УДК 544.452.14

Влияние фильтрационного теплопереноса на характеристики и условия воспламенения частиц водоугольного топлива^{*}

С.В. Сыродой¹, В.В. Саломатов²

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет ²Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

E-mail: ssyrodoy@yandex.ru

Приведены результаты теоретических исследований влияния процесса фильтрации смеси газообразных продуктов пиролиза и водяного пара на динамику зажигания частиц водоугольного топлива в условиях высокотемпературного нагрева. В рамках разработанной математической модели проведено прогностическое моделирование процессов воспламенения капель водоугольного топлива в условиях, соответствующих топочным пространствам (характеризующимся интенсивным радиационно-конвективным нагревом) типичных котельных агрегатов. Сравнительный анализ экспериментальных (установленных ранее) и теоретических значений времен задержек воспламенения (t_{ign}) показал их хорошее соответствие. По результатам математического моделирования установлено, что фильтрация водяных паров и летучих оказывает существенное влияние (до 40 %) на характеристики и условия воспламенения частицы водоугольного топлива. Показано, что увеличение скорости движения парогазовой смеси в пористой структуре топлива приводит к росту времени задержки его зажигания. Проанализировано влияние ограничений «упрощенной» модели фильтрационного теплопереноса на прогностические оценки характеристик воспламенения частиц водоугольного топлива. Показано, что применение относительно простых моделей фильтрационного теплообмена не приводит к значительным погрешностям расчета времен задержек воспламенения.

Ключевые слова: водоугольное топливо, зажигание, фильтрация, внутренний тепло- и массоперенос, время задержки воспламенения.

Введение

Как показывают многочисленные исследования, к которым, например, относятся [1–3], водоугольное топливо (ВУТ) является одним из наиболее перспективных энергоносителей в ближайшем и, очевидно, отдаленном будущем. В такой экономической сверхдержаве, как Китай, вырабатывается до 55 ГВт тепловой и электрической энергии при использовании водоугольных топлив [4]. Такая востребованность обусловлена существенными преимуществами (в первую очередь экологическими и экономическими) применения технологии ВУТ [5] перед использованием традиционных твердых (уголь) и жидких (мазут) энергоносителей. При этом следует отметить, что ВУТ применяется, как правило, в качестве сырья для производства синтез-газа. Энергетических установок

^{*} Исследование выполнено за счет гранта РНФ (проект № 18-79-10015).

[©] Сыродой С.В., Саломатов В.В., 2019

прямого (камерного) сжигания ВУТ пока мало, и они в основном имеют низкую или среднюю мощности (производительность менее 125 МВт) [6].

На основании анализа немногочисленных результатов математического моделирования зажигания и горения капель ВУТ [7-9] можно сделать вывод, что главной объективной причиной слабой внедрённости водоугольного топлива в общий баланс тепло- и электрогенерации является недостаточная проработанность физического описания и математической базы процессов тепло- и массопереноса, протекающих при зажигании капель водоугольного топлива. Разработанные к настоящему времени прогностические модели [10-16] не позволяют в полной мере проводить математическое моделирование процессов зажигания частиц ВУТ в условиях, соответствующих топочным пространствам котельных агрегатов, в связи с тем, что они, как правило, базируются на существенных упрощениях. Так, в работе [10] была приведена математическая модель, основанная на решении «нульмерного» уравнения теплопроводности. Граница фазового перехода фиксировалась на поверхности частицы. Критерием воспламенения являлось условие прогрева частицы до температуры зажигания, известной из эксперимента. В результате были получены аналитические зависимости для расчета характеристик и условий зажигания ВУТ. Однако применение таких моделей, как было установлено в исследовании [11], возможно только в случае сжигания частиц микронного класса с характерным размером $\delta \leq 1.10^{-4}$ м. Модели, представленные в работах [12–16], являются существенно более сложными по сравнению с предложенными в [10]. Они базируются на представлении о процессе зажигания частицы ВУТ как совокупности взаимосвязанных, но отдельных стадий: инертный нагрев капли, испарение воды, зажигание кокса, горение коксового остатка. Такой способ моделирования позволяет получать приближенно-аналитические решения [12–15] довольно сложной нелинейной задачи зажигания капли топлива, применимые для инженерных расчетов. Процесс фильтрации водяных паров в процессе сушки в работах [12–16] не рассматривался. Необходимо указать, что в период индукции все теплофизические (нагрев капли за счет излучения и конвекции, испарение воды) и термохимические (пиролиз угля, взаимодействие водяных паров и углерода) процессы протекают одновременно. Также стоит отметить, что использование результатов математического моделирования [12-16] при проведении опытно-конструкторских работ требует высокой фундаментально-математической подготовки инженерно-конструкторского персонала, поэтому применение моделей [12-16] при прогнозировании процессов воспламенения капель ВУТ в условиях, соответствующих камерам сгорания, не всегда возможно.

