

УДК 544.452.14

## Влияние степени метаморфизма угля на характеристики и условия воспламенения капель водоугольного топлива\*

В.В. Саломатов<sup>1</sup>, Г.В. Кузнецов<sup>2</sup>, С.В. Сыродой<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт теплофизики им С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет

E-mail: ssyrodoy@yandex.ru

Приведены результаты теоретических исследований процессов воспламенения капель водоугольного топлива на основе бурых углей, полуантрацита, антрацита, длиннопламенного и жирного углей в условиях, соответствующих топочным пространствам типичных современных котельных агрегатов. Проанализировано влияние степени метаморфизма (структурно-молекулярного преобразования органического вещества угля) и концентрации органической компоненты базового топлива (угля) на условия зажигания частиц водоугольного топлива. Установлено, что вид и марка угля оказывают существенное влияние на динамику воспламенения топлива. Показано, что в случае зажигания водоугольного топлива, приготовленного из каменных углей, быстрее всех (на 20 %) воспламеняются частицы на основе полуантрацита и антрацита, а медленнее всего — капли водоугольного топлива из жирного угля. Последнее объясняется более низкими теплоемкостью и тепловым эффектом пиролиза этого топлива, а также относительно высокой теплопроводностью антрацитового угля по сравнению с жирным. Установлено, что капли водоугольного топлива, выполненные из бурых углей, воспламеняются существенно (в 2 раза) быстрее капель, приготовленных из каменного угля частиц водоугольного топлива. Это связано с большим содержанием летучих в составе бурых углей.

Сравнительный анализ основных характеристик процесса — времен задержки зажигания ( $t_{ign}$ ), полученных при математическом моделировании и экспериментально, — показал удовлетворительное соответствие теоретических и экспериментальных значений  $t_{ign}$ .

**Ключевые слова:** водоугольное топливо, степень метаморфизма угля, марка угля, зажигание кокса, воспламенение летучих, диффузия продуктов пиролиза.

### Введение

Экологическая, в первую очередь, и очевидная экономическая перспективность использования водоугольного топлива (ВУТ) в качестве основного для тепловых электрических станций — во вторую, обоснованы уже много лет назад [1]. Однако, несмотря на это, до сих пор технология ВУТ не стала основной даже в теплоэнергетике Китая, где уровень загрязнения атмосферы антропогенными продуктами горения твердых топлив чрезвычайно высок [2, 3]. Это связано с рядом объективных и субъективных причин. К последним можно отнести существенное смещение топливно-энергетического баланса

\* Исследование проведено в рамках программы повышения конкурентоспособности Национального исследовательского Томского политехнического университета среди ведущих мировых научно-образовательных центров (проект ВИУ-ИШЭ-300/2018).

в сторону потребления газа или тяжелых продуктов нефтеперегонки (мазута) на тепловых электрических станциях [4]. Тенденция «газификации» теплоэнергетики обусловлена, в первую очередь, ценовыми преимуществами газового топлива по сравнению с углем [5]. Анализ же сфер использования природного газа в современном промышленном производстве развитых стран показывает, что наиболее выгодным для экономического развития любой страны является не сжигание газа, а применение его в качестве сырья для химической промышленности [6, 7].

На основании анализа многочисленных публикаций по проблемам сжигания ВУТ, представленных в последние годы в мировой научной периодике (см., например, [3]), можно сделать вывод, что главной объективной причиной малого объема ВУТ в общем балансе тепло- и электрогенерации (наиболее широко эти технологии применяются в Китае, Японии и США) можно назвать неизученность процессов зажигания и горения таких существенно неоднородных суспензионных топлив. Разработанные к настоящему времени математические модели разной степени сложности [8–14] и методы решения задач зажигания частиц ВУТ [15–19] не позволяют в полной мере проводить прогностическое моделирование процессов воспламенения таких жидких (по существу) в исходном состоянии топлив. Математические модели зажигания, как правило, базируются на существенных допущениях. Так, в работах [8–10] приведены математические модели, основанные на решении уравнений, при записи которых предполагалось, что температурное поле частицы однородно, а испарение протекает на поверхности частицы топлива. В работе [8] были получены аналитические выражения для расчета характеристик и условий зажигания ВУТ. В более поздней работе [11] было установлено, что применение таких моделей возможно только в случае сжигания частиц ультрамалой дисперсности ( $\delta \leq 1 \cdot 10^{-4}$  м)

Существенно более сложные математические модели, разработанные в [12–15], формулировались при допущении дискретизации всего процесса термической подготовки на ряд последовательных и взаимосвязанных стадий: инертный нагрев, испарение воды, пиролиз топлива, зажигание углерода кокса. Однако почти все основные процессы тепло- и массопереноса в частице ВУТ протекают в индукционный период времени совместно (по крайней мере, после полного испарения влаги). Соответственно можно сказать, что применение моделей [12–15] может привести к существенным погрешностям при вычислении интегральных характеристик процесса зажигания капель ВУТ — времен задержки воспламенения.

В работе [16] была предложена одна из наиболее полных по учету основных физических процессов математическая модель. Она представляет собой систему нестационарных дифференциальных уравнений в частных производных, в которой учитываются основные процессы термической подготовки топлива, протекающих совместно в индукционный период в условиях интенсивных фазовых (испарение воды) и термохимических (термическое разложение, взаимодействие водяных паров и углерода кокса, воспламенение летучих) превращений. С использованием модели [16] было проанализировано влияние на условия и характеристики зажигания водоугольного топлива достаточно большой группы основных значимых при расчете времени задержки воспламенения факторов: условий теплообмена [17], формы частицы [18], концентрации угля в ВУТ [19], гетерогенности пористой структуры топлива [20]. При решении задач [16–20] предполагалось, что процесс зажигания летучих протекал непосредственно на поверхности топлива. При этом изменения во времени и в пространстве концентрации продуктов пиролиза в малой окрестности частицы не моделировалось. В то же время из работ [21] и [22] известно, что при зажигании твердых топлив основную роль в процессе инициирования горения горючих газов играет диффузия.

В ряду математических моделей можно выделить постановку [23], которая описывает процесс воспламенения водоугольной частицы в газовой фазе. При этом учитываются испарение воды, термическое разложение органической части угля, выход

летучих и диффузия продуктов пиролиза во внешней газовой среде. Однако фазовый переход (парообразование) рассматривается в рамках гипотезы о равновесности процесса. В то же время ранее было установлено [24], что скорость испарения жидкости зависит от температуры фронта фазового перехода и концентрации паров у поверхности парообразования. Также известно [25], что на характеристики зажигания углей существенное влияние оказывает степень метаморфизма (каменные или бурые угли), марка и месторождение угля. Конструктивное обоснование выбора размеров и компоновки основных узлов котельных агрегатов проводится, как правило, по результатам определения характеристик зажигания и горения сжигаемого твердого топлива. Однако рассмотренные выше математические модели [16–20, 23] не учитывают группу значимых термохимических факторов, влияющих на характеристики процесса зажигания. К последним, в частности, относятся: содержание летучих в топливе ( $V_0$ ), их состав и свойства. Известно [26], что эти характеристики углей могут существенно отличаться в зависимости от степени метаморфизма, марки и места локализации месторождения твердого топлива.

На основании анализа состояния проблемы моделирования процесса зажигания водоугольных топлив можно сделать вывод, что разработка математической модели зажигания частицы ВУТ, учитывающей комплекс процессов, протекающих совместно в индукционный период, и индивидуальные термохимические характеристики базового компонента топлива (уголь) является актуальной и нерешенной до настоящего времени задачей.

Цель настоящей работы — математическое моделирование процессов тепло- и массопереноса, протекающих совместно при воспламенении частицы водоугольного топлива, и проведение на этой основе анализа влияния индивидуальных характеристик угля (теплофизических характеристик, теплоты термического разложения, содержания летучих и т.д.) на условия зажигания капель водоугольного топлива.

