

УДК 536.46

ИНИЦИИРОВАНИЕ ГОРЕНИЯ ПОКРЫТЫХ ВОДЯНОЙ ПЛЕНКОЙ ЧАСТИЦ УГЛЯ В ПОТОКЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ВОЗДУХА

А. В. Захаревич¹, Г. В. Кузнецов¹, В. В. Саломатов², П. А. Стрижак¹,
С. В. Сыродой¹

¹Томский политехнический университет, 6340050 Томск, ssyrodoy@yandex.ru

²Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090 Новосибирск

Представлены результаты экспериментального исследования процесса зажигания частиц водоугольного топлива, полученного на основе каменного угля марки Д или фильтрационного кека обогатительной фабрики «Северная», в потоке высокотемпературного воздуха. По результатам экспериментов сформулированы физическая и математическая модели процессов термической подготовки и воспламенения частиц водоугольного топлива, учитывающие совместное протекание в индукционный период наиболее значимых (оказывающих существенное влияние на условие зажигания) физико-химических превращений и процессов тепло- и массопереноса. Сравнение основных характеристик зажигания (времени задержки и предельных значений температуры газовой среды), полученных экспериментально и теоретически (по результатам численного моделирования), позволило сделать заключение о влиянии пленки воды на динамику процесса воспламенения.

Ключевые слова: водоугольное топливо, зажигание, тепло- и массоперенос, термическое разложение, испарение, водяная пленка, время задержки зажигания, время испарения.

DOI 10.15372/FGV20160506

ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на попытки широкомасштабного внедрения новых, нетрадиционных возобновляемых источников энергии [1] (например, ветрогенераторов и солнечных фотоэлектрических преобразователей), уголь (по оценкам [2, 3]) еще долгое время будет оставаться основным топливно-энергетическим ресурсом. Однако задача экологически чистого сжигания такого «грязного» топлива до сих пор не решена [4]. Традиционные способы организации горения (например, факельное [5] или слоевое [6]) не обеспечивают соответствующего современным стандартам показателя эмиссии оксидов азота и серы [7]. Разработанные технологии сжигания углей (с применением низкотемпературной плазмы [8], микроволновой энергии [9], циркулирующего кипящего слоя [10]) позволяют снизить экологическую нагрузку тепловых электрических станций и повысить эффективность сжигания угля. Но их внедрение

сдерживается сложностью и высокой стоимостью основного оборудования. По этой причине одним из наиболее перспективных технологических решений является создание новых эколого-эффективных топливных композиций, например водоугольного топлива (ВУТ). Широкомасштабное применение последнего в общем балансе тепло- и электрогенерации тормозится слабой проработанностью основных аспектов теории воспламенения и горения такого сложного (существенно неоднородного по структуре и физическому состоянию компонентов) топлива [11, 12].

Разработанные к настоящему времени модели воспламенения ВУТ [13–16] не учитывают возможность формирования частиц топлива, поверхность которых покрыта водяной пленкой. Так, например, в [13] экспериментально исследовано воспламенение частиц ВУТ, представляющих собой желеобразную смесь мелкодиспергированного угля и воды без водяной пленки, и разработана соответствующая математическая модель зажигания ВУТ при допущении однородности температурного поля частицы. В действительности же, конечно, влага

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

© Захаревич А. В., Кузнецов Г. В., Саломатов В. В., Стрижак П. А., Сыродой С. В., 2016.

не может удаляться из частицы ВУТ мгновенно.

Более полная модель, описывающая физико-химические процессы и тепло- и массоперенос при воспламенении частиц ВУТ, приведена в [14]. Однако она сформулирована в предположении дискретности во времени основных этапов термической подготовки: инертный прогрев частицы (без пленки), «обезвоживание» слоя пористого топлива (в условиях равновесного состояния на границе фронта испарения), термическое разложение органической части топлива, воспламенение и горение кокса. Также в [14] не учитывалась возможность формирования частиц ВУТ, поверхность которых покрыта тонким слоем воды. Такое допущение существенно упрощает моделирование и позволяет свести решение задачи воспламенения к ряду отдельных (по постановкам), взаимосвязанных во времени задач. Но модель [14] не учитывает совместное протекание всех основных процессов термической подготовки в период индукции. Поэтому вычисление времени задержки воспламенения приводило к завышению его значений по сравнению с экспериментальными данными.

Постановка задачи [15, 16] учитывает совместное протекание процессов тепло- и массопереноса в условиях интенсивного нагрева, но не описывает влияние пленки воды на условия и характеристики воспламенения ВУТ. В то же время экспериментально было установлено [17], что вероятность образования частиц угля, покрытых водяной пленкой, высока ($\geq 50\%$), вследствие особенностей подготовки и распыления топлива. Соответственно, высока вероятность формирования как обводненных, так и частично обезвоженных частиц ВУТ и генерирования неоднородного (по температуре) факела с относительно холодными (вследствие интенсивного испарения влаги) и высокотемпературными (с более быстрым воспламенением) зонами. В результате возможно нарушение температурного режима горения ВУТ и в отдельных случаях срыв пламени горелки [18]. Поэтому представляет интерес анализ влияния пленки воды на характеристики и условия воспламенения водоугольных частиц.

Изучение в реальных условиях процесса зажигания частиц ВУТ, покрытых слоем воды, весьма затруднительно, вследствие проблем, связанных с размещением в высокотемпературных средах (топочное устройство ко-

тельного агрегата) средств высокоскоростной видеорегистрации с высоким разрешением. По этой причине в настоящее время нет публикаций о влиянии пленки воды, формирующейся на поверхности частиц ВУТ, на условия и характеристики зажигания последних. Поэтому экспериментальное исследование и последующее теоретическое описание процессов тепло- и массопереноса, протекающих при термической подготовке и зажигании частиц водоугольного топлива, покрытых водяной пленкой, представляет актуальную задачу.

Цель работы — установление зависимости времени задержки зажигания частиц двух разных по компонентному составу водоугольных топлив, покрытых пленкой воды, от температуры окружающей среды с учетом комплекса физико-химических превращений и процессов тепло- и массопереноса, протекающих в период, предшествующий зажиганию частиц ВУТ, покрытых тонким слоем воды.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Использовался стенд (рис. 1), аналогичный по основным средствам регистрации описанному в [19]. Поток разогретого в теплогенераторе до высокой температуры ($600 < T_e < 900$ К) воздуха подавался в полый, выполненный из кварцевого стекла цилиндр. Температура газа T_e контролировалась двумя хромель-алюмелевыми термопарами (систематическая погрешность ± 3 К, инерционность не более 10 с). Частица, подвешенная на термопаре, помещалась на оси симметрии цилиндра дистанционно управляемым координатным устройством. Видеорегистрация процессов нагрева, сушки, воспламенения и горения частиц ВУТ проводилась высокоскоростной видеокамерой Phantom Miro M310.

Исследовались два состава топлива с существенно отличающимися свойствами (теплофизическими, термохимическими): на основе каменного угля марки Д (Кузнецкого угольного бассейна) и на основе фильтрационного кека (ОФ «Северная»). Систематическая погрешность определения основных измеряемых параметров (T_e, t_{ign}) не превышала 5%. Доверительный интервал определения времени задержки воспламенения t_{ign} при доверительной вероятности 0.95 не превышал 17%.

