \approx 870$ К, $R_d \approx 1$ мм (c).

На рис. 7 приведены значения времен задержки зажигания и полного сгорания капель рассматриваемых топливных композиций в зависимости от трех основных параметров — T_g , V_g и R_d , характеризующих условия теплообмена с потоком окислителя. В соответствии с основными положениями общей теории горения [44–46] наибольшее влияние на времена τ_d и τ_c из варьируемых в проведенных экспериментах параметров оказывает температура источника нагрева T_g (рис. 7b). При этом установлено, что с ростом T_g влияние V_g и R_d на характеристики зажигания ослабевает. Это можно объяснить увеличением вклада радиационного теплопереноса на границе «капля–греющий газовый поток» по сравнению с кондуктивным и конвективным теплопереносами при $T_g \rightarrow 1000$ К. Масштаб влияния обнаруженного эффекта в полной мере не определен до настоящего времени для КЖТ и ВУТ, что обусловлено малыми размерами капель, небольшой длительностью процессов прогрева и зажигания, а также отсутствием методик измерения тепловых потоков и температуры поверхности капель. Теоретически и экспериментально было показано [47–49], что капли воды, эмульсий и суспензий в результате фазового перехода окружены слоем паров. В случае ВУТ этот промежуточный слой (между каплей и воздухом) заполняется продуктами испарения воды и термического разложения органической части угля [16–19]. При нагревании КЖТ у поверхности капли формируется смесь продуктов испарения горючей жидкости и воды, термического разложения угля, окислителя. В таком случае в соответствии с основными положениями современной теории тепломассопереноса в газочапельных системах (в частности, представленных в работах [50–52]) реализуется конвективный и кондуктивный теплообмен между разогретым воздухом — источником тепла — и относительно «холодной» газовой смесью в окрестности капли. В свою очередь, прогрев приповерхностного слоя последней происходит за счет конвекции, теплопроводности и излучения газовой смеси. Так как характерные размеры этого слоя не могут быть достаточно большими для одиночной капли,

то в первом приближении выделенные условия можно отнести к границе «капля топлива–греющий газовый поток». Соответствующие оценки радиационной (q_r), конвективной (q_c) и кондуктивной (q_k) составляющих теплового потока к поверхности капли можно описать выражениями: $q_r = \varepsilon\sigma(T_g^4 - T_s^4)$, $q_c = \alpha(T_g - T_s)$, $q_k = \lambda(T_g - T_s)/R_d$ [50–52]. Для условий изучаемых процессов можно в первом приближении принять $\alpha = 15$ Вт/(м²·К), $T_s = 370$ К, $\lambda = 0,03$ Вт/(м·К), $\varepsilon = 0,45$ (эффективное значение для смеси продуктов термического разложения угля, испарения жидких горючих и негорючих компонентов КЖТ при высоких температурах [53, 54]), $R_d = 1$ мм, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴). При температуре окислителя $T_g \approx 1000$ К лучистый поток q_r превышает кондуктивный и конвективный потоки. При несколько меньших температурах (от 800 до 1000 К) значения q_r ниже значений q_k , однако влияние q_r на условия теплопереноса также достаточно существенно. Поэтому изменение скорости воздуха от 1 до 4 м/с приводит к умеренному снижению времен τ_d (рис. 7с). Отличие значений τ_d для капель размерами от 0,75 до 1,5 мм достигает 35–45 % (рис. 7а). Можно сделать заключение о доминировании радиационного теплопереноса над конвективным при зажигании образцов топливных композиций в условиях нагрева (при $T_g \rightarrow 1000$ К).

Установленные экспериментальные кривые $T_d = f(\tau)$ хорошо коррелируют не только с теоретическими заключениями [36–38], но и с результатами экспериментов [11]. Соответствие зависимостей изменения температуры капель при зажигании ВУТ [11] и КЖТ (рис. 3–6) позволяет развивать положения [11] в направлении описания низкотемпературного зажигания суспензионных топливных композиций на основе угля. Также полученные экспериментальные данные являются основой для расширения современных теоретических представлений о процессах инициирования горения КЖТ (см., например, [22–26]). В частности, выделенные особенности изменения T_d при разной интенсивности нагрева, размерах и компонентном составе капель позволяют уточнять известные физические и математические модели для оптимизации процессов зажигания.