### **Постановка задачи**

#### ***Физическая постановка задачи***

При постановке задачи за базовую принята модель [20], включающая совокупность основных физических процессов, установленных при проведении экспериментальных исследований зажигания частиц водоугольного топлива. Сформулирована физическая модель процесса воспламенения, учитывающая основные процессы тепло- и массопереноса, протекающие в условиях интенсивных фазовых (испарение воды) и термохимических (термическое разложение, термохимическое взаимодействие углерода кокса и водяных паров, зажигание) превращениях в индукционный период.

Предполагалось, что в соответствии с условиями сжигания топлив в топках паровых котлов частица ВУТ вводится в высокотемпературную окислительную среду (воздух) и нагревается за счет конвекции и излучения. В результате нагрева происходит интенсивное испарение воды. Фронт испарения с ростом времени смещается от поверхности нагрева вглубь топлива. В результате формируется пористый угольный каркас с высоким термическим сопротивлением. Водяные пары, образующиеся при испарении, фильтруются сквозь слой сухого топлива, вступая в термохимическое взаимодействие с углеродом кокса, и образуют горючие газообразные продукты этой реакции ( $\text{CO}$  и  $\text{H}_2$ ). Дальнейшее повышение температуры частицы приводит к термическому разложению органической части угля и выходу летучих, которые совместно с парами воды и газообразными продуктами их термохимического взаимодействия с углеродом фильтруются к нагреваемой поверхности частицы топлива и вдуваются во внешнюю среду. В результате в пристенной области формируется смесь водяных паров, воздуха и различных газов с существенным градиентом концентраций. При достижении критических значений температур и массового соотношения летучих и окислителя происходит воспламенение этой смеси. Тепловое воздействие пламени летучих инициирует горение углерода кокса ВУТ.

Таблица 1

Состав газообразных продуктов пиролиза [28]

Компонент	Содержание компонента, %	
	Бурый уголь	Каменный уголь
Углекислый газ (CO <sub>2</sub> )	15,5	2,3
Моноксид углерода (CO)	15,0	5,7
Метан (CH <sub>4</sub> )	20,5	65,9
Водород (H <sub>2</sub> )	25,6	18,6
Азот (N <sub>2</sub> )	23,4	7,5

Известно [27], что при термическом разложении углей образуется газовая смесь, химический состав которой существенно зависит от группы факторов, таких как степень метаморфизма угля, влажность, месторождение. Состав компонентов летучих, рассматривавшийся в качестве базового при решении задач, приведен в табл. 1.

### Математическая постановка задачи

Математическая постановка задачи воспламенения ВУТ, соответствующая сформулированной выше физической модели, включает систему нестационарных дифференциальных уравнений.

Область решения задачи — «частица ВУТ–газовая среда» (рис. 1). В период термической подготовки каплю ВУТ можно условно разделить на две зоны: исходное (насыщенное влагой) топливо и сухой угольный каркас. Распределение температуры в такой неоднородной гетерогенной системе описывает уравнение энергии. Оно учитывает удаление влаги, термическую деструкцию, взаимодействие водяных паров и углерода кокса, а также фильтрационный тепло- и массоперенос:

$$\frac{\partial H_{wcf}}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \cdot \lambda_{wcf} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r \cdot \sin \theta} \cdot \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \frac{\sin \theta}{r} \cdot \lambda_{wcf} \cdot \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) - \frac{Q_{eva} \cdot W_{eva}}{h_{spr}} \cdot \delta(r_{eva}, \theta_{eva}) - \left[ \sum_{i=1}^{i=2} Q_i \cdot W_i + C_s \cdot \rho_s \cdot \left( U_s \cdot \frac{\partial T}{\partial r} + V_s \cdot \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) \right] \cdot \Phi(r - r_{eva}, \theta - \theta_{eva}), \quad (1)$$

где  $\sum_{i=1}^{n=2} Q_i \cdot W_i = Q_{c \rightarrow vol} \cdot W_{c \rightarrow vol} + Q_{C+H_2O} \cdot W_{C+H_2O}$ ,  $H_{wcf} = C_{wcf}(r, \theta, t) \cdot \rho_{wcf}(r, \theta, t) \cdot T(r, \theta, t)$ ,

$\delta$  — функция Дирака,  $\Phi$  — функция Хевисайда,  $T$  — температура,  $H_{wcf}$  — энтальпия,  $\lambda_{wcf}$ ,  $C_{wcf}$ ,  $\rho_{wcf}$  — коэффициент теплопроводности (Вт/(м·К)), теплоемкость (Дж/кг) и плотность (кг/м<sup>3</sup>) водоугольного топлива соответственно;  $U_s$  ( $V_s$ ) — скорость водяных

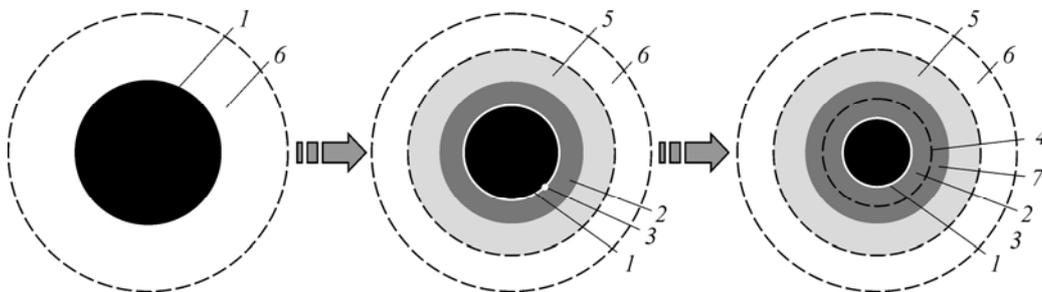


Рис. 1. Схема области решения задачи.

1 — частица ВУТ, 2 — слой сухого угля, 3 — граница раздела системы «исходное ВУТ–сухой слой топлива», 4 — граница раздела системы «сухой уголь–уголь при температуре  $T > T_{std}$ », 5 — область взаимодействия продуктов пиролиза и окислителя, 6 — высокотемпературный газ, 7 — уголь при температуре  $T > T_{std}$ .

паров и газообразных продуктов термического разложения (м/с);  $C_s$ ,  $\rho_s$  — теплоемкость и плотность водяных паров,  $Q$ ,  $W$  — тепловой эффект и скорость химической реакции. Теплофизические характеристики ( $\lambda_{wcf}$ ,  $C_{wcf}$  и  $\rho_{wcf}$ ) рассчитываются с учетом положения фронта испарения. Массовая скорость испарения ( $W_{eva}$ , кг/(м<sup>2</sup>с)), вычислялась из выражения [29]:

$$W_{eva} = W_f \cdot \exp \left[ \frac{Q_{wat} \cdot \mu \cdot (T(r_{eva}, \theta_{eva}) - T_f)}{R \cdot T_f \cdot T(r_{eva}, \theta_{eva})} \right], \quad (2)$$

где  $Q_{wat}$  — тепловой эффект испарения воды (Дж/кг),  $\mu$  — молярная масса воды (кг/моль),  $R$  — универсальная газовая постоянная (Дж/(моль·К)),  $T_f$  — температура тройной точки состояния воды (273,16 К). Координата границы испарения находилась из выражения

$$r_{eva} = r_{out} - \int_0^t u_F dt, \quad (3)$$

где  $u_F = W_{eva} / \rho_{wat}$  — линейная скорость движения фронта испарения (м/с),  $\rho_{wat}$  — плотность воды (кг/м<sup>3</sup>).