Водоугольное топливо на основе угля марки Д готовилось по следующей схеме. Вначале

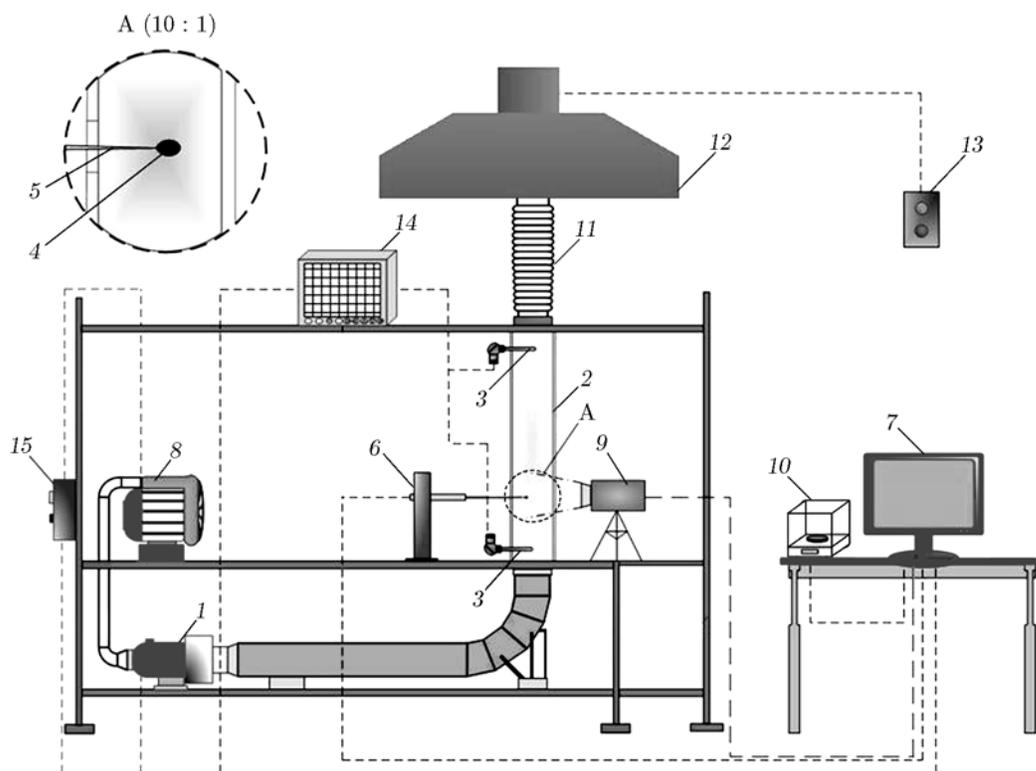


Рис. 1. Схема экспериментального стенда:

1 — теплогенератор, 2 — полый прозрачный кварцевый цилиндр, 3 — термоэлектрический преобразователь, 4 — частица ВУТ, 5 — игольчатая термопара, 6 — координатное устройство, 7 — персональный компьютер, 8 — нагнетатель, 9 — высокоскоростная видеокамера, 10 — аналитические весы, 11 — гибкий отводящий газопровод, 12 — короб вытяжной вентиляции, 13 — пульт управления вытяжной вентиляцией, 14 — регистратор многоканальный, 15 — пульт управления нагнетательно-нагревательной системой

Характеристики исследовавшихся топлив

Топливо	W_t^r , %	A^d , %	V^{daf} , %	ρ , кг/м ³	Элементный состав		
					C^{daf} , %	H^{daf} , %	$S_t^d + N^{daf} + O^{daf}$, %
ВУТ на основе угля Д	60	12.1	40.2	614	77.9	5.3	15.8
ВУТ на основе фильтр-кека (ОФ «Северная»)	58	26.46	23.08	685	79.79	4.49	15.72

Примечание. W_t^r — содержание влаги в рабочей массе угля, A^d — содержание золы в сухой массе угля, V^{daf} , C^{daf} , H^{daf} , N^{daf} , O^{daf} — содержание соответственно летучих, углерода, водорода, азота, кислорода в сухой беззолной массе угля, S_t^d — содержание серы в сухой массе угля, ρ — плотность угля.

уголь измельчался до заданного фракционного состава (характерного размера $\delta \approx 0.4 \cdot 10^{-3}$ м) в шаробарабанных мельницах в присутствии воды (так называемый мокрый помол). В дальнейшем приготовленная суспензия поступала в смеситель для гомогенизации и введения пластификатора на основе целлюлозы. После смесителя ВУТ проходило обработку в кавитаторе. Массовое соотношение долей в системе

уголь — вода составляло 60 : 40 %.

Подготовка ВУТ на основе фильтрационного кека проходила следующим образом: фильтр-кек (при соотношении 58 % отходов угледобычи и 42 % воды) подвергался гомогенизации, затем в суспензию вводился пластификатор типа «Неолас». Основные характеристики топливных композиций приведены в таблице.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

На рис. 2 приведены кадры типичной видеогаммы процессов нагрева и зажигания частиц ВУТ (диаметром $d \approx 3.0 \cdot 10^{-3}$ м, скорость набегающего потока $v_e = 3.8$ м/с, $T_e = 873$ К) на основе угля марки Д. Анализ видеокadres показывает, что процессы термической подготовки, воспламенения и горения ВУТ можно условно разделить на ряд последовательных взаимосвязанных стадий (инертный прогрев, испарение водяной пленки, обезвоживание основного слоя топлива, термическое разложение органической части, зажигание и горение).

Анализ кадров видеогаммы показал, что испарение пленки воды продолжается достаточно долго в период времени, предшествующий непосредственно зажиганию. Общая длительность процессов инертного прогрева и горения топлива до полного выгорания составляла $t_c \approx 27$ с при характерном размере капли (частицы) $d \approx 3 \cdot 10^{-3}$ м.

В начальный момент времени (рис. 2, а) частица представляла собой плотную водоугольную композицию, покрытую слоем воды, от поверхности которой хорошо отражается пада-

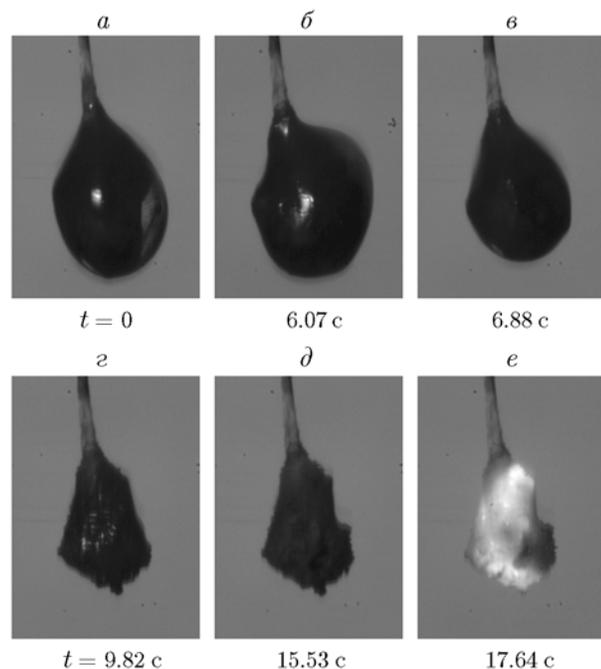


Рис. 2. Кадры типичной видеогаммы процессов термической подготовки и воспламенения покрытой водяной пленкой частицы топлива на основе угля марки Д

ющий свет. Инертный нагрев такой частицы сопровождался изменением цвета поверхности, она становилась блестяще-черной. Дальнейшее тепловое воздействие приводило к интенсивному испарению воды с поверхности пленки (размер частицы уменьшался). Кадры б, в на рис. 2 показывают, что форма частицы в процессе нагрева (в период времени $0.22t_c < t < 0.26t_c$) претерпевает существенные изменения в результате оттока водяных паров (рис. 2, в). После завершения испарения поверхностной пленки формируется высокообводненный водоугольный агломерат булавообразной формы. Нагрев такой частицы приводил к обезвоживанию пористого угольного остатка (рис. 2, г) и инициировал термическое разложение органической части топлива (рис. 2, д), сопровождающееся выходом летучих (поверхность частицы становилась светлее). Вблизи поверхности частицы формировалась газовая смесь, воспламеняющаяся (рис. 2, е) при достижении критических значений температуры и концентрации (в экспериментах зафиксировано появление пламени на поверхности).