Выводы

1. Для композиционных жидких и водоугольного топлив зарегистрирована характерная эволюция во времени температуры капли при взаимодействии с потоком разогретого воздуха. Добавление в состав водоугольной суспензии отработанного автомобильного моторного масла, а также увеличение его массовой доли (до 15 %) влияет на рост максимальной температуры в окрестности капли в течение индукционного периода на 5–7 % за счет дополнительного вклада теплового эффекта окисления продуктов испарения горючей жидкости.

2. При варьировании параметров $R_d = 0,75$ –1,5 мм, $T_g = 670$ –870 К, $V_g = 1$ –4 м/с изменение основной интегральной характеристики процесса — времени задержки зажигания капель КЖТ и ВУТ — составляет от 30 до 60 %. Интенсификация теплообмена на границе «капля–окислитель» за счет увеличения температуры и скорости потока воздуха ведет к уменьшению времени задержки зажигания, а увеличение размера капли приводит к противоположному эффекту. В свою очередь, необходимые температуры окислителя для зажигания капель КЖТ имеют меньшие на 80–110 К значения для более крупных образцов.

3. Отсутствие кратковременных колебаний температуры (за счет вспышек) в течение переходного процесса — индукционного периода — позволяет сделать заключение о возможности разработки технологии для применения составов на основе водоугольных суспензий в промышленной энергетике.

Список обозначений

C_0 — концентрация окислителя,
 C_f — концентрация горючего,
 E — энергия активации, Дж/кг,

T_d — температура в центре капли, К,
 T_g — температура воздуха, К,
 T_s — температура поверхности капли, К,

k_0 — предэкспонент, 1/с,	V_g — скорость воздуха, м/с,
q_c — плотность конвективного теплового потока, Вт/м ² ,	W_0 — скорость реакции окисления, 1/с,
q_k — плотность кондуктивного теплового потока, Вт/м ² ,	α — коэффициент теплоотдачи, Вт/(м ² ·К),
q_r — плотность радиационного теплового потока, Вт/м ² ,	ε — степень черноты,
R_d — радиус капли, м,	λ — коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К),
R_t — универсальная газовая постоянная, Дж/(кг·К),	σ — постоянная Стефана–Больцмана, Вт/(м ² ·К ⁴),
	τ — время, с,
	τ_c — время полного сгорания, с,
	τ_d — время задержки зажигания, с.