При постановке задачи учитывалось, что водяные пары совместно с продуктами термического разложения движутся сквозь пористый угольный каркас. Распределение давления ( $p$ ) по радиусу частицы вычислялось при решении уравнения пьезопроводности

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{K_p}{\nu \cdot \beta} \cdot \frac{\partial p}{\partial r} \right) + \frac{1}{r \cdot \sin \theta} \cdot \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \frac{\sin \theta}{r} \cdot \frac{K_p}{\nu \cdot \beta} \cdot \frac{\partial p}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{\rho \cdot \beta} \cdot \sum_{i=1}^{n=2} f_i, \quad (4)$$

где  $\sum_{i=1}^{n=2} f_i = \frac{1}{s} \left[ \left( s \cdot W_{c \rightarrow vol} + W_{C+H_2O \rightarrow CO+H_2} \right) \cdot \Phi(r - r_{eva}, \theta - \theta_{eva}) + W_{eva} \cdot \delta(r_{eva}, \theta_{eva}) \right]$ ,  $\Pi$  — пористость топлива,  $K_p$  — коэффициент проницаемости (м<sup>2</sup>),  $s$  — размер поры (м),  $\nu$  — коэффициент динамической вязкости (Па·с),  $\beta$  — коэффициент сжимаемости газообразных продуктов пиролиза (1/Па),  $f_i$  — функция, описывающая изменение массового расхода смеси паров воды и пиролизных газов в результате выхода летучих и поглощения водяного пара при его термохимическом взаимодействии с углеродом (кг/(с·м<sup>3</sup>)). Скорость фильтрации пара определялась из дифференциального выражения закона Дарси в радиальном и азимутальном направлениях соответственно:

$$U_s = - \frac{K_p}{\nu} \cdot \frac{\partial p}{\partial r}, \quad (5)$$

$$V_s = - \frac{K_p}{\nu} \cdot \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial p}{\partial \theta}. \quad (6)$$

Распределение температуры в слое газа вокруг частицы описывается уравнением энергии. Оно учитывает экзотермические эффекты реакций окисления основных горючих компонентов воздухом:

$$C_g \cdot \rho_g \cdot \frac{\partial T}{\partial t} + C_g \cdot \rho_g \cdot \omega(r) \cdot \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \cdot \lambda_g \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r \cdot \sin \theta} \cdot \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \frac{\sin \theta}{r} \cdot \lambda_g \cdot \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \sum_{i=1}^{i=3} Q_i \cdot W_i, \quad (7)$$

где  $\sum_{i=1}^{n=3} Q_i \cdot W_i = Q_{\text{CH}_4+\text{O}_2} \cdot W_{\text{CH}_4+\text{O}_2} + Q_{\text{CO}+\text{O}_2} \cdot W_{\text{CO}+\text{O}_2} + Q_{\text{H}_2+\text{O}_2} \cdot W_{\text{H}_2+\text{O}_2}$ ,  $C_g$ ,  $\rho_g$  — теплоемкость и плотность газовой смеси,  $Q_i$ ,  $W_i$  — тепловой эффект и скорость химической реакции окисления горючего,  $\omega(r)$  — скорость движения парогазовой смеси (м/с). Последняя вычислялась по формуле [30]:

$$\omega(r) = U_s(r_{\text{out}}, \theta, t) \cdot \frac{0,96}{0,07 \cdot r/s + 0,29}. \quad (8)$$

На границе раздела системы «частица ВУТ–газовая среда» принималось граничное условие 4-го рода. При этом учитывались экзотермический эффект реакции углерода с кислородом воздуха (по аналогии с [31]) и тепловое излучение внешней среды [32]:

$$\frac{\partial T}{\partial r} = K_\lambda \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_g^4 - T|_{r=r_0}^4) + Q_{\text{C}+\text{O}_2} \cdot W_{\text{C}+\text{O}_2}}{\lambda_{\text{wcf}}}, \quad (9)$$

$$T(r_{\text{out}}, \theta, t)|_{r=r_{\text{out}}+0} = T(r_{\text{out}}, \theta, t)|_{r=r_{\text{out}}-0},$$

здесь  $K_\lambda = \lambda_g / \lambda_{\text{wcf}}$ ,  $\varepsilon$  — интегральная степень черноты,  $\sigma$  — постоянная Стефана–Больцмана. Скорость реакции  $\text{C} + \text{O}_2 = \text{CO}_2 + 18,67$  МДж/кг вычислялась с использованием математического выражения закона Аррениуса

$$W_i = k_{\text{C}+\text{O}_2} \cdot \left[ 1 - \sum_{i=1}^n c_i(r_{\text{out}}, \theta, t) \right] \cdot \eta(r_{\text{out}}, \theta, t) \cdot \rho_g \cdot \exp\left(-\frac{E_{\text{C}+\text{O}_2}}{R \cdot T}\right). \quad (10)$$

При постановке задачи принималось, что водяной пар вступает в эндотермическое химическое взаимодействие с углем:  $\text{C} + \text{H}_2\text{O} = \text{CO} + \text{H}_2 - 118,485$  МДж/кг. Скорость этой реакции вычислялась из выражения [21]

$$W_{\text{C}+\text{H}_2\text{O}} = k_{\text{C}+\text{H}_2\text{O}} \cdot c_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \rho_s \cdot \exp(-E_i/R \cdot T). \quad (11)$$

Также принималось, что разложение топлива с выделением летучих начинается при достижении на поверхности частицы условия  $T_{\text{sur}} \geq T_{\text{std}}$  ( $T_{\text{sur}}$  — температура поверхности частицы,  $T_{\text{std}}$  — температура начала термического разложения). Процесс термического разложения описывается уравнением химической кинетики:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = [1 - \eta] \cdot k_{\text{c} \rightarrow \text{vol}} \cdot \exp\left(-\frac{E_{\text{c} \rightarrow \text{vol}}}{R \cdot T}\right), \quad (12)$$

где  $\eta$  — массовая доля разложившегося материала,  $k$  — предэкспоненциальный множитель ( $\text{с}^{-1}$ ),  $E$  — энергия активации процесса термического разложения (Дж/(моль)),  $R$  — универсальная газовая постоянная (Дж/(моль·К)). Скорость пиролиза рассчитывалась с использованием выражения

$$W_i = V^{\text{daf}} \cdot [1 - \eta] \cdot k_{\text{c} \rightarrow \text{vol}} \cdot \rho_{\text{wcf}} \cdot \exp\left(-\frac{E_{\text{c} \rightarrow \text{vol}}}{R \cdot T}\right), \quad (13)$$

где  $V^{\text{daf}}$  — содержание летучих. Продукты термической деструкции и химического взаимодействия твердого остатка и водяных паров вдуваются в пристенную область. Формируется газовая смесь, воспламеняющаяся при достижении критических значений температуры и концентрации горючего [21]. Химический состав летучих приведен в табл. 1. Период времени от начала теплового воздействия на частицу до начала интенсивного

химического взаимодействия парогазовой смеси с окислителем считается временем задержки воспламенения. При этом количество теплоты, выделяемой в результате окисления горючего, должно превышать количество теплоты поступающей от источника нагрева (внешняя среда). В непосредственной близости от поверхности частицы учитывалось протекание трех наиболее значимых [20] реакций:

1.  $\text{H}_2 + 0,5\text{O}_2 = \text{H}_2\text{O} + 141900 \text{ кДж/кг}$ ,
2.  $\text{CO} + 0,5\text{O}_2 = \text{CO}_2 + 10090 \text{ кДж/кг}$ ,
3.  $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 = 2\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 + 55000 \text{ кДж/кг}$ .