На рис. 3 приведены кадры типичной видеогаммы процесса воспламенения частицы ВУТ ($d \approx 3 \cdot 10^{-3}$ м), приготовленной на основе отходов углеобогащения (фильтр-кек). Частица такого топлива (полностью сгорающая через $t_c \approx 79.4$ с) в начальный момент времени представляет собой шламоводяной агломерат, покрытый пленкой воды (поверхность хорошо отражает падающий свет). Нагрев инициирует испарение с поверхности водяного слоя (частица уменьшается в размерах). По истечении времени около $0.2t_c$ пленка воды полностью испаряется. В результате цвет поверхности становится матово-черным. Дальнейшее тепловое воздействие приводит к обезвоживанию ВУТ. При $t > 0.3t_c$ начинается термическое разложение органической части топлива. Поверхность в передней полусфере частицы (место наиболее интенсивного нагрева) становится более светлой. Анализ (при большом увеличении изображения) кадра в показывает, что видимую поверхность частицы можно условно разделить на две части: термическое разложение (светлая зона топлива) и испарение (темная сторона). По истечении времени $0.6t_c$ происходит воспламенение, на видеокadre видно пламя в нижней полусфере частицы. После сгорания последней остается негорючий остаток.

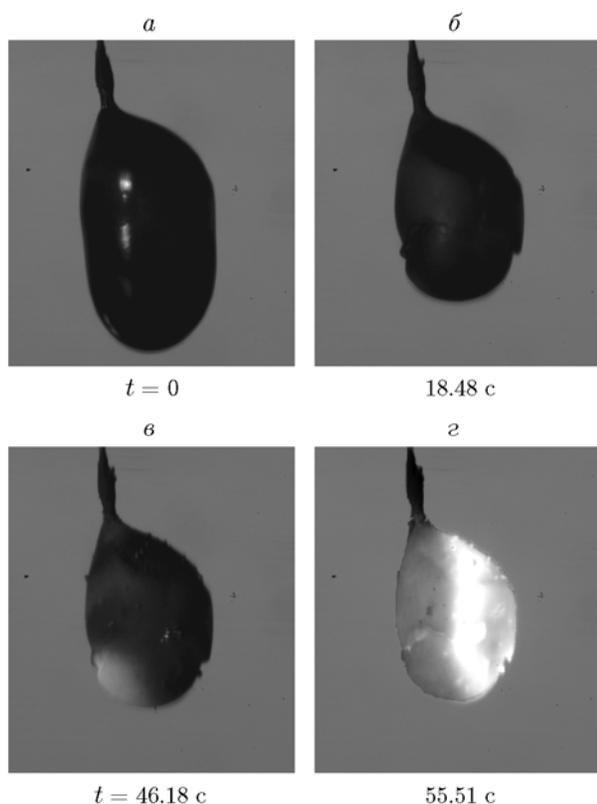


Рис. 3. Типичная видеogramма процессов термической подготовки и воспламенения покрытых водяной пленкой частиц топлива на основе отходов углеобогащения (фильтр-кек ОФ «Северная»)

Анализ видеogramм процессов воспламенения и горения водоугольных частиц показывает, что горение ВУТ на базе кека длится намного дольше, чем на основе угля марки Д. Также было установлено, что в достаточно широком диапазоне изменения параметров, характеризующих условия теплового воздействия на частицу ВУТ, зажигание всегда происходило (см. рис. 2, 3) на поверхности последней (точнее, на открытой поверхности пористой структуры). Соответственно, реакцию инициирования горения нельзя называть гетерогенной. Это обусловлено тем, что кислород взаимодействовал с летучими, образовавшимися при термическом разложении органической части топлива. Поэтому при постановке задачи не рассматривались процессы тепло- и массообмена в пристенном слое газа у поверхности частицы. Предполагалось, что в соответствии с условиями проведенных экспериментов концентрации кислорода на границе раздела частица ВУТ —

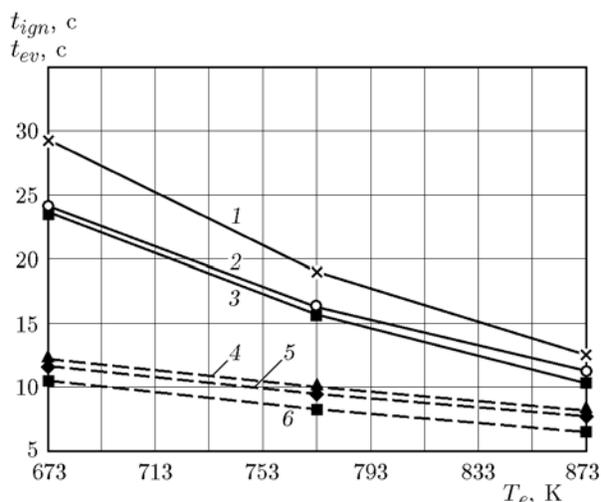


Рис. 4. Зависимость периода задержки зажигания частиц ВУТ (на базе угля марки Д) и времени испарения водяной пленки от температуры внешней среды:

скорость обтекания воздухом частицы $v_e = 3.5$ м/с; t_{ign} : 1 — $d \approx 3 \cdot 10^{-3}$ м, 2 — $d \approx 2.5 \cdot 10^{-3}$ м, 3 — $d \approx 1.5 \cdot 10^{-3}$ м; t_{ev} : 4 — $d \approx 2.5 \cdot 10^{-3}$ м, 5 — $d \approx 1.5 \cdot 10^{-3}$ м, 6 — $d \approx 3 \cdot 10^{-3}$ м

внешняя среда достаточно для начала реакции окисления водорода, метана и оксида углерода, являющихся основными горючими компонентами газообразных продуктов термического разложения.

На рис. 4 представлены зависимости периода задержки зажигания водоугольных частиц на основе угля марки Д и времени испарения приповерхностной водяной пленки от температуры внешней среды. Диаметр частиц варьировался в диапазоне $1.5 \cdot 10^{-3} < d < 3.5 \cdot 10^{-3}$ м. Анализ зависимостей показал, что испарение пленки воды играет значительную роль в термической подготовке топлива к воспламенению. Так, время испарения пленки занимает около 50 % всего периода индукции.

Время воспламенения водоугольных частиц на основе отходов углеобогащения и время испарения водяной пленки с их поверхностей приведены на рис. 5. Эти зависимости аналогичны рис. 4. Можно отметить, что задержка зажигания частиц ВУТ на основе фильтрационного кека много больше, чем таких же частиц на основе угля. Очевидно, что последнее связано с более низкой (по сравнению с ВУТ на основе угля марки Д) реакционной способностью, в частности, с более высоким содержанием негорючего остатка (зола) и низким со-

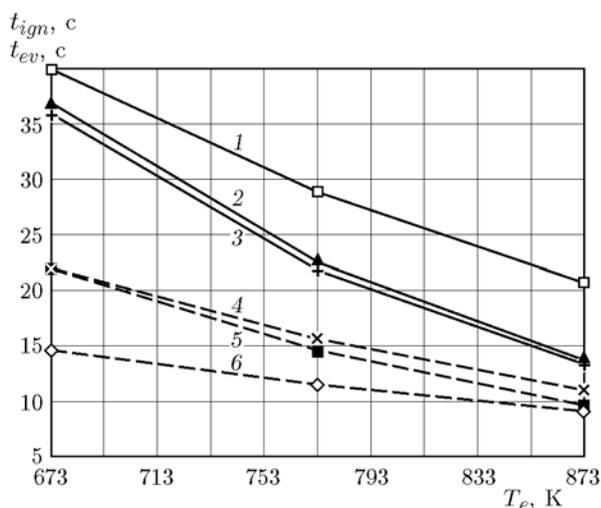


Рис. 5. Зависимость периода задержки зажигания водоугольных частиц (на основе кека) и времени испарения водяной пленки от температуры внешней среды:

$v_e = 3.5$ м/с; t_{ign} : 1 — $d \approx 3.5 \cdot 10^{-3}$ м, 2 — $d \approx 2.5 \cdot 10^{-3}$ м, 3 — $d \approx 1.5 \cdot 10^{-3}$ м; t_{ev} : 4 — $d \approx 3.5 \cdot 10^{-3}$ м, 5 — $d \approx 2.5 \cdot 10^{-3}$ м, 6 — $d \approx 1.5 \cdot 10^{-3}$ м

держанием летучих. Последние, как известно [20], играют одну из определяющих ролей при воспламенении твердых топлив. Можно отметить, что, как и при воспламенении ВУТ на базе угля, пленка воды оказывает существенное влияние на процессы термической подготовки и воспламенения. Время испарения слоя воды составляет $30 \div 50$ % от всего периода индукции зажигания.

Зависимости периода задержки зажигания топливных частиц и времени испарения водяной пленки от температуры при варьировании скорости движения воздуха представлены на рис. 6. Анализ $t_{ign}(T_e)$ показывает, что скорость движения окислителя существенно влияет на динамику воспламенения топлива. Можно выделить предельные по температуре ($T \approx 693$ К) и скорости окислителя ($v_g \approx 0.4$ м/с) условия зажигания водоугольных частиц.

Зависимости задержки зажигания частиц ВУТ (на базе фильтр-кека) и времени испарения водяной пленки от температуры приведены на рис. 7. Видно, что с ростом температуры внешней среды характерные времена процессов уменьшаются линейно. Стоит отметить, что в области относительно низких температур ($T_e < 823$ К) влияние скорости набегающего потока выражено более отчетливо, чем для таких же частиц, но при $T_e > 823$ К. В диа-

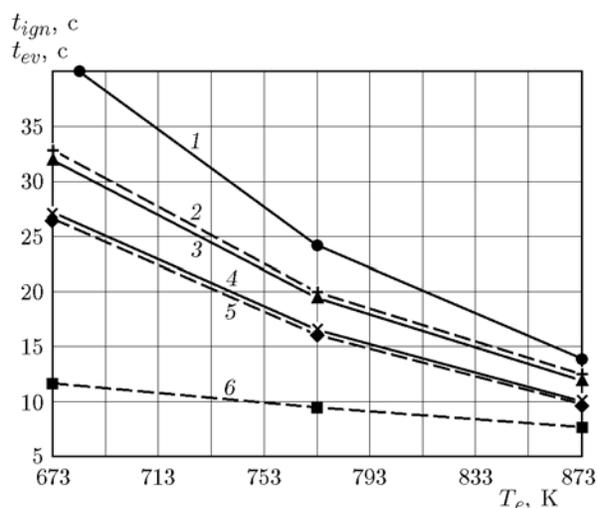


Рис. 6. Зависимость периода задержки зажигания водоугольных частиц (на основе угля марки Д) диаметром $d \approx 1.5 \cdot 10^{-3}$ м и времени испарения водяной пленки от температуры внешней среды при различной скорости обтекания потока:

1, 3, 4 — t_{ign} , 2, 5, 6 — t_{ev} ; v_e , м/с: 1 — 0.4, 3 — 1.4, 4 — 3.5, 2 — 0.4, 5 — 1.4, 6 — 3.5

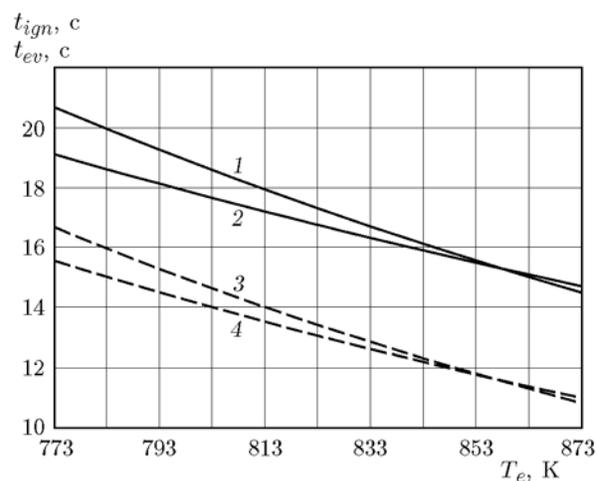


Рис. 7. Зависимость периода задержки зажигания частиц ВУТ (на основе фильтр-кека) и времени испарения водяной пленки от температуры при различной скорости набегающего потока:

1, 2 — t_{ign} , 3, 4 — t_{ev} ; 1, 3 — $v_e = 1.4$ м/с, 2, 4 — $v_e = 3.5$ м/с

пазоне температуры $T_e \approx 853 \div 863$ К такое различие становится минимальным.

На рис. 8 приведена зависимость температуры в центре капли ВУТ от времени в про-

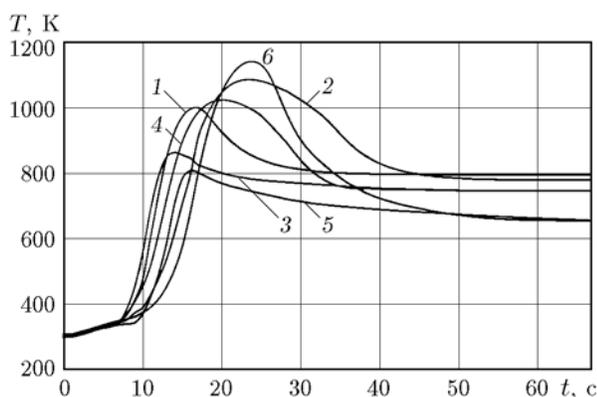


Рис. 8. Изменение температуры в центре частицы ВУТ (на базе угля марки Д, $v_e = 3.5$ м/с):

1 — $d \approx 1.5 \cdot 10^{-3}$ м, $T = 873$ К; 2 — $2.5 \cdot 10^{-3}$ м, 873 К; 3 — $1.5 \cdot 10^{-3}$ м, 773 К; 4 — $2.5 \cdot 10^{-3}$ м, 773 К; 5 — $1.5 \cdot 10^{-3}$ м, 673 К; 6 — $2.5 \cdot 10^{-3}$ м, 673 К

цессах термической подготовки и воспламенения частиц ВУТ на базе угля марки Д. Можно отметить характерную зону низкоскоростного нагрева топливных частиц в начальный период времени ($0 < t < 8$ с). Эта «полка» характерна практически для всего диапазона размеров частиц ВУТ, и ее протяженность не зависит от температуры внешней среды. По истечении ≈ 8 с скорость нагрева частицы резко возрастает. Последнее объясняется тем, что высокие эндотермический эффект испарения воды ($2.5 \cdot 10^6$ Дж/кг) и теплоемкость воды (4190 Дж/(кг·К)) создают энергетический барьер, который существенно тормозит прогрев основного слоя топлива. После полного испарения пленки воды начинается обезвоживание водоугольного агломерата (в котором доля воды составляет $\approx 40\%$), в результате температура всей частицы растет значительно быстрее.

На рис. 9 приведены аналогичные рис. 8 зависимости для ВУТ на основе фильтр-кека. Видно, что в начальный период времени (инертного прогрева, испарения пленки и обезвоживания углеродистого каркаса) температура растет быстрее по сравнению с рис. 8. Последнее объясняется более высокими, чем у угля, теплопроводностью и теплоемкостью фильтр-кека. Соответственно, распределение температуры по радиусу частиц более равномерное.