Список литературы

1. Баранова М.П., Кузнецов Б.Н. Влияние влажности бурого угля на свойства высококонцентрированных водоугольных суспензий // Химия твердого топлива. 2003. № 6. С. 20–26.
2. Ходаков Г.С., Горлов Е.Г., Головин Г.С. Производство и трубопроводное транспортирование суспензионного водоугольного топлива // Химия твердого топлива. 2006. № 4. С. 22–39.
3. Борзов А.И., Баранова М.П. Приготовление водоугольных суспензий из бурых углей с использованием различных мельничных устройств // Химия твердого топлива. 2006. № 4. С. 40–45.
4. Ходаков Г.С. Водоугольные суспензии в энергетике // Теплоэнергетика. 2007. № 1. С. 35–45.
5. Трубецкой К.Н., Зайденварг В.Е., Кондратьев А.С. Водоугольное топливо — результаты разработки и перспективы применения в России // Теплоэнергетика. 2008. № 5. С. 49–52.
6. Горлов Е.Г., Серегин А.И., Ходаков Г.С. Вибрационные мельницы в технологии производства суспензионного топлива из необогащенных угольных шламов // Химия твердого топлива. 2008. № 4. С. 19–23.
7. Саломатов В.В. Состояние и перспективы угольной и ядерной энергетик России (обзор) // Теплофизика и аэромеханика. 2009. Т. 16, № 4. С. 531–544.
8. Котлер В.Р., Сосин Д.В. Решение экологических проблем при переводе котлов с мазута на водно-битумную смесь // Теплоэнергетика. 2009. № 3. С. 75–77.
9. Пат. РФ, МПК⁵¹ F23C3/00, F23J1/02. Устройство для сжигания водоугольного топлива (варианты) / Алексеев С.В., Мальцев Л.И., Кравченко И.В., Кравченко А.И., Карташова Л.В.; заявитель и патентообладатель ООО «Протэ-К» № 2518754; заявл. 29.08.2012; опубл. 10.06.2014.
10. Свищев Д.А., Кейко А.В. Термодинамический анализ режимов газификации водоугольного топлива в потоке // Теплоэнергетика. 2010. № 6. С. 33–36.
11. Kijo-Kleczkowska A. Combustion of coal-water suspensions // Fuel. 2011. Vol. 90, No. 2. P. 865–877.
12. Мингалеева Г.Р., Ермолаев Д.В., Афанасьева О.В., Тимофеева С.С. Экспериментальное исследование вязкости водоугольной суспензии с бифракционным составом дисперсной фазы // Теплоэнергетика. 2012. № 6. С. 28–30.
13. Редькина Н.И., Ходаков Г.С., Горлов Е.Г. Суспензионное угольное топливо для двигателей внутреннего сгорания // Химия твердого топлива. 2013. № 5. С. 54–61.
14. Бородуля В.А., Бучилко Э.К., Виноградов Л.М. Некоторые особенности сжигания в кипящем слое водоугольного топлива из белорусских бурых углей // Теплоэнергетика. 2014. № 7. С. 36–41.
15. Burdukov A.P., Popov V.I., Chernetskiy M.Yu., Dekterev A.A., Hanjalic K. Mechanical activation of micronized coal: prospects for new combustion applications // Applied Thermal Engineering. 2014. Vol. 74. P. 174–181.
16. Belošević S., Tomanović I., Beljanski V., Tucaković D., Živanović T. Numerical prediction of processes for clean and efficient combustion of pulverized coal in power plants // Applied Thermal Engineering. 2014. Vol. 74. P. 102–110.
17. Саломатов В.В., Кравченко И.В. Теоретическое исследование горения капли водоугольного топлива. Ч. II. Стадия воспламенения // Горение и плазмохимия. 2007. Т. 5, № 3. С. 189–198.
18. Делягин В.Н., Иванов Н.М., Батищев В.Я., Бочаров В.И., Щеглов И.П., Мурко В.И., Федяев В.И., Карпенко В.И. Использование водоугольного топлива в тепловых процессах АПК // Ползуновский вестник. 2011. № 2/1. С. 239–242.
19. Саломатов В.В., Сыродой С.В. Зажигание водоугольной частицы лучисто-конвективным теплом // Горение и плазмохимия. 2011. Т. 9, № 1. С. 29–34.
20. Phuoc T.X., Wang P., McIntyre D., Shadle L. Synthesis and characterization of a thixotropic coal-water slurry for use as a liquid fuel // Fuel Processing Technology. 2014. Vol. 127. P. 105–110.
21. Tavangar S., Hashemabadi S.H., Saberimoghdam A. CFD simulation for secondary breakup of coal-water slurry drops using OpenFOAM // Fuel Processing Technology. 2015. Vol. 132. P. 153–163.
22. Горлов Е.Г. Композиционные водосодержащие топлива из углей и нефтепродуктов // Химия твердого топлива. 2004. № 6. С. 50–61.
23. Патраков Ю.Ф., Федорова Н.И., Ефремов А.И. Композиционное водосодержащее топливо из низкосортных углей Кузбасса // Вестник Кузбасского ГТУ. 2006. № 3. С. 81–83.
24. Горлов Е.Г., Серегин А.И., Ходаков Г.С. Условия реализации шламов угледобывающих и углеперерабатывающих предприятий в виде суспензионного топлива // Химия твердого топлива. 2007. № 6. С. 51–57.