Скорость этих реакций вычислялась из математического выражения закона Аррениуса

$$W_i = k_i \cdot c_i(r, \theta, t) \cdot \left(1 - \sum_{i=1}^n c_i(r, \theta, t)\right) \cdot \rho_g \cdot \exp(-E_i/(R \cdot T)). \quad (14)$$

Концентрации компонентов парогазовой смеси ( $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ) в пристенной области рассчитывались при решении уравнений диффузии для соответствующего компонента реакции:

$$\rho_g \cdot \frac{\partial c_i}{\partial t} + \rho_g \cdot \omega(r) \cdot \frac{\partial c_i}{\partial r} = \frac{\rho_g}{r^2} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 D_i \frac{\partial c_i}{\partial r} \right) + \frac{\rho_g}{r \cdot \sin \theta} \cdot \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \frac{\sin \theta}{r} D_i \frac{\partial c_i}{\partial \theta} \right) - \sum_{i=1}^3 W_i, \quad (15)$$

где  $c$  — концентрация продуктов пиролиза,  $D$  — коэффициент диффузии ( $\text{м}^2/\text{с}$ ). Как известно [33], при термическом разложении угля происходит деструкция, сопровождающаяся увеличением размеров пор. В этих условиях при постановке задачи учитывалось изменение плотности угля ( $\rho_3$ ) и пористости ( $\Pi$ ) топлива:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = (\rho - \rho_{\text{etd}}) \cdot k_{w \rightarrow \text{vol}} \cdot \exp\left(-\frac{E_{w \rightarrow \text{vol}}}{R \cdot T}\right), \quad (16)$$

$$\Pi_p = \Pi_0 \cdot \rho - \rho_0 / \rho_{\text{etd}} - \rho_0. \quad (17)$$

Система уравнений (1–17) решалась при следующих начальных

$$t=0 \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} T(r, \theta, 0) = T_0 = 298 \text{ K}, \quad p(r, \theta, 0) = p_{\text{atm}}, \\ \rho(r, \theta, 0) = \rho_0, \quad \eta(r, \theta, 0) = 0 \\ T(r, \theta, 0) = T_g, \quad c_i(r, \theta, 0) = 0; \quad r_{\text{out}} < r < r_g, \quad 0 < \theta < \pi \end{array} \right\} \quad 0 < r < r_{\text{out}}, \quad 0 < \theta < \pi,$$

и граничных условиях

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=0, 0 < \theta < \pi} = 0, \quad \left. \frac{\partial T}{\partial \theta} \right|_{\theta=0, 0 < r < r_g} = 0, \quad \left. \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right|_{r=r_g, 0 < \theta < \pi} = 0, \quad \left. \frac{\partial p}{\partial r} \right|_{r=0, 0 < \theta < \pi} = 0, \quad \left. \frac{\partial p}{\partial \theta} \right|_{\theta=0, 0 < r < r_{\text{out}}} = 0, \quad (18)$$

$$p \Big|_{r=r_{\text{out}}, 0 < \theta < \pi} = p_{\text{atm}}, \quad \left. \frac{\partial c_i}{\partial r} \right|_{r=r_{\text{out}}, 0 < \theta < \pi} = \frac{W_i}{\rho_g \cdot D_i}, \quad \left. \frac{\partial^2 c}{\partial r^2} \right|_{r=r_g, 0 < \theta < \pi} = 0, \quad \left. \frac{\partial c}{\partial \theta} \right|_{\theta=0, 0 < r < r_g} = 0.$$

Теплопроводность, теплоемкость и плотность влажной и «обезвоженной» частей водугольного топлива рассчитывались с учетом объемных долей компонент —

$$\lambda_{\text{wcf}} = \begin{cases} \lambda_1, & r \leq r_{\text{eva}} \\ \lambda_2, & r > r_{\text{eva}} \end{cases}, \quad C_{\text{wcf}} = \begin{cases} C_1, & r \leq r_{\text{eva}} \\ C_2, & r > r_{\text{eva}} \end{cases}, \quad \rho_{\text{wcf}} = \begin{cases} \rho_1, & r \leq r_{\text{eva}} \\ \rho_2, & r > r_{\text{eva}} \end{cases},$$

тогда

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= \varphi_3 \cdot \lambda_3 + \varphi_4 \cdot \lambda_4, & \lambda_2 &= \varphi_3 \cdot \lambda_3 + \varphi_5 \cdot \lambda_5, \\ C_1 &= \varphi_3 \cdot C_3 + \varphi_4 \cdot C_4, & C_2 &= \varphi_3 \cdot C_3 + \varphi_5 \cdot C_5, \\ \rho_1 &= \varphi_3 \cdot \rho_3 + \varphi_4 \cdot \rho_4, & \rho_2 &= \varphi_3 \cdot \rho_3 + \varphi_5 \cdot \rho_5, \end{aligned} \quad (19)$$

где  $\varphi$  — объемная доля соответствующего компонента топлива; нижние индексы: 3 — уголь, 4 — вода, 5 — водяные пары. Теплофизические характеристики парогазовой смеси рассчитывались также с учетом объемных долей компонент:

$$\begin{aligned} \lambda_g &= \sum_{i=1}^n \varphi_i \lambda_i + \left(1 - \sum_{i=1}^n \varphi_i\right) \cdot \lambda_g, & C_g &= \sum_{i=1}^n \varphi_i C_i + \left(1 - \sum_{i=1}^n \varphi_i\right) \cdot C_g, \\ \rho_g &= \sum_{i=1}^n \varphi_i \rho_i + \left(1 - \sum_{i=1}^n \varphi_i\right) \cdot \rho_g. \end{aligned} \quad (20)$$

Объемные доли компонентов парогазовой смеси вычисляются из их массовых концентраций:

$$\varphi_i = (c_i / \rho_i) / \sum_{i=1}^n \frac{c_i}{\rho_i}. \quad (21)$$

### Исходные данные

Исследовалось загорание частиц водоугольного топлива, выполненных из каменных и бурых углей. Теплофизические и термохимические характеристики последних приведены в табл. 2. Как было указано ранее, нагрев угля приводит к термическому разложению органической части топлива и сопровождается выходом летучих. Состав последних приведен в табл. 1. Термохимические константы реакций пиролиза, паровой газификации и воспламенения приведены в табл. 3. Численные исследования проведены при следующих исходных данных:  $T_0 = T(r, \theta, t) = 298 \text{ К}$ ,  $p_a = 101325 \text{ Па}$ ,  $\eta_0 = 0$ ,  $\mu = 0,018 \text{ кг/моль}$ ,  $K_p = 10^{-11} \text{ м}^2$ .

### Метод решения уравнений

Сформулированная начально-краевая задача решалась методом конечных разностей [41, 42]. Система (1)–(17) реализовывалась в период времени до достижения условий,

Таблица 2  
Теплофизические и термохимические характеристики углей [26, 34, 35]

Каменные угли Донецкого угольного бассейна						
Марка угля (месторождение)	$C_p$ , Дж/(кг·К)	$Q_{c \rightarrow vol}$ , Дж/кг	$\lambda$ , Вт/(м·К)	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$V^{daf}$ , %	$C^r$ , %
Длиннопламенный	1150	176,7	0,116	1253	46	76
Газовый	1130	193,8	0,123	1264	39	83
Жирный	1090	282,6	0,119	1260	26	86
Коксовый	1070	287,2	0,128	1254	28	88
Отощенный спекающийся	1050	296,4	0,134	1274	33	89
Тощий	1000	274,2	0,134	1242	15	90
Полуантрацит	946	193	0,149	1307	9	91
Антрацит	928	187,6	0,149	1389	1,5	95
Бурые угли						
Марка угля (месторождение)	$C_p$ , Дж/(кг·К)	$Q_{c \rightarrow vol}$ , Дж/кг	$\lambda$ , Вт/(м·К)	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$V^{daf}$ , %	$C^r$ , %
Березовское	1150	431	0,151	1200	48	34,3
Гусиноозерское	1140	451	0,140	1200	43	39,4
Ново-Дмитровское	1130	196	0,151	1200	43	44,4
Ирша-Бородинское	1170	490	0,140	120	47	37

Таблица 3

Константы термохимических реакций

Реакция	$E_p$ , Дж/(моль)	$k_p$ , 1/с	Работы
Термическое разложение $c \rightarrow vol$	$31,0 \cdot 10^3$	24 — бурый уголь	[36]
	$56,1 \cdot 10^3$	178 — жирный уголь	
	$56,9 \cdot 10^3$	131,8 — коксовый уголь	
	$60,6 \cdot 10^3$	212 — тощий уголь	
$H_2O + C = CO + H_2$	$220 \cdot 10^3$	$2,07 \cdot 10^7$	[37]
$CO + O_2 = CO_2$	$200,0 \cdot 10^3$	$2,50 \cdot 10^{12}$	[38]
$H_2 + 0,5 \cdot O_2 = H_2O$	$105,0 \cdot 10^3$	$1,13 \cdot 10^{17}$	[39]
$CH_4 + O_2 = CO_2 + 2 \cdot H_2O$	$35 \cdot 10^3$	$5,1 \cdot 10^{14}$	[40]

адекватных условиям зажигания твердых, жидких и гетерогенных топлив [16]. Для определения момента времени, соответствующего зажиганию газовой смеси, использовался критерий, введенный в теорию зажигания Д.А. Франк–Каменецким [43], а именно: «Теплота, выделяющаяся в результате химической реакции, в зоне ее протекания превышает теплоту, подводимую внешней средой в эту зону за счет теплопроводности, излучения и конвекции».