Наиболее проработанными в части описания физических процессов являются модели [17-21]. Они представляют собой систему нестационарных дифференциальных уравнений в частных производных, которые описывают основные процессы тепло- и массопереноса, протекающие совместно в индукционный период в условиях интенсивных фазовых (испарение воды) и термохимических (термическое разложение угля, взаимодействие водяных паров и углерода кокса, воспламенение летучих) превращений. В рамках этих моделей проанализировано влияние достаточно большой группы значимых при расчете времени задержки воспламенения факторов (например, условий теплообмена [18], формы частицы [19], гетерогенности пористой структуры топлива [20], концентрации твердой горючей компоненты [21]) на динамику воспламенения. Однако при решении задач [17-21] предполагалось, что процесс зажигания летучих протекает непосредственно на поверхности топлива. При этом распределение концентрации и температуры газовой среды в пристенной к поверхности частицы ВУТ области не рассчитывалось, в то время как из работ [22] и [23] известно, что при зажигании твердых топлив значимую роль в процессе инициирования горения газов играет диффузия. Также можно отметить, что при применении постановок [17-21] не анализировалось влияние фильтрации водяных паров и газообразных продуктов пиролиза на характеристики зажигания частиц ВУТ.

Следует отдельно выделить математическую модель [24], описывающую процесс воспламенения водоугольной частицы в ее малой окрестности. Здесь учитывалось испарение воды, термическое разложение органической части угля, выход летучих и диффузия продуктов пиролиза во внешней газовой среде. Однако фазовый переход (парообразование) рассматривался в рамках гипотезы о стационарности значения температуры во фронте испарения. В то же время еще в 1882 году было установлено [25], что скорость испарения жидкости зависит от температуры фронта фазового перехода и концентрации паров у поверхности парообразования. Также стоит отметить, что модель [24] базируется на гипотезе о «мгновенном» выходе продуктов пиролиза и водяных паров на поверхность частицы, без учета сопротивления среды их движению сквозь структуру пористого угольного каркаса.

Обобщая вышеизложенное, можно заключить, что проведенные ранее исследования не рассматривали в качестве основной задачи оценку влияния фильтрационного тепло- и массопереноса на характеристики и условия воспламенения. Однако, как было установлено при исследовании процессов теплопереноса в пористых средах [26–29], фильтрация жидкого или газообразного теплоносителя (например, глицерина [29], продуктов пиролиза каучука [26]) может приводить к существенному снижению температуры пористого твердого каркаса. Отсутствие описания этого значимого фактора при проведении процедуры прогностического моделирования процессов зажигания капель в начальный период времени, а затем (после удаления влаги) частиц водоугольного топлива может привести к значительным погрешностям вычисления времен задержки воспламенения. Этим обусловлена цель настоящей работы — выполнение математического моделирования зажигания частиц (капель в начальный период времени) водоугольного топлива в условиях высокотемпературного нагрева и оценки влияния внутреннего фильтрационного теплопереноса на характеристики и условия воспламенения.