25. Цепенко А.И., Овчинников Ю.В., Стрижко Ю.В., Луценко С.В. Исследование процессов горения искусственного композитного жидкого топлива в циклонном предтопке // Энергетик. 2011. № 7. С. 45–47.
26. Овчинников Ю.В., Цепенко А.И., Шихотинов А.В., Татарникова Е.В. Исследование воспламенения твердых топлив и ИКЖТ // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. 2011. № 1. С. 117–126.
27. Volkov R.S., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Water droplet deformation in gas stream: Impact of temperature difference between liquid and gas // Intern. J. of Heat and Mass Transfer. 2015. Vol. 85. P. 1–11.
28. Volkov R.S., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Experimental investigation of mixtures and foreign inclusions in water droplets influence on integral characteristics of their evaporation during motion through high-temperature gas area // Intern. J. of Thermal Sci. 2015. Vol. 88. P. 193–200.
29. Ануфриев И.С., Кузнецов Г.В., Пискунов М.В., Стрижак П.А., Чернецкий М.Ю. Условия взрывного парообразования на границе раздела сред в неоднородной капле // Письма в Журн. техн. физики. 2015. Т. 41, вып. 16. С. 98–104.
30. Janiszewski J. Measurement procedure of ring motion with the use of high speed camera during electromagnetic expansion // Metrology and Measurement Systems. 2012. Vol. 19, No. 4. P. 797–804.
31. Janiszewski J. Ductility of selected metals under electromagnetic ring test loading conditions // Intern. J. of Solids and Structures. 2012. Vol. 49, No. 7/8. P. 1001–1008.
32. Захаревич А.В., Кузнецов В.Т., Кузнецов Г.В., Максимов В.И. Зажигание модельных смесевых топливных композиций одиночной, нагретой до высоких температур частицей // Физика горения и взрыва. 2008. Т. 44, № 5. С. 54–57.
33. Кузнецов Г.В., Захаревич А.В., Максимов В.И. Зажигание дизельного топлива одиночной «горячей» металлической частицей // Пожаровзрывобезопасность. 2008. Т. 17, № 4. С. 28–30.
34. Глушков Д.О., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Численное исследование процесса зажигания металлизированного конденсированного вещества внедренным в приповерхностный слой источником // Химическая физика. 2013. Т. 32, № 5. С. 55–61.
35. Glushkov D.O., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Numerical and experimental research of heat and mass transfer at the heterogeneous system ignition by local energy source with limited heat content // Mathematical Problems in Engng. 2014. Vol. 2014. Article number 281527. P. 1–9.
36. Глушков Д.О., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. «Низкотемпературное» зажигание частицы угля в потоке воздуха // Химическая физика. 2015. Т. 34, № 3. С. 48–56.
37. Глушков Д.О., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Математическое моделирование воспламенения частиц угля в потоке воздуха // Химия твердого топлива. 2015. № 2. С. 17–23.
38. Glushkov D.O., Strizhak P.A., Vysokomornaya O.V. Numerical research of heat and mass transfer during low-temperature ignition of a coal particle // Thermal Sci. 2015. Vol. 19, No. 1. P. 285–294.
39. Саломатов В.В. Природоохранные технологии на тепловых и атомных электростанциях. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006. 853 с.
40. Шейндлин А.Е. Проблема новой энергетики. М.: Наука, 2006. 406 с.
41. Hanjalic K., Krol R., Lekic A. Sustainable energy technologies: options and prospects. Springer, 2008. 336 p.
42. Chebochakova D.A., Glushkov D.O., Lyakhovskaya O.E., Sukhanov S.V. Ignition of coal dust from the Tomsk region Talovsky deposit by air flow // Matec Web of Conference. 2015. Vol. 23, No. 01045. P. 1–4.
43. Glushkov D.O., Strizhak P.A., Vershinina K.Yu. Hot surface ignition of a composite fuel droplet // Matec Web of Conference. 2015. Vol. 23, No. 01063. P. 1–4.
44. Катальмов А.В., Кобяков А.И. Переработка твердого топлива. Калуга: Изд-во Н. Бочкаревой, 2003. 248 с.
45. Франк-Каменецкий Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. М.: Наука, 1987. 502 с.
46. Гусаченко Л.К., Зарко В.Е., Зырянов В.Я., Бобрышев В.П. Моделирование процессов горения твердых топлив. Новосибирск: Наука, 1985. 182 с.
47. Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Численное исследование влияния конвекции в смеси продуктов сгорания на интегральные характеристики испарения движущейся капли тонкораспыленной воды // Инж.-физ. журнал. 2014. Т. 87, № 1. С. 98–107.
48. Volkov R.S., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. The influence of initial sizes and velocities of water droplets on transfer characteristics at high-temperature gas flow // Intern. J. of Heat and Mass Transfer. 2014. Vol. 79. P. 838–845.
49. Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Влияние объемной концентрации совокупности капель воды при их движении через высокотемпературные газы на температуру в следе // Прикладная механика и техническая физика. 2015. Т. 56, № 4. С. 23–35.
50. Терехов В.И., Пахомов М.А. Тепломассоперенос и гидродинамика в газокпельных потоках. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009. 284 с.
51. Михатулин Д.С., Полежаев Ю.В., Ревизников Д.Л. Тепломассообмен, термическое и термоэрозийное разрушение тепловой защиты. М.: Янус-К, 2011. 520 с.
52. Ягов В.В. Теплообмен в однофазных средах при фазовых превращениях. М.: МЭИ, 2014. 542 с.
53. Юренев В.Н., Лебедев П.Д. Теплотехнический справочник: в 2 т. М.: Энергия, 1976. Т. 2. 896 с.
54. Тепловой расчет котлов: нормативный метод. 3-е изд., перераб. и доп. СПб.: НПО ЦКТИ, 1998. 256 с.

*Статья поступила в редакцию 3 сентября 2015 г.,
после переработки — 12 ноября 2015 г.*