Необходимо отметить, что расчеты процессов зажигания топлива при наличии интенсивных фазовых превращений (в частности испарения) являются одними из самых сложных в теории горения. Это связано с тем, что испарение воды протекает в очень узкой (много меньше линейного размера частицы) области — фронте испарения. При этом, как правило, тепловые эффекты фазовых переходов очень высоки (до  $2,5 \cdot 10^6$  Дж/кг). В результате во влажной частице возникает внутренний локальный сток теплоты. Численное исследование усложняется тем, что временные масштабы процессов испарения и зажигания существенно отличаются: зажигание — быстропротекающий процесс, испарение — существенно более медленный. По этой причине для решения поставленной задачи был разработан специальный алгоритм, основанный на решении задачи испарения воды методом неявного выделения фронта фазового перехода [44].

### Результаты исследований и их обсуждение

На рис. 2 приведены времена задержки зажигания капелек водоугольного топлива, выполненных из каменных углей различных марок (см. табл. 1): длиннопламенный (Д), газовый (Г), жирный (Ж), коксовый (К), отощенный спекающийся (ОС), тощий (Т),

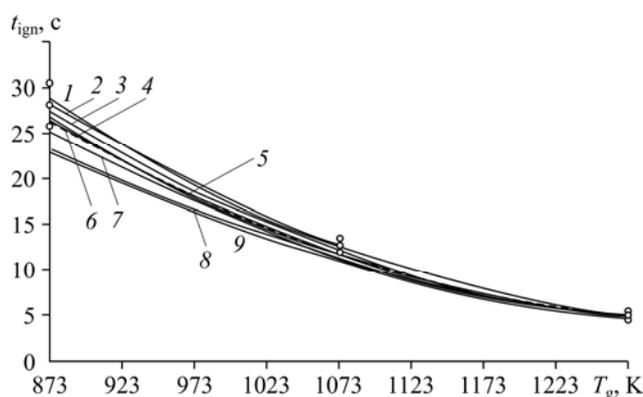


Рис. 2. Зависимость времен задержки воспламенения частиц водоугольного топлива, выполненных из углей различных марок, от температуры внешней среды.

Марки угля: 1 — Ж, 2 — Д, 3 — К, 4 — Г, 5 — Д, 6 — ОС, 7 — Т, 8 — ПА, 9 — А; 2 — эксперимент [20], 1, 3–9 — численное решение системы (1)–(33); размер частиц ВУД —  $3 \cdot 10^{-3}$  м.

полуантрацит (ПА) и антрацит (А). С целью верификации математической модели на рисунке приведены экспериментальные [19] значения задержки воспламенения частиц ( $t_{ign}$ ) ВУТ на основе длиннопламенного угля. Можно отметить, что теоретические и экспериментальные времена задержки воспламенения достаточно надежно (в пределах доверительного интервала  $\pm 17\%$ ) согласуются.

Анализ зависимостей показывает, что в условиях относительно высоких температур ( $T_g \geq 1073$  К) времена задержки зажигания частиц ВУТ, выполненных из каменных углей различных марок, отличаются незначительно (не более 10%). В то же время при низких температурах внешней среды ( $T_g \approx 1073$  К) значения  $t_{ign}$  для ВУТ на основе каменных углей отличаются существенно. Последнее, очевидно, свидетельствует о том, что при воспламенении капель ВУТ определяющую роль играют теплофизические процессы (инертный нагрев за счет радиации и конвекции, испарение воды), протекающие на стадии термической подготовки, а не кинетика зажигания. Скорее всего длительность периода зажигания определяется сочетанием теплофизических (теплопроводность ( $\lambda$ ), теплоемкость ( $C$ ), плотность ( $\rho$ )) и термохимических (теплота термического разложения) свойств.

Анализ зависимостей показывает, что частицы ВУТ на основе антрацита и полуантрацита воспламеняются быстрее остальных практически во всем диапазоне температур внешней среды. Это обусловлено малым значением теплоемкости топлива и высоким содержанием углерода. Медленнее всего зажигаются частицы ВУТ, выполненные из жирных углей. Последнее связано с более высокими значениями теплоемкости и тепловой термического разложения базового топлива.

На рис. 3 приведены времена задержки воспламенения частицы ВУТ на основе бурых углей в зависимости от температуры внешней среды. Также с целью верификации математической модели в графическом виде представлен сравнительный анализ экспериментальных и теоретических значений  $t_{ign}$ . Последний показал достаточно надежное их соответствие. Проанализировав данные зависимости, можно отметить, что быстрее всего воспламеняются топливные частицы, подготовленные из углей Новодмитровского месторождения. Это объясняется, во-первых, низкими значениями теплоемкости базового топлива и теплотой термического разложения по сравнению с другими углями, а во-вторых, содержанием достаточно большого количества летучих и углерода в структуре угля Новодмитровского месторождения.

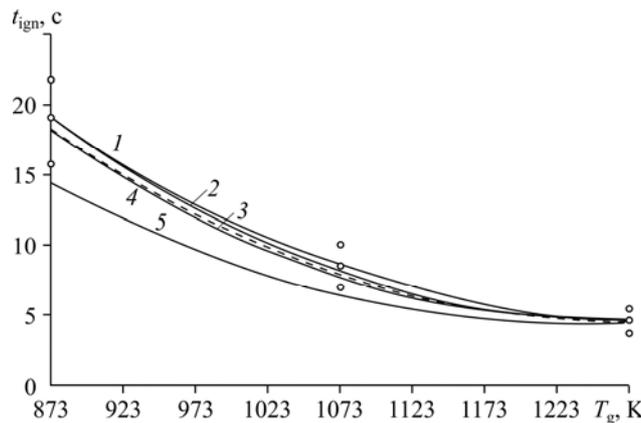


Рис. 3. Времена задержки воспламенения частиц водоугольного топлива, выполненных из бурых углей, в зависимости от температуры.

1 — Березовское месторождение, 2 — Ирша-Бородинский уголь, 3 — Березовское месторождение, 4 — Гусиноозерское месторождение, 5 — Новодмитровское месторождение; 1 — эксперимент [20], 2-5 — численное решение системы (1)–(21).

Сравнение зависимостей  $t_{\text{ign}}(T)$  на рис. 2 и 3 показывает, что горение капель водоугольного топлива на основе бурого угля начинается намного быстрее, чем на основе каменных углей. Это обусловлено, в первую очередь, более высоким содержанием летучих у бурых углей. Результаты сравнительного анализа времен задержки зажигания, полученных численно и экспериментально в работе [20], показали их удовлетворительное соответствие.

На рис. 4 приведены зависимости температуры поверхности  $T_{\text{sur}}$  частиц ВУТ, выполненных из каменных углей различных марок, от времени. Температура внешней среды  $T_g = 1273$  К. Анализ зависимостей  $T_{\text{sur}} = f(t)$  показывает, что весь период индукции можно условно разделить на ряд последовательных стадий: инертный прогрев, обезвоживание частицы водоугольного топлива, зажигание. Начальный период времени (инертный радиационно-конвективный нагрев) составляет не более 18 %  $t_{\text{ign}}$  и характеризуется быстрым ростом температуры. После этого инициируется процесс интенсивного испарения воды. В результате в частице формируется высокопористый угольный каркас с низкими теплопроводностью и теплоемкостью. При этом рост температуры замедляется. Последнее обусловлено снижением радиационного теплового потока от внешней среды к топливной частице. Можно отметить, что период удаления воды из частицы составляет до 70 % от общего времени зажигания. Это, скорее всего, связано с высоким эндотермическим эффектом фазового перехода (до 2,5 МДж/кг), что обуславливает замедление темпа роста  $T_{\text{sur}}$ . На рис. 4 можно отметить характерный излом кривой  $T_{\text{sur}}(t)$  в момент времени  $t \approx 0,9 \cdot t_{\text{ign}}$ , который соответствует моменту воспламенения. Кривая  $T_{\text{sur}}(t)$  принимает экспоненциальный характер ( $\partial T / \partial t \approx \exp(-E/(R \cdot T))$ ).