1. Постановка задачи

1.1. Физическая постановка задачи

Математическая модель базируется на экспериментально установленных [20, 30] закономерностях физических процессов, имеющих место при высокотемпературном нагреве частиц ВУТ. При решении задачи зажигания принята физическая модель, учитывающая основные процессы тепло- и массопереноса (включая фильтрационный), протекающие совместно в условиях интенсивных фазовых (испарение воды) и термохимических



Рис. 1. Схема области решения задачи.

I — исходная (водонасыщенная) часть топлива, 2 — сухой угольный каркас,
 3 — граница раздела системы «сухой уголь-исходное топливо», 4 — условная граница раздела системы «сухой уголь-пиролизированный уголь», 5 — зона взаимодействия газообразных продуктов пиролиза и окислителя, 6 — высокотемпературный газ, 7 — уголь в условиях термического разложения.

(термическое разложение, термохимическое взаимодействие углерода кокса и водяных паров, зажигание) превращений в индукционный период (рис. 1).

При постановке задачи принято, что частица ВУТ вводится в высокотемпературную окислительную среду (воздух) и нагревается за счет конвекции и излучения. При нагреве инициируется 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, охлаждая его, и вступают в термохимическое взаимодействие с углеродом кокса, в результате образуются горючие газообразные продукты — СО и H₂. Дальнейший нагрев частицы приводит к термическому разложению органической части угля, образованию и выходу летучих, которые совместно с парами воды и газообразными продуктами их термохимического взаимодействия с углеродом кокса фильтруются к нагреваемой поверхности частицы топлива и вдуваются во внешнюю высокотемпературную среду. Вследствие этого в пристенной области формируется смесь водяных паров, воздуха и горючих газов с существенным градиентом концентраций. При достижении критических значений температур и массового соотношения летучих и окислителя происходит воспламенение данной смеси.

1.2. Математическая постановка задачи

Математическая постановка задачи воспламенения ВУТ, соответствующая сформулированной выше физической модели, включает систему нестационарных дифференциальных уравнений, записанных в безразмерных переменных (сферическая система координат). Область решения задачи — «частица ВУТ-газовая среда» (рис. 1). В период термической подготовки каплю ВУТ можно условно разделить на две зоны: исходное топливо, насыщенное влагой, и сухой угольный каркас. Распределение температуры в такой неоднородной гетерогенной системе описывает уравнение энергии. Оно учитывает кроме процесса теплопроводности процесс удаления влаги, термическую деструкцию угля, взаимодействие водяных паров и углерода кокса, а также фильтрационный тепло- и массоперенос (по аналогии с [31, 32]):

$$\frac{1}{\text{Fo}_{wcf}} \cdot \frac{\partial E_{wcf}}{\partial \tau} - C_{gm} P_{gm} \frac{\text{Pe}_{gm}}{\text{Da}} \left(\frac{\partial H}{\partial R} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial R} + \frac{1}{R^2} \cdot \frac{\partial H}{\partial \Phi} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial \Phi} \right) \Psi \left(R - R_{eva}, \Phi - \Phi_{eva} \right) = \frac{1}{R^2} \cdot \frac{\partial}{\partial R} \left(R^2 \Lambda_{wcf} \frac{\partial \theta}{\partial R} \right) + \frac{1}{R \sin \Phi} \cdot \frac{\partial}{\partial \Phi} \left(\frac{\sin \Phi}{R} \Lambda_{wcf} \frac{\partial \theta}{\partial \Phi} \right) - \text{Ku} \cdot \Omega \cdot \Delta \left(R_{eva}, \Phi_{eva} \right) - \sum_{i=1}^{n=2} \text{Po}_i \Psi \left(R - R_{eva}, \Phi - \Phi_{eva} \right),$$
(2)
FIGE
$$\sum_{i=1}^{n=2} \text{Po}_i^{wcf} = \text{Po}_{td} + \text{Po}_{C+H_2O}, \quad E_{wcf} = C_{wcf} \left(R, \Phi, \tau \right) \text{P}_{wcf} \left(R, \Phi, \tau \right) \theta \left(R, \Phi, \tau \right).$$