Как показал сравнительный анализ рис. 8 и 9, практически все стадии воспламенения и

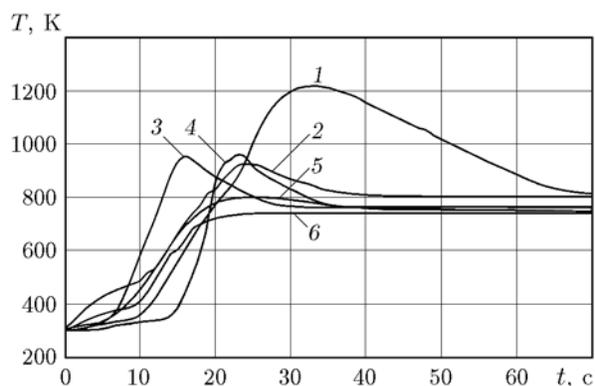


Рис. 9. Изменение температуры в центре частицы ВУТ (на базе фильтр-кека ОФ «Северная», $v_e = 3.5$ м/с):

1 — $d \approx 2.5 \cdot 10^{-3}$ м, $T = 873$ К; 2 — $1.5 \cdot 10^{-3}$ м, 873 К; 3 — $1.5 \cdot 10^{-3}$ м, 773 К; 4 — $2.5 \cdot 10^{-3}$ м, 773 К; 5 — $2.5 \cdot 10^{-3}$ м, 673 К; 6 — $1.5 \cdot 10^{-3}$ м, 673 К

горения частиц ВУТ, полученных на основе фильтр-кека, более продолжительны по сравнению с такими же частицами ВУТ из каменного угля марки Д.

На основании результатов экспериментов разработана математическая модель, описывающая комплекс процессов тепло- и массопереноса в условиях интенсивных физико-химических превращений в период времени до зажигания частицы ВУТ.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Постановка задачи, принятая в настоящей работе, отличается от разработанных ранее [15, 16] тем, что рассматривается частица ВУТ, покрытая тонким слоем воды. Наиболее энергос затратным процессом, который тормозит воспламенение, является испарение водяной пленки с поверхности, а также обезвоживание основного слоя топлива. В результате формируется сухой, низкотеплопроводный пористый каркас, через который фильтруется водяной пар, охлаждая его и вступая в термодинамическое взаимодействие с углеродом.

Необходимо отметить, что фазовые превращения (особенно испарение воды) являются одними из наиболее сложных процессов (в математическом описании и реализации вычислений) при проведении численного моделирования. Это связано с тем, что испарение влаги с большим эндотермическим эффектом в условиях интенсивного (высокотемпературного и вы-

сокоскоростного) нагрева проходит в очень узкой (много меньше линейного размера частицы), постоянно меняющей свое местоположение области (фронт испарения). Разработан ряд приемов [13, 21–23], позволяющих решать задачи с подвижными границами. Однако многие из них базируются на упрощающих модель допущениях: равновесность параметров на границе фазового перехода (задача Стефана) [21], «размазывание» фронта испарения по координате [22], применение моделей влагопотенциала [23] или теплового баланса [13]. Использование подходов [13, 21–23] при решении задачи воспламенения ВУТ представляется необоснованным, так как испарение влаги происходит во фронте при переменной (зависящей от скорости фазового перехода) температуре. Поэтому при постановке задачи применялась хорошо зарекомендовавшая себя схема [15, 16] описания процесса обезвоживания пористых угольных частиц в условиях высокотемпературной газовой среды.

В экспериментах частица ВУТ подвешивалась на хромель-алюмелевой термопаре (рис. 10). Поэтому при моделировании зажигания частицы ВУТ в этих условиях (с целью сравнения теоретических и экспериментальных значений времени задержки) учитывался «сток» теплоты через проволоку термопары. Математическая постановка задачи тепло- и массопереноса при воспламенении частицы ВУТ в условиях проводимых экспериментов сформулирована в виде системы нестационарных дифференциальных уравнений энергии:

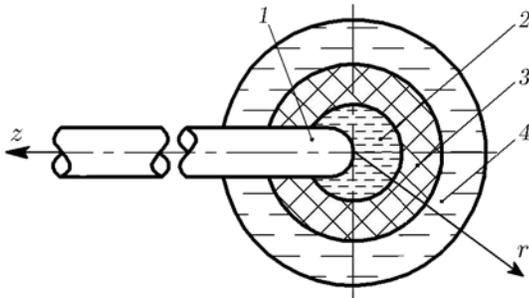


Рис. 10. Схема области решения задачи:

1 — термопарная проволока, 2 — исходное топливо, 3 — «обезвоженный» слой основного топлива (после удаления водяной пленки), 4 — пленка воды

— для влагонасыщенной (исходной) части топлива:

$$C_1 \rho_1 \frac{\partial T_1(r, t)}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left[r^2 \lambda_1 \frac{\partial T_1(r, t)}{\partial r} \right], \quad (1)$$

$$t > 0, \quad r_t < r < r_{ev}, \quad T \leq T_e;$$

— для «обезвоженного» углеродистого каркаса:

$$C_2 \rho_2 \frac{\partial T_2(r, t)}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left[r^2 \lambda_2 \frac{\partial T_2(r, t)}{\partial r} \right] -$$

$$- \sum Q_i W_i - u C_p \rho_s \frac{\partial T_2(r, T)}{\partial r}, \quad (2)$$

$$t > 0, \quad r_{ev} < r < r_0, \quad T \geq T_e;$$

— для водяной пленки:

$$C_3 \rho_3 \frac{\partial T_3(r, t)}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left[r^2 \lambda_3 \frac{\partial T_3(r, t)}{\partial r} \right], \quad (3)$$

$$t > 0, \quad r_0 < r < r_{wf}, \quad T \geq T_{wf};$$

— для спая термопары:

$$C_4 \rho_4 \frac{\partial T_4(r, t)}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left[r^2 \lambda_4 \frac{\partial T_4(r, t)}{\partial r} \right], \quad (4)$$

$$t > 0, \quad 0 < r < r_t, \quad T \geq T_{wf};$$

— для термопарной проволоки:

$$C_4 \rho_4 \frac{\partial T_4(r, t)}{\partial t} = \lambda_4 \frac{\partial^2 T_4(z, t)}{\partial z^2}, \quad (5)$$

$$t > 0, \quad 0 < z < l, \quad T \geq T_{wf}.$$

Здесь $\sum Q_i W_i$ — комплекс, учитывающий тепловые эффекты термохимического взаимодействия продуктов пиролиза с окислителем, Вт/м³; Q_i — тепловой эффект химической реакции, Дж/кг; W_i — скорость химической реакции, кг/(м³·с); T_{wf} — температура на поверхности водяной пленки, К; u — скорость фильтрации водяного пара, м/с; $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ — коэффициент теплопроводности соответственно исходной части ВУТ, сухой части ВУТ, воды, алюмели, Вт/(м·К); C_1, C_2, C_3, C_4 — теплоемкость соответственно исходной части ВУТ, сухой части ВУТ, воды, алюмели, Дж/(кг·К); $\rho_1, \rho_2, \rho_3, \rho_4$ — плотность соответственно исходной части ВУТ, сухой части ВУТ, воды, алюмели, кг/м³; C_p — изобарная теплоемкость водяного пара, Дж/(кг·К); ρ_s —

плотность пара, кг/м³; r_{ev} — радиус фронта испарения, м; r_0 — внешний радиус частицы ВУТ, м; r_{wf} — внешний радиус частицы с водяной пленкой, м.