На рис. 5 представлены временные графики изменения температуры поверхности частиц ВУТ, выполненных из бурых углей, при температуре внешней среды  $T_g = 1273$  К. По результатам анализа можно сделать вывод, аналогичный выводу из рис. 4. Следует отметить, что температура поверхности частиц ВУТ, выполненных из бурых углей Ново-Дмитровского месторождения, растет значительно быстрее, чем при зажигании других топлив. Как отмечалось, это связано с низкими теплоемкостью и тепловым эффектом термического разложения. Результаты, приведенные на рис. 4 и 5, полностью коррелируют с данными исследований [16–20], а также с зависимостями, полученными в работах [45] и [46].

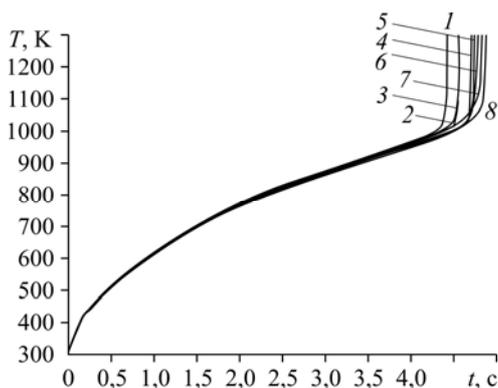


Рис. 4. Зависимость температуры поверхности частицы водоугольного топлива, приготовленной из каменного угля различных марок, от времени.  
1 — ПА, 2 — А, 3 — Т, 4 — ОС, 5 — К, 6 — Г, 7 — Д, 8 — Ж.

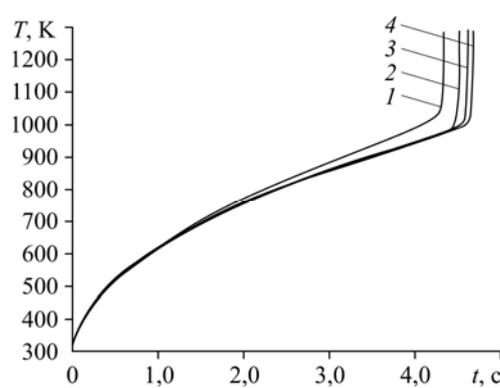


Рис. 5. Зависимость температуры поверхности частицы водоугольного топлива (на основе бурых углей) от температуры.  
1 — Ново-Дмитровское месторождение, 2 — Березовское, 3 — Гусиноозерское, 4 — Ирша-Бородинское.

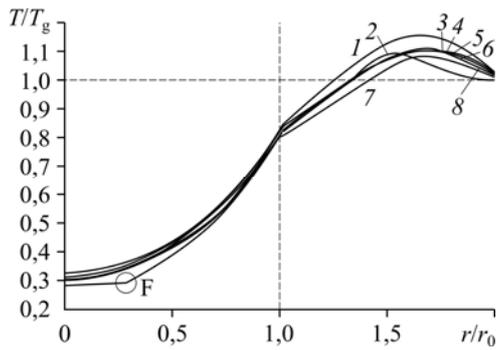


Рис. 6. Распределение температуры в системе «частица ВУТ – высокотемпературная среда» в момент воспламенения капле топлива, полученных на основе каменного угля. Температура внешней среды  $T_g = 1273$  К; 1 — Ж, 2 — А, 3 — ПА, 4 — Т, 5 — ОС, 6 — К, 7 — Д, 8 — Г; F — фронт испарения.

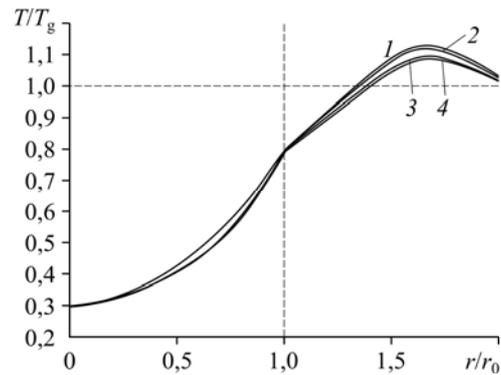


Рис. 7. Распределение температуры в системе «частица ВУТ–высокотемпературная среда» в момент воспламенения капле топлива, полученных на основе бурого угля. 1 — Гусиноозерское месторождения, 2 — Ирша-Бородинское, 3 — Ново-Дмитровское, 4 — Березовское.

На рис. 6 приведены распределения температур (в безразмерном виде) в системе «водоугольная частица–газовая среда» в момент воспламенения летучих капле ВУТ, выполненных из каменных углей. Можно отметить, что зона зажигания газообразных продуктов пиролиза находится на некотором удалении (примерно в половину диаметра капли ВУТ) от поверхности частицы. При этом локация зоны воспламенения не зависит от вида базового топлива и, соответственно, от содержания летучих. Можно обосновано предположить, что на механизм инициирования горения существенно влияет конвекция продуктов пиролиза и водяных паров. В этом случае применение метода бесконечно тонкой «пленки» (по аналогии с [36]) в зонах зажигания водоугольных топлив недостаточно обосновано. Также отметим, что воспламенение летучих может происходить еще до полного испарения внутривлажной влаги топлива.

На рис. 7 показаны распределения безразмерных температур в системе «частица ВУТ–газовая среда» в момент газофазного воспламенения капли водоугольного топлива на основе бурых углей при температуре внешней среды  $T_g = 1273$  К. Анализ зависимостей рис. 7 позволяет сделать вывод, аналогичный рис. 6.

Анализ литературы по изложенной проблеме показал, что экспериментальные данные по временам задержки зажигания непосредственно коксового остатка отсутствуют. По этой причине проведен только параметрический анализ процесса инициирования горения углерода. На рис. 8 представлены времена задержки зажигания кокса угля. Анализ зависимостей  $t_{ign}(T_g)$  показывает, что кокс начинает гореть практически сразу после воспламенения летучих. Интервал между моментами времени воспламенения летучих и кокса не превышает 0,5 секунды. Такая тенденция сохраняется для частиц водоугольного топлива, выполненных как из каменных, так и из бурых углей. Характер зависимостей рис. 8 показывает, что степень метаморфизма угля оказывает существенное влияние на характеристики и условия зажигания. Так, в условиях относительно низких температур внешней среды ( $T_g < 1173$  К) капли ВУТ на основе бурого угля воспламеняются значительно быстрее (примерно на 50 %), чем топливо на основе каменного угля. Это обусловлено большим содержанием летучих. В условиях высоких температур ( $T_g \geq 1273$  К) отличие времен задержек воспламенения буроугольных и каменноугольных капле ВУТ незначительно. Это, вероятно, объясняется тем, что при высоких значениях  $T_g$  динамика

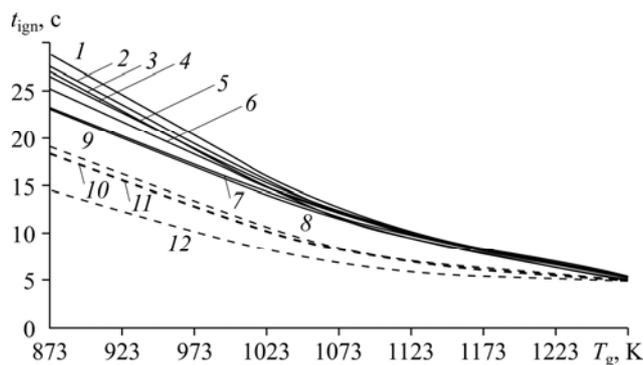


Рис. 8. Зависимость времен задержки воспламенения частиц водоугольного топлива, выполненных из углей различных марок, от температуры внешней среды.