Теплофизические характеристики (Λ_{wcf} , C_{wcf} и P_{wcf}) рассчитывались с учетом положения фронта испарения. Координата границы испарения вычислялась из выражения

$$R_{\rm eva} = R_{\rm out} - \frac{t}{r_{\rm out}} \int_0^\tau V_{\rm F} d\tau,$$

где $V_{\rm F} = (W_{\rm eva}/\rho_{\rm wat})$ — линейная скорость испарения воды, м/с. Массовая скорость испарения ($W_{\rm eva}$, кг/(${\rm M}^2$ с)) вычислялась из выражения [33]

$$W_{\text{eva}} = W_{\text{f}} \exp\left[\frac{Q_{\text{eva}}\mu_{\text{wat}}\left(T\left(r_{\text{eva}}, \Phi_{\text{eva}}, \tau\right) - T_{\text{f}}\right)}{R_{\text{g}}T_{\text{f}}T\left(r_{\text{eva}}, \Phi_{\text{eva}}, \tau\right)}\right].$$
(3)

При постановке задачи принято, что водяные пары совместно с продуктами термического разложения движутся сквозь пористый угольный каркас. Распределение давления (*H*) по радиусу частицы вычислялось при решении уравнения пьезопроводности [34]

$$\frac{1}{\operatorname{Fo}_{H}} \cdot \frac{\partial (\Pi H)}{\partial \tau} = \frac{1}{R^{2}} \cdot \frac{\partial}{\partial R} \left(R^{2} X \frac{\partial H}{\partial R} \right) + \frac{1}{R \sin \Phi} \cdot \frac{\partial}{\partial \Phi} \left(\frac{\sin \Phi}{R} X \frac{\partial H}{\partial \Phi} \right) + \operatorname{Po}_{\Sigma}^{H}, \quad (4)$$

где
$$\operatorname{Po}_{\Sigma}^{H} = \left[\operatorname{Po}_{\operatorname{td}}^{H} + \operatorname{Po}_{\operatorname{C+H}_{2}\operatorname{O}}^{H}\right] \Psi \left(R - R_{\operatorname{eva}}, \Phi - \Phi_{\operatorname{eva}}\right) + \operatorname{Po}_{\operatorname{eva}}^{H} \Delta \left(R_{\operatorname{eva}}, \Phi_{\operatorname{eva}}\right)$$

Связь между значениями проницаемости и пористостью принята в соответствии с выражением [35]

$$K = \zeta \,\Pi s^2 / 8. \tag{5}$$

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

$$\frac{1}{\mathrm{Fo}_{g}} \cdot \frac{\partial E_{g}}{\partial \tau} + \mathrm{Pe} \left(U_{g} \frac{\partial E_{g}}{\partial R} + \frac{V_{g}}{R} \cdot \frac{\partial E_{g}}{\partial \Phi} \right) = \frac{1}{R^{2}} \cdot \frac{\partial}{\partial R} \left(R^{2} \Lambda_{g} \frac{\partial \theta}{\partial R} \right) + \frac{1}{R \sin \Phi} \cdot \frac{\partial}{\partial \Phi} \left(\frac{\sin \Phi}{R} \Lambda_{g} \frac{\partial \theta}{\partial \Phi} \right) + \mathrm{Po}_{\Sigma}^{g}, \quad (6)$$

где $\operatorname{Po}_{\Sigma}^{g} = \operatorname{Po}_{\operatorname{CH}_{4}+\operatorname{O}_{2}} + \operatorname{Po}_{\operatorname{H}_{2}+\operatorname{O}_{2}} + \operatorname{Po}_{\operatorname{CO}+\operatorname{O}_{2}}, \quad E_{g} = C_{g}(R, \Phi, \tau)P_{g}(R, \Phi, \tau)\theta(R, \Phi, \tau).$