На границах раздела систем исходное ВУТ — пленка воды, исходное ВУТ — спай термпары, спай термпары — термпарная проволока записываются граничные условия 4-го рода (равенство тепловых потоков и температур):

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1(r_0, t)}{\partial r} \Big|_{r=r_0-0} = \lambda_3 \frac{\partial T_3(r_0, t)}{\partial r} \Big|_{r=r_0+0}, \quad (6)$$

$$T_2(r_0, t) = T_3(r_0, t),$$

$$\lambda_3 \frac{\partial T_3(r_0, t)}{\partial r} \Big|_{r=r_t-0} = \lambda_4 \frac{\partial T_4(r_0, t)}{\partial r} \Big|_{r=r_t+0}, \quad (7)$$

$$T_3(r_0, t) = T_4(r_0, t),$$

$$\lambda_4 \frac{\partial T_4(z, t)}{\partial z} \Big|_{z=l_z} = \lambda_4 \frac{\partial T_4(r_0, t)}{\partial r} \Big|_{r=0}, \quad (8)$$

$$T_4(z, t) = T_4(r_0, t).$$

На границе раздела системы исходное ВУТ — углеродистый каркас происходит испарение воды. Для этой границы записывается условие 4-го рода с учетом эндотермического теплового эффекта:

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1(r, t)}{\partial r} \Big|_{r=r_{ev}-0} - \lambda_2 \frac{\partial T_2(r, t)}{\partial r} \Big|_{r=r_{ev}+0} = Q_{ev} W_{ev}, \quad (9)$$

$$T_1(r_{ev}, t) = T_2(r_{ev}, t) = T_{ev}.$$

Здесь $Q_{ev} W_{ev}$ — комплекс, учитывающий тепловые эффекты при испарении воды, Вт/(м²·К); Q_{ev} — удельная теплота испарения воды, Дж/кг; W_{ev} — массовая скорость испарения.

Процесс удаления влаги протекает в условиях высокотемпературного ($T_e \geq 800$ К) нагрева водоугольной частицы. Следовательно, нет оснований применять диффузионные модели испарения воды (например, как в работах [24, 25]). Причина заключается в применимости этих подходов при испарении капель

любой жидкости в условиях умеренной температуры (по данным [26] до 600 К). Поэтому при высокой температуре процесс испарения капель жидкости намного лучше описывает модель Герца — Кнудсена — Ленгмюра, которую также условно можно назвать кинетической. В этой модели переход от испарения в вакуум к испарению во внешнюю среду с ненулевым давлением осуществляется за счет использования коэффициента аккомодации. Значение последнего для жидкости определяется экспериментально. В нашей статье использован подход авторов [27, 28], которые достаточно убедительно обосновали справедливость его применения для измерения широкого диапазона температуры испаряющейся жидкости. Массовая скорость испарения W_{ev} [кг/(м²·с)] вычислялась по формуле [28]

$$W_{ev} = W_0 \exp \frac{Q_{ev} \mu (T_{ev} - T_f)}{RT_f T_{ev}}, \quad (10)$$

где μ — молярная масса водяного пара, кг/моль; R — универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К); W_0 — массовая скорость испарения воды при температуре T_f , кг/(м²·с); T_f — температура воды, соответствующая точке замерзания, К; T_{ev} — температура на границе испарения, К.

Координата границы испарения находилась по результатам численного интегрирования:

$$r_f = r_0 - \int_0^\tau u_f d\tau, \quad (11)$$

где $u_f = W_{ev}/\rho_3$ — линейная скорость продвижения фронта испарения, м/с.

Распределение давления по слою сухого пористого топлива описывается уравнением «пьезопроводности» (филтрации):

$$\frac{m\nu Z}{K_p} \frac{\partial p_s(r, t)}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial p_s(r, t)}{\partial r} \right), \quad (12)$$

$$t > 0, \quad r_{ev} < r < r_0,$$

где p_s — давление водяного пара, Па; m — пористость; Z — степень сжимаемости водяного пара, 1/Па; K_p — степень проницаемости пористой структуры, м²; ν — динамическая вязкость водяных паров, Па·с.

Скорость пара вычислялась с использованием закона Дарси:

$$u = -\frac{K_p}{\nu} \frac{\partial p_s}{\partial r}. \quad (13)$$

При решении задачи учитывалось, что водяные пары, образующиеся при испарении влаги, вступают в термохимическое взаимодействие с углеродом кокса. По аналогии с моделями [29, 30] скорость такой реакции ($C + H_2O = CO + H_2$, 1 185 МДж) вычислялась из выражения

$$W_i = k_i c_i \rho_s \exp\left(-\frac{E}{RT_2(r, t)}\right), \quad (14)$$

где k_i — предэкспонент реакции, $1/c$; c_i — концентрация соответствующего компонента химической реакции; E — энергия активации, Дж/(моль · К); i — порядковый номер химической реакции.

При достижении на поверхности частицы условия $T_s \geq T_{std}$ (T_s — температура поверхности, T_{std} — температура начала термического разложения) в частице начинается разложение органической части топлива с выделением летучих. Этот процесс описывается уравнением химической кинетики

$$\begin{aligned} \frac{\partial \eta(r, t)}{\partial t} = \\ = [1 - \eta(r, t)] k_i \exp\left(-\frac{E}{RT_2(r, t)}\right), \quad (15) \end{aligned}$$

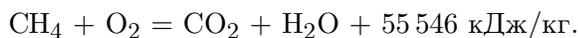
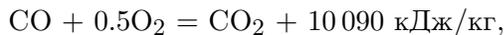
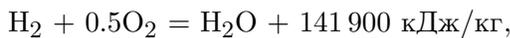
$$t > 0, \quad r_{ev} < r < r_0, \quad T \geq T_{ev},$$

где $\eta(r, t)$ — параметр выгорания.

Скорость пиролиза рассчитывалась по выражению

$$W_i = [1 - \eta(r, t)] k_i \rho_2 \exp\left(-\frac{E}{RT_2(r, t)}\right). \quad (16)$$

Продукты пиролиза (летучие) и термохимического взаимодействия углерода с водяным паром (CO и H_2) совместно с последним фильтруются к поверхности, вблизи которой формируются парогазовую смесь, воспламеняющуюся при достижении критических значений температуры и концентрации. Учитывалась возможность протекания в топливе трех реакций:



Их скорость вычислялась из закона Аррениуса:

$$W_i = k_i c_i \rho_i \exp\left(-\frac{E}{RT(r, t)}\right). \quad (17)$$

При решении системы уравнений (1)–(17) использовались краевые условия и замыкающие соотношения:

$$0 < r < r_0, \quad T(r, 0) = T_0, \quad T_4(z, 0) = T_0,$$

$$p(r, 0) = p_0, \quad \eta(r, 0) = \eta_0,$$

$$\begin{aligned} -\lambda_2 \frac{\partial T_2(r_0, t)}{\partial r} = \alpha [T_e - T_2(r_0, t)] + \\ + \varepsilon_2 \sigma [T_e^4 - T_2^4(r_0, t)] + \sum_i Q_i W_i, \quad t > t_{ev}, \quad (18) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} -\lambda_3 \frac{\partial T_3(r_{wf}, t)}{\partial r} = \alpha [T_e - T_3(r_{wf}, t)] + \\ + \varepsilon_3 \sigma [T_e^4 - T_3^4(r_{wf}, t)] - Q_{ev} W_{ev}, \quad t < t_{ev}, \quad (19) \end{aligned}$$

$$T_4(0, t) = T_0, \quad (20)$$

$$\frac{\partial p_s(r_{ev}, t)}{\partial r} = -\frac{\nu}{K_p} u_s(r_{ev}, t), \quad (21)$$

$$p(r_0, t) = p_0. \quad (22)$$

Здесь T_0 — начальная температура частицы, К; σ — константа излучения абсолютно черного тела, Вт/(м² · К⁴); $\varepsilon_2, \varepsilon_3$ — интегральная степень черноты водоугольной частицы и водяной пленки; α — коэффициент конвективной теплоотдачи, Вт/(м² · К); p_0 — начальное давление, Па; η_0 — начальное значение параметра выгорания; t_{ev} — время испарения водяной пленки, с.