Каменные угли: 1 — Ж, 2 — К, 3 — Г, 4 — Д, 5 — ОС, 6 — Т, 7 — ПА, 8 — А;  
 бурые угли: 9 — Ирша-Бородинский уголь, 10 — Гусиноозерское месторождение,  
 11 — Березовское месторождение, 12 — Новодмитровское месторождение;  
 размер частиц ВУД —  $3 \cdot 10^{-3}$  м.

процесса воспламенения контролируется не столько кинетикой зажигания, сколько теплофизическими процессами в период термической подготовки.

На рис. 9 приведены распределения температуры в системе «водоугольная частица–газовая среда» в момент зажигания коксового остатка при температуре внешней среды  $T_g = 1273$  К. В момент зажигания кокса температура в центре частицы составляет не менее 373 К. Соответственно можно утверждать, что кокс топливной частицы зажигается только после ее полного обезвоживания. Исключение составляет процесс зажигания капель ВУТ на основе длиннопламенного угля. Можно констатировать, что окисление такого топлива в условиях продолжающегося испарения будет существенно отличаться от горения сухих углей.

На рис. 10 представлены распределения температур в системе «частица ВУТ–высокотемпературная среда» в момент воспламенения топлива, выполненного из бурых углей при температуре внешней среды  $T_g = 1273$  К. Анализ зависимостей позволяет сделать аналогичный рис. 9 вывод о том, что кокс водоугольных частиц воспламеняется после обезвоживания основного слоя топлива. Это коррелирует с теоретическими результатами [16–18].

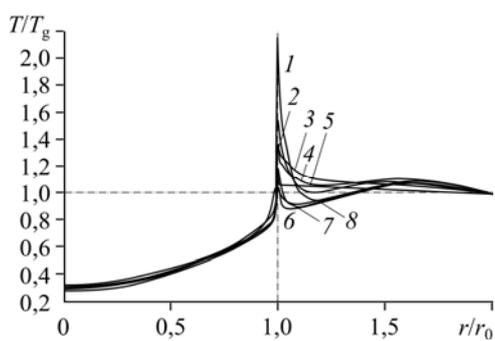


Рис. 9. Распределение температуры в системе «частица ВУТ–высокотемпературная среда» в момент воспламенения кокса топлива.

Водоугольное топливо на основе каменных углей различных марок:  
 1 — ОС, 2 — Ж, 3 — ПА, 4 — Т, 5 — ОС,  
 6 — К, 7 — Д, 8 — Г.

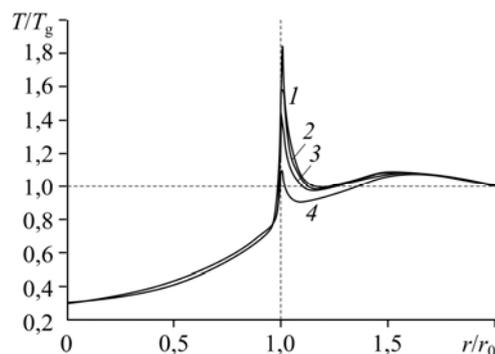


Рис. 10. Распределение температуры в системе «частица ВУТ – высокотемпературная среда» в момент воспламенения капель топлива, полученных на основе бурого угля.

1 — Гусиноозерское месторождения,  
 2 — Ирша-Бородинское, 3 — Березовское,  
 4 — Ново-Дмитровское.

## Выводы

Разработана новая математическая модель процесса воспламенения частицы водоугольного топлива, учитывающая степень метаморфизма угля, а также совместное протекание основных процессов тепло- и массопереноса в условиях интенсивных фазовых и термохимических превращений в период ее термической подготовки. По результатам моделирования установлены интегральные характеристики процесса воспламенения капель водоугольного топлива, выполненных из каменных и бурых углей различных марок. Сравнительный анализ времен задержки воспламенения, полученных теоретически и экспериментально [20], выявил их надежное соответствие.

Показано, что вид и марка угля может оказывать существенное влияние на характеристики и условия воспламенения. Установлено, что водоугольные частицы, выполненные из антрацита и полуантрацита, зажигаются быстрее (примерно на 20 %) капель ВУТ, приготовленных из других каменных углей. Медленнее всего воспламеняются капли ВУТ, образованные из жирных углей. Это обусловлено прежде всего меньшей теплоемкостью и большой теплопроводностью углей типа А и ПА по сравнению с Ж, а также относительно низким тепловым эффектом термического разложения топлива.

В условиях относительно низких температур внешней среды ( $T_g < 1173$  К) капли ВУТ на основе бурого угля воспламеняются значительно быстрее (примерно на 50 %), чем топливо на основе каменного угля. Это обусловлено большим содержанием летучих в буром угле. Необходимо отметить, что в условиях высоких температур ( $T_g \geq 1273$  К) отличие времен задержек воспламенения буроугольных и каменноугольных капель ВУТ незначительно. Таким образом, можно обосновано сделать вывод, что длительность периода индукции водоугольного топлива определяется не только кинетикой воспламенения, но и теплофизическими процессами, протекающими в период термической подготовки.

## Условные обозначения

$T$ — температура, К,	$K_p$ — коэффициент проницаемости угля, $m^2$ ,
$\sigma$ — постоянная Стефана–Больцмана, $Вт/(m^2 \cdot K^4)$ ,	$\nu$ — коэффициент динамической вязкости, Па·с,
$\alpha$ — коэффициент поглощения $1/m$ ,	$Q$ — тепловой эффект, Дж/кг,
$\varepsilon$ — интегральная степень черноты,	$\lambda$ — коэффициент теплопроводности, $Вт/(m \cdot K)$ ,
$p$ — давление, Па,	$C$ — теплоемкость, Дж/(кг·К),
$\eta$ — степень пиролиза топлива,	$c$ — концентрация,
$k$ — предэкспонент гетерогенной (м/с) или гомогенной (1/с) реакции,	$\rho$ — плотность, $кг/m^3$ ,
$U$ — скорость движения водяных паров в радиальном направлении, м/с,	$r$ — радиус, м,
$V$ — скорость движения водяных паров в азимутальном направлении, м/с,	$h_{spr}$ — параметр размазывания фронта испарения, м,
$M$ — содержание летучих,	$s$ — характерный размер поры, м,
	$t$ — время, с.

## Индексы

0 — начальный момент времени,	eva — граница раздела системы «влажное топливо–сухой углеродистый каркас»,
1 — область исходного топлива,	ign — зажигание,
2 — область сухого топлива,	out — внешний радиус частицы,
3 — уголь,	std — начало процесса термического разложения,
4 — вода,	etd — окончание процесса термического разложения,
5 — водяные пары,	sur — поверхность частицы,
f — температура замерзания воды,	c→vol — процесс термического разложения,
F — фронт испарения,	wcf — водоугольная суспензия,
g — высокотемпературный газ,	wat — вода,
c — коксовый остаток,	daf — сухое беззольное топливо,
i — номер реакции,	vol — летучие,
s — пар,	г — на горючую массу.
a — внешняя среда,	