Скорость и давление газа в пограничном слое частицы ВУТ вычислялись с использованием аналитического решения задачи Стокса об обтекании шара [36]:

распределение давления в газовой области:
$$H_{\rm g} = 1 + \frac{3}{2} E R_{\rm out} U_{\rm g} \frac{\cos \Phi}{R^2}$$
, (7)

скорость в радиальном направлении: $U_{\rm g} = -2U_{\rm g}^{\rm fl} \cos \Phi \left(\frac{1}{2} - \frac{3R_{\rm out}}{4R} + \frac{R_{\rm out}^3}{4R^3} \right),$ (8)

скорость в азимутальном направлении:
$$V_{\rm g} = U_{\rm g}^{\rm fl} \sin \Phi \left(1 - \frac{3R_{\rm out}}{4R} - \frac{R_{\rm out}^3}{4R^3} \right).$$
 (9)

Также принято, что водяной пар вступает в эндотермическое химическое взаимодействие с твердыми продуктами пиролиза угля — коксом. Скорость этой реакции — C + H₂O = CO + H₂ - 10,9 МДж/кг — вычислялась из выражения [37]

$$W_{\rm C+H_2O} = k_{\rm C+H_2O} c_{\rm H_2O} \rho_{\rm gm} \exp\left(-\frac{E_i}{R_{\rm g}T}\right).$$
 (10)

При постановке задачи принято, что разложение топлива с выделением летучих начинается при достижении на поверхности частицы условия $\theta(R_{out}, \Phi, Fo) \ge \theta_{std}$, где θ_{std} температура начала термического разложения. Процесс термического разложения описывается уравнением химической кинетики [22]

$$\frac{\partial \eta}{\partial \tau} = \left[1 - \eta\right] k_{\rm td} \exp\left(-\frac{E_{\rm td}}{R_{\rm g}T}\right). \tag{11}$$

Скорость пиролиза рассчитывалась с использованием выражения

$$W_i = M^{\text{daf}} \left[1 - \eta \right] k_{\text{td}} \rho_2 \exp\left(-\frac{E_{\text{td}}}{R_{\text{g}}T}\right).$$
(12)

К одному из основных рассматриваемых процессов относится вдув продуктов термической деструкции и химического взаимодействия твердого остатка и водяных паров в «пристенную» область. В результате формируется газовая смесь, воспламеняющаяся при достижении критических значений температуры и концентрации горючего [22, 23]. Период времени от начала теплового воздействия на частицу до момента интенсивного химического взаимодействия парогазовой смеси с окислителем считается временем задержки воспламенения. При этом скорость выделения теплоты в результате термохимического реагирования окислителя и горючего превышает скорость поступления теплоты от внешней среды. В непосредственной близости от поверхности частицы учитывалось протекание трех наиболее значимых [20] реакций:

$$H_2 + 0.5O_2 = H_2O + 120.9 MДж/кг,$$

 $CO + 0.5O_2 = CO_2 + 10.09 MДж/кг,$
 $CH_4 + 2O_2 = 2H_2O + CO_2 + 50.14 MДж/кг.$

Скорость этих реакций вычислялась из математического выражения закона Аррениуса:

$$W_i = k_i Y_i \left(R, \Phi, \tau \right) \left(1 - \sum_{i=1}^n Y_i \left(R, \Phi, \tau \right) \right) \rho_g \exp \left(-\frac{E_i}{R_g T} \right).$$
(13)