Теплопроводность, теплоемкость и плотность влажной и «обезвоженной» частей водоугольного агломерата рассчитывались с учетом объемных долей соответствующих компонентов топлива [31]:

$$\lambda_1 = \varphi_3 \lambda_3 + \varphi_6 \lambda_6, \quad \lambda_2 = \varphi_7 \lambda_7 + \varphi_6 \lambda_6, \quad (23)$$

$$C_1 = \varphi_3 C_3 + \varphi_6 C_6, \quad C_2 = \varphi_7 C_7 + \varphi_6 C_6, \quad (24)$$

$$\rho_1 = \varphi_3 \rho_3 + \varphi_6 \rho_6, \quad \rho_2 = \varphi_7 \rho_7 + \varphi_6 \rho_6, \quad (25)$$

где φ_3 — объемная доля воды, φ_6 — угля, φ_7 — водяного пара.

Краевая задача (1)–(22) решалась для периода времени до достижения на поверхности частицы условий, адекватных зажиганию твердого топлива [32] при локальном нагреве, методом конечных разностей аналогично [33].

Задача испарения решалась в соответствии с алгоритмами, предложенными в работах [15, 16]. Обоснование достоверности результатов моделирования выполнено проверкой баланса энергии в системе аналогично [34]. Исследования проведены при следующих исходных данных: $T(r, 0) = T_0 = 293$ К, $p_0 = 101325$ Па, $\eta_0 = 0$.

РЕЗУЛЬТАТЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

На рис. 11 представлены результаты сравнения времен задержки зажигания частиц ВУТ и испарения водяной пленки, полученных экспериментально и из численного решения системы (1)–(22). Можно отметить, что вид зависимостей $t_{ign}(T_e)$, построенных по результатам численного моделирования, идентичен полученным экспериментально. Численные вычисления подтверждают гипотезу (сформулированную на основании анализа результатов экспериментов) о том, что процесс испарения водяной пленки играет одну из ключевых ролей при термической подготовке и зажигании

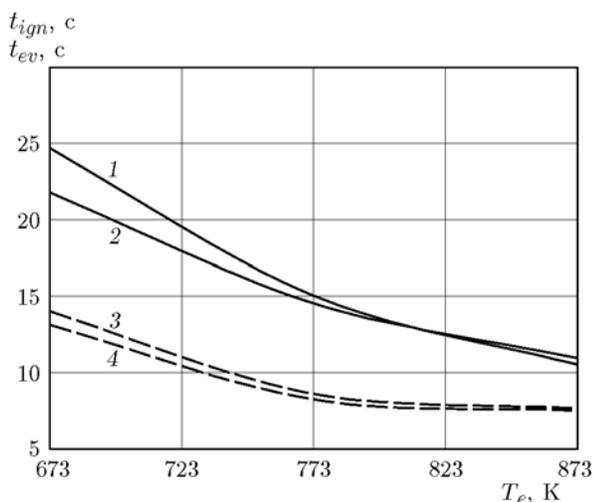


Рис. 11. Зависимости периода задержки зажигания водоугольных частиц и времени испарения водяной пленки от температуры внешней среды:

1, 2 — t_{ign} , 3, 4 — t_{ev} ; 1, 3 — эксперимент; 2, 4 — численное решение системы (1)–(19)

частиц ВУТ. Одновременно с испарением воды идет прогрев основного топлива до температуры, близкой к температуре кипения. В результате последующее влагоудаление из глубинных слоев частицы (если не учитывать время испарения пленки) проходит значительно быстрее, чем при воспламенении таких же капель в случае отсутствия водяного слоя на поверхности.

На рис. 12 приведено изменение во времени температуры в центре частицы, полученное экспериментально и из численного решения системы (1)–(22). Анализ показал, что в период термической подготовки существенную роль играет испарение водяной пленки. Можно отметить характерный излом (в интервале времени $6 < t < 7$ с), который свидетельствует о завершении фазовых превращений. Видно, что последующее обезвоживание основного слоя топлива происходит значительно быстрее. После полного влагоудаления (хорошо заметен второй характерный излом на рис. 12) начинается термическое разложение органической части топлива. При этом температура растет значительно быстрее. По истечении примерно 10 с частица воспламеняется.

Видеосъемка процесса прогрева капли (а затем частицы) ВУТ на основе угля зарегистрировала в опытах на стадии завершения испарения пленки достаточно устойчивый эффект «локального вскипания» ее поверхности (выход пузырьков воздуха). Этот эффект проявляется при очень малых толщинах пленки

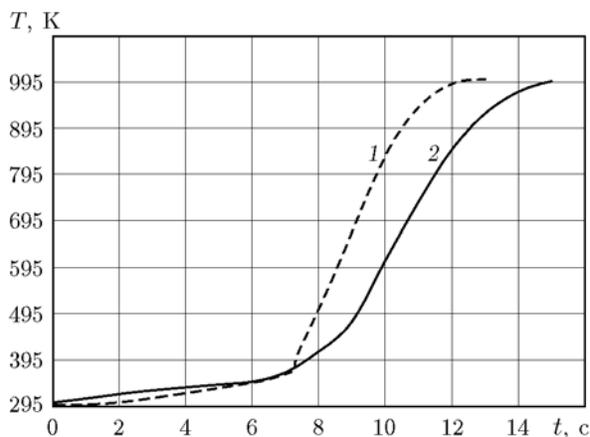


Рис. 12. Изменение температуры в центре частицы ($r = 0$) диаметром $d \approx 1.5 \cdot 10^{-3}$ м при температуре внешней среды $T_e = 873$ К, полученные теоретически (линия 1) и экспериментально (линия 2)

воды ($<0.3 \cdot 10^{-3}$ м) и обусловлен, скорее всего, ее объемным вскипанием вследствие прогрева слоя по всей его толщине до температуры кипения. При нагреве капель ВУТ, изготовленных на основе фильтр-кека, аналогичных процессов не зарегистрировано. Скорее всего, это обусловлено существенным отличием теплопроводности угля и фильтр-кека. Проведенный расчет теплопроводности по формуле (23) показал, что теплопроводность фильтр-кека (1.08 Вт/(м·К)) заметно больше теплопроводности угля (0.29 Вт/(м·К)). Соответственно, в идентичных условиях нагрева теплота быстрее отводится в глубь частицы ВУТ из фильтр-кека и пленка воды на ее поверхности не успевает прогреться до температуры кипения. Уголь хуже проводит тепло, и тонкая пленка на поверхности его частицы может прогреваться до температуры кипения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам выполненных экспериментов установлены условия и характеристики воспламенения покрытых водяной пленкой частиц водоугольного топлива двух значительно отличающихся составов — на основе каменного угля марки Д и на основе фильтр-кека (ОФ «Северная»). Показано, что испарение слоя воды оказывает существенное влияние на характеристики процесса зажигания частиц в потоке высокотемпературного окислителя. При этом механизмы воспламенения двух указанных составов ВУТ различаются (при одинаковых размерах частиц топлива).