## Список литературы

1. Longwell J.P., Rubin E.S., Wilson J. Coal: energy for the future // Prog. In Energy and Combust. Sci. 1995. Vol. 21, No. 4. P. 269–360.
2. Zheng D., Shi M. Multiple environmental policies and pollution haven hypothesis: evidence from China's polluting industries // J. of Cleaner Product. 2017. Vol. 141. P. 295–304.
3. Wang A., Lin B. Assessing CO2 emissions in China's commercial sector: determinants and reduction strategies // J. of Cleaner Product. 2017. Vol. 164. P. 1542–1552.
4. Саломатов В.В. Состояние и перспективы угольной и ядерной энергетик России (обзор) // Теплофизика и аэромеханика. 2009. Т. 16, № 4. С. 1–6.
5. Orlov A. Distributional effects of higher natural gas prices in Russia // Energy Policy. 2017. Vol. 109. P. 590–600.
6. Dong X., Pi G., Ma Zh.W., Dong C. The reform of the natural gas industry in the PR of China // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2017. Vol. 73. P. 582–593.
7. Campos F.A., Silva N.F., Pereir M.G., Freitas M.A.V. A review of Brazilian natural gas industry: challenges and strategies // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2017. Vol. 75. P. 1207–1216.
8. Kijo-Kleczkowska A. Combustion of coal–water suspensions // Fuel. 2011. Vol. 90. P. 865–877.
9. Gajewski W., Kijo-Kleczkowska A., Leszczyn J. Analysis of cyclic combustion of solid fuels // Fuel. 2009. Vol. 88. P. 221–234.
10. Essenhigh R.H., Mahendra K.M., Shaw D.W. Ignition of coal particles: a review // Combust. And Flame. 1989. Vol. 77, No. 1. P. 3–30.
11. Muto M., Yuasa K., Kurose R. Numerical simulation of ignition in pulverized coal combustion with detailed chemical reaction mechanism // Fuel. 2017. 190. P. 136–144.
12. Huang Z., Qin C., Gao J. Theoretical analysis on CWM drop combustion history // Proc. 8-th Intern. Symp. Coal Slurry Fuels Preparation and Utilization. USA, Orlando. Part 1. 1986. P. 343–358.
13. Matthews K.J., Jones A.R. The effect of coal composition on coal-water slurry combustion and ash deposition characteristics // Proc. 8-th Intern. Symp. Coal Slurry Fuels Preparation and Utilization. USA, Orlando. Pt 1. 1986. P. 388–407.
14. Salomatov V.V., Syrodoy S.V., Gutareva N.Y. Modelling of heat and mass transfer to solve the problem of particle ignition water-coal fuel // IOP Conf. Series: Materials Science and Engng. 2014. Vol. 66. P. 012040-1–012040-6.
15. Саломатов В.В., Кравченко И.В. Теоретическое исследование горения капли водоугольного топлива. Ч. I. Стадия прогрева // Горение и плазмохимия. 2007. Т. 5, № 3. С. 178–188.
16. Кузнецов Г.В., Саломатов В.В., Сыродой С.В. Численное моделирование зажигания частиц водоугольного топлива // Физика горения и взрыва. 2015. Т. 51, № 4. С. 11–19.
17. Кузнецов Г.В., Саломатов В.В., Сыродой С.В. Влияние условий теплообмена на характеристики зажигания частиц водоугольного топлива // Теплоэнергетика. 2015. № 10. С. 16–29.
18. Сыродой С.В., Кузнецов Г.В., Саломатов В.В. Влияние формы частицы на характеристики воспламенения водоугольного топлива // Химия твердого тела. 2015. № 6. С. 28–36.
19. Salomatov V.V., Syrodoy S.V., Gutareva N.Yu. Concentration organic components in the hydrocarbon fuel particles conditions and characteristic of ignition // EPJ Web of Conferences. 2014. Vol. 76. No. 01018.
20. Syrodoy S.V., Kuznetsov G.V., Zhakharevich A.V., Gutareva N.Yu., Salomatov V.V. The influence of the structure heterogeneity on the characteristics and conditions of the coal–water fuel particles ignition in high temperature environment // Combust. and Flame. 2017. Vol. 80. P. 196–206.
21. Франк-Каменецкий Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. М.: Изд-во АН СССР, 1947. 502 с.
22. Сполдинг Д.Б. Основы теории горения. М.: Государственное энергетическое издательство, 1959. 320 с.
23. Kook Y.A., Seung W.B., Chang E.C. Investigation of a coal-water slurry droplet exposed to hot gas stream // Combust. Sci. and Techn. 2007. Vol. 97, No. 4. P. 429–448.
24. Hertz H. On the evaporation of liquids, especially mercury, in vacuo // Annals of Physics. 1882. Vol. 17, No. 177. P. 12.
25. Бабий В.И., Горение угольной пыли и расчет пылеугольного факела. М.: Энергоатомиздат, 1986. 208 с.
26. Агроскин А.А., Глейбман В.Б. Теплофизика твердого топлива. М.: Недра, 1980. 256 с.
27. Канторович Б.В. Основы теории горения и газификации твердого топлива. М.: Изд-во АН СССР, 1958. 601 с.
28. Липович В.Г. Химия и переработка угля. М.: Химия, 1988. 336 с.
29. Хащенко А.А., Вечер О.В., Дискаева Е.И. Исследование температурной зависимости скорости испарения жидкостей со свободной поверхности и скорости кипения жидкости на твердой поверхности нагрева // Изв. Алтайского гос. ун-та. 2016. Т. 89, № 1. С. 84–87.
30. Абрамович Г.Н. Теория турбулентных струй. М.: Физматгиз, 1960. 715 с.
31. Энхжаргал Х., Саломатов В.В. Математическое моделирование термоподготовки и горения угольной частицы. V. Стадия выгорания // Инж.-физ. журн. 2011. Т. 84, № 4. С. 836–841.
32. Maksimov V.I. Nagornova T.A. Influence of heatsink from upper boundary on the industrial premises thermal conditions at gas infrared emitter operation // EPJ Web of Conferences. 2014. Vol. 76, No. 01006.

33. Шендрик Т.Г. Формирование пористой структуры бурого угля при термоллизе с гидроксидом калия // Химия твердого тела. 2009. № 5. С. 51–55.
34. Агроскин А.А. Физические свойства углей. М.: Metallurgizdat, 1961. 308 с.
35. НПО ЦКТИ-ВТИ. Тепловой расчет котлов (Нормативный метод) Изд. 3-е, перераб. и доп. СПб.: Изд. НПО ЦКТИ, 1998. 256 с.
36. Померанцев В.В. Основы практической теории горения. Л.: Энергоатомиздат, 1986. 312 с.
37. Gremyachkin V.M., Förtsch D., Schnell U., Hein K.R.G. A model of the combustion of a porous carbon particle in oxygen // Combust. and flame. 2002. Vol. 130, No. 3. P. 161–170.
38. Mantzaras J. Catalytic combustion of syngas // Combust. Sci. and Technology. 2008. Vol. 180. P. 1137–1168.
39. Jian W.C., Wen J., Lu S. Guo J. Single-step chemistry model and transport coefficient model for hydrogen combustion // Sci. China. Tech. Sci. 2012. Vol. 55. P. 2163–2168.
40. Zhang X., Wang T., Xu J., Zheng S., Hou X. Study on flame-vortex interaction in a spark ignition engine fueled with methane/carbon dioxide gas // J. of the Ener. Inst. 2018. Vol. 91. P. 133–144.
41. Roache P.J. Computational fluid dynamics. Albuquerque: Hermosa Publishers, 1976. 446 p.
42. Самарский А.А. Локально-одномерные разностные схемы на неравномерных сетках // Журн. вычисл. матем. и матем. физ. 1963. Т. 3, № 3. С. 431–466.
43. Франк–Каменецкий Д.А. Распределение температур в реакционном сосуде и стационарная теория теплового взрыва // Журн. физ. химии. 1939. Т. 13, № 6. С. 738–755.
44. Самарский А.А., Моисеенко Б.Д. Экономичная схема сквозного счета для многомерной задачи Стефана. // Журн. вычисл. матем. и матем. физ. 1965. Т. 5, № 5. С. 816–827.
45. Франк–Каменецкий Д.А. К диффузионной теории гетерогенных реакций // Журн. физ. химии. 1939. Т. 13, № 6. С. 756–758.
46. Тодес О.М. Теория теплового взрыва. I. Тепловой взрыв реакции «нулевого» порядка // Журн. физ. химии. 1939. Т. 13, № 7. С. 868–879.

*Статья поступила в редакцию 15 февраля 2018 г.,  
после доработки — 13 апреля 2018 г.*