Концентрации компонентов парогазовой смеси (H₂, CO, CH₄, CO₂, H₂O, O₂) в пограничном слое частицы рассчитывались при решении уравнений диффузии для соответствующего компонента реакции:

$$\frac{1}{\text{Fo}_{\text{dif}}} \cdot \frac{\partial P_{g}Y_{i}}{\partial \tau} + \text{Pe}_{\text{dif}} \left(U_{g} \frac{\partial P_{g}Y_{i}}{\partial R} + \frac{V_{g}}{R} \cdot \frac{\partial P_{g}Y_{i}}{\partial \Phi} \right) = \frac{1}{R^{2}} \cdot \frac{\partial}{\partial R} \left(R^{2}P_{g}D_{i} \frac{\partial Y_{i}}{\partial R} \right) + \frac{1}{R\sin\Phi} \cdot \frac{\partial}{\partial\Phi} \left(\frac{\sin\Phi}{R} P_{g}D_{i} \frac{\partial Y_{i}}{\partial\Phi} \right) - \text{Po}_{i}^{\text{dif}}.$$
(14)

Как известно [38], при термическом разложении угля происходит увеличение размеров пор. В этих условиях при постановке задачи учитывалось изменение плотности (ρ_3) и пористости (П) топлива по аналогии с [39]:

$$\frac{\partial \rho_3}{\partial t} = \left(\rho_3 - \rho_3^{\text{end}}\right) k_{\text{td}} \exp\left(-\frac{E}{R_{\text{g}}T}\right),\tag{15}$$

$$\Pi = \Pi_0 \frac{\rho - \rho_3^0}{\rho_3^0 - \rho_3^{\text{end}}}.$$
 (16)

Начальные условия для системы уравнений (1)-(16) имели вид:

$$\tau = 0 \rightarrow \begin{cases} \theta(R, \Phi, 0) = \theta_0 = \frac{T(\mathbf{r}, \Phi, 0) - T_0}{\Delta T}, & H(R, \Phi, 0) = H_0 = 1, \\ P(R, \Phi, 0) = P_0, & \eta(R, \Phi, 0) = 0, \\ \theta(R, \Phi, 0) = \theta_g = \frac{T_g - T_0}{\Delta T}, & Y_i(R, \Phi, 0) = 0, & R_{\text{out}} < R < R_g, & 0 < \Phi < \pi, \end{cases}$$

граничные условия записывались следующим образом:

$$\left. \frac{\partial \Theta}{\partial R} \right|_{\substack{R=0\\0<\Phi<\pi}} = 0, \tag{17}$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial \Phi}\Big|_{\substack{0 < R < R_g \\ \Phi = 0 \\ \Phi = \pi}} = 0, \tag{18}$$

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial R^2} \bigg|_{\substack{R=R_{\rm g}\\ 0 < \Phi < \pi}} = 0, \tag{19}$$

$$\frac{\partial H}{\partial R}\Big|_{\substack{R=0\\0<\Phi<\pi}} = 0,$$
(20)

$$\frac{\partial H}{\partial \Phi}\Big|_{\substack{0 < R < R_{\text{out}} \\ \Phi = 0 \\ \Phi = \pi}} = 0, \tag{21}$$

$$H\Big|_{\substack{R=R_{\text{out}}\\0<\Phi<\pi}} = 1,$$
(22)

$$D_{i \to \text{air}} P_{g} \left. \frac{\partial Y_{i}}{\partial R} \right|_{\substack{R=R_{\text{out}}\\0<\Phi<\pi}} = P_{gm} \left. \frac{N}{\text{Da}} \cdot \frac{\partial H}{\partial R} \right|_{R=R_{\text{out}}=0},$$
(23)

$$\frac{\partial^2 Y_i}{\partial R^2} \bigg|_{\substack{R=R_g\\ 0<\Phi<\pi}} = 0,$$
(24)

$$\frac{\partial Y_i}{\partial \Phi}\Big|_{\substack{0 < R < R_g \\ \Phi = 0 \\ \Phi = \pi}} = 0.$$
⁽²⁵⁾