По результатам выполненных экспериментов разработана математическая модель зажигания частиц водоугольного топлива, покрытых тонкой водяной пленкой. Сравнение времен задержки зажигания топлива и испарения слоя воды показало достаточно удовлетворительное соответствие теоретических и экспериментальных значений.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Kaldellis J. K., Zafirakis D.** The wind energy (r)evolution: A short review of a long history // *Renewable Energy*. — 2011. — V. 36, N 7. — P. 1887–1901.
2. **Longwell J. P., Rubin E. S., Wilson J.** Coal: Energy for the future // *Prog. Energy and Combust. Sci.* — 1995. — V. 21, N 4. — P. 269–360.
3. **Diaz A. F. A. R.** The future challenges for «clean coal technologies»: Joining efficiency increase and pollutant emission control // *Energy*. — 2009. — V. 34, N 3. — P. 348–354.
4. **Khatami R., Levendis Y. A., Delichatsios M. A.** Soot loading, temperature and size of single coal particle envelope flames in conventional- and oxy-combustion conditions (O₂/N₂ and O₂/CO₂) // *Combust. Flame*. — 2015. — V. 162, N 6. — P. 2508–2517.
5. **Lei Chen, Sze Zheng Yong, Ghoniem A. F.** Oxy-fuel combustion of pulverized coal: Characterization, fundamentals, stabilization and CFD modeling // *Prog. Energy and Combust. Sci.* — 2012. — V. 38, N 2 — P. 156–214.
6. **Van Caneghem J., Brems A., Lievens P., et al.** Fluidized bed waste incinerators: Design, operational and environmental issues // *Prog. Energy and Combust. Sci.* — 2012. — V. 38, N 4 — P. 551–582.
7. **Ting T., Stanger R., Wall T.** Laboratory investigation of high pressure NO oxidation to NO₂ and capture with liquid and gaseous water under oxy-fuel CO₂ compression conditions // *Intern. J. Greenhouse Gas Control*. — 2013. — V. 18. — P. 15–22.
8. **Ju Yiguang, Sun Wenting.** Plasma assisted combustion: Dynamics and chemistry // *Prog. Energy and Combust. Sci.* — 2015. — V. 48. — P. 21–83.
9. **Чумаков Ю. А., Князева А. Г.** Иницирование реакции в окрестности одиночной частицы, нагреваемой СВЧ-излучением // *Физика горения и взрыва*. — 2012. — Т. 48, № 2. — С. 24–30.
10. **Jong Min Lee, Dong Won Kim, Jae Sung Kim.** Characteristics of co-combustion of anthracite with bituminous coal in a 200-MWe circulating fluidized bed boiler // *Energy*. — 2011. — V. 36, N 9. — P. 5703–5709.
11. **Cheng Jun, Zhou Junhu, Li Yanchang, Liu Jianzhong, Cen Kefa.** Effects of pore fractal structures of ultrafine coal water slurries on rheological behaviors and combustion dynamics // *Fuel*. — 2008. — V. 87, N 12. — P. 2620–2627.
12. **Cui Longlian, An Liqian, Jiang Hejin.** A novel process for preparation of an ultra-clean superfine coal — oil slurry // *Fuel*. — 2008. — V. 87, N 10–11. — P. 2296–2303.
13. **Kijo-Kleczkowska A.** Combustion of coal — water suspensions // *Fuel*. — 2011. — V. 90 — P. 865–877.
14. **Huang Z. et al.** Theoretical analysis on CWM drop combustion history // *Proc. 8th Intern. Symp. Coal Slurry Fuels Preparation and Utilization*. — Orlando, USA, 1986. — Pt 1. — P. 343–358.
15. **Кузнецов Г. В., Саломатов В. В., Сыродой С. В.** Численное моделирование зажигания частиц водоугольного топлива // *Физика горения и взрыва*. — 2015. — Т. 51, № 4. — С. 12–19.

16. Сыродой С. В., Кузнецов Г. В., Саломатов В. В. Влияние форм частиц на характеристики воспламенения водоугольного топлива // Химия твердого топлива. — 2015. — № 6. — С. 28–34.
17. Сенчурова Ю. А., Мурко В. И., Федяев В. И. Результаты исследований распыления водоугольного топлива пневмомеханическими форсунками // Изв. Том. политехн. ун-та. — 2008. — Т. 312, № 4. — С. 37–40.
18. Высокоморная О. В., Высокоморный В. С., Стрижак П. А. Оценка параметров надежности работы автономных устройств энергосбережения удаленных линейных объектов магистральных газопроводов Восточной Сибири и Дальнего Востока // Изв. Том. политехн. ун-та. — 2013. — Т. 323, № 4. — С. 59–65.
19. Кузнецов Г. В., Стрижак П. А. Движение совокупности капель мелкодисперсной жидкости во встречном потоке высокотемпературных газов // Письма в ЖТФ. — 2014. — V. 40, № 12. — С. 11–18.
20. Рыжков А. Ф., Силин В. Е., Богатова Т. Ф., Надир С. М. Ш. Влияние условий образования летучих на горение древесных топлив // Химия твердого топлива. — 2009. — № 5. — С. 20–27.
21. Мажукин В. И., Самарский А. А., Чуйко М. И. Метод динамической адаптации для численного решения нестационарных многомерных задач Стефана // Докл. АН. — 1999. — Т. 368, № 3. — С. 307–310.
22. Ковыркина О. А., Остапенко В. В. О сходимости разностных схем сквозного счета // Докл. АН. — 2010. — Т. 433, № 5.
23. Гостеев Ю. А., Коробейников Ю. Г., Федоров А. В., Фомин В. М. Экспериментальное определение влажностепроводности образцов из сосны в продольном направлении при конвективной сушке // ПМТФ. — 2003. — Т. 44, № 3. — С. 117–123.
24. Фукс Н. А. Испарение и рост капель в газовой среде. — М.: Изд-во АН СССР, 1958.
25. Кумагаи С. Горение. — М.: Химия, 1979.
26. Кузнецов Г. В., Куйбин П. А., Стрижак П. А. Оценка численных значений констант испарения капель воды, движущихся в потоке высокотемпературных газов // Теплофизика высоких температур. — 2015. — Т. 53, № 2. — С. 264–269.
27. Френкель Я. И. Кинетическая теория жидкостей. — Л.: Наука, 1975.
28. Марков И. И., Хащенко А. А., Вечер О. В. О механизме парообразования на границе раздела двух сред // МО РФ, СКГТУ, Северо-Кавказское отделение технологических наук РФ: сб. науч. тр. Сер. Физ.-хим. — Ставрополь, 2004. — С. 73–76.
29. Гремячкин В. М. Взаимодействие пористой частицы углерода с водяным паром // Хим. физика. — 2003. — Т. 26, № 5. — С. 26–33.
30. Гремячкин В. М. Газификация пористой частицы углерода в парах воды // Физ.-хим. кинетика в газ. динамике. — 2008. — № 7. — С. 1–15.
31. Salomatov V. V., Syrodoy S. V., Gutareva N. Y. Effect of structural heterogeneity water-coal fuel conditions and characteristics of ignition // EPJ Web of Conf. — 2015. — V. 01037, N 82. — P. 1–5.
32. Кузнецов Г. В., Мамонтов Г. Я., Таратушкина Г. В. Численное моделирование зажигания конденсированного вещества нагретой до высоких температур частицей // Физика горения и взрыва. — 2004. — Т. 40, № 1. — С. 78–85.
33. Kuznetsov G. V., Sheremet M. A. Conjugate natural convection in an enclosure with a heat source of contact heat transfer rate // Intern. J. Heat and Mass Transfer. — 2011. — V. 54, N 15. — P. 260–268.
34. Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. Heat and mass transfer at the ignition of a liquid substance by a single «hot» particle // J. Eng. Thermophys. — 2008. — V. 17, N 3. — P. 244–252.

*Поступила в редакцию 1/X 2015 г.,
в окончательном варианте — 10/III 2016 г.*