На границе раздела системы «частица ВУТ–газовая среда» было принято граничное условие 4-го рода. При этом учитывался экзотермический эффект реакции углерода с кислородом воздуха (по аналогии с [40]) и тепловое излучение внешней среды [41]:

$$\frac{\partial \theta}{\partial R} = K_{\lambda} \frac{\partial \theta}{\partial R} + \mathrm{Ki}_{\Sigma}, \qquad (26)$$
$$\theta \left(R_{\mathrm{out}}, \Phi, \tau \right) \Big|_{R=R_{\mathrm{out}}+0} = \theta \left(R_{\mathrm{out}}, \Phi, \tau \right) \Big|_{R=R_{\mathrm{out}}-0}, \qquad (26)$$
$$\mathrm{Ki}_{\Sigma} = \mathrm{Sk} \left(\theta \right) \sum_{i=1}^{n=4} \left[\Xi \left(\frac{T_0}{T_{\mathrm{eva}} - T_0} \right)^{i-1} \left(\theta_{\mathrm{g}}^{n+1-i} - \theta \Big|_{R=R_{\mathrm{out}}}^{n+1-i} \right) \right] + \mathrm{Ki}_{\mathrm{топливо+O_2}}, \qquad \Xi = \begin{cases} 1, \ i = 1, \\ 4, \ i = 2 \lor 4, \\ 6, \ i = 3. \end{cases}$$

Скорость химической гетерогенной реакции «топливо $+ x \cdot O_2 = y \cdot CO_2 + z \cdot H_2O + Q$ », где Q = 18,61 МДж/кг, вычислялась с использованием математического выражения закона Аррениуса [42]:

$$W_{i} = k_{\text{топливо+O}_{2}} \left[1 - \sum_{i=1}^{n} Y_{i} \left(R_{\text{out}}, \Phi, \tau \right) \right] \eta \left(R_{\text{out}}, \Phi, \tau \right) \rho_{g} \exp \left(-\frac{E_{\text{топливо+O}_{2}}}{R_{g}T} \right).$$
(27)

Теплопроводность, теплоемкость, плотность влажной и «обезвоженной» частей водоугольного топлива рассчитывались с учетом объемных долей компонент [20]:

$$\Lambda_{\text{wef}} = \begin{cases} \Lambda_1, \ R \le R_{\text{eva}}, \\ \Lambda_2, \ R > R_{\text{eva}}, \end{cases} \quad C_{\text{wef}} = \begin{cases} C_1, \ r \le r_{\text{eva}}, \\ C_2, \ r > r_{\text{eva}}, \end{cases} \quad P_{\text{wef}} = \begin{cases} P_1, \ R \le R_{\text{eva}}, \\ P_2, \ R > R_{\text{eva}}, \end{cases}$$
$$(28)$$

$$C_1 = \gamma C_1 + \gamma C_2 + \gamma C_2 = \gamma C_1 + \gamma C_2$$
(29)

$$C_1 = \gamma_c C_c + \gamma_{wat} C_{wat}, \quad C_2 = \gamma_c C_c + \gamma_{gm} C_{gm}, \tag{29}$$

$$P_1 = \gamma_c P_c + \gamma_{wat} P_{wat}, \quad P_2 = \gamma_c P_c + \gamma_{gm} P_{gm}. \tag{30}$$

Теплофизические характеристики парогазовой смеси также рассчитывались с учетом объемных долей компонент:

$$\Lambda_{g} = \sum_{i=1}^{n} \gamma_{i} \Lambda_{i} + \left(1 - \sum_{i=1}^{n} \gamma_{i}\right) \Lambda_{\text{oxi}}, \qquad (31)$$

$$C_{\rm g} = \sum_{i=1}^{n} \gamma_i C_i + \left(1 - \sum_{i=1}^{n} \gamma_i\right) C_{\rm oxi},$$
(32)

$$P_{\rm g} = \sum_{i=1}^{n} \gamma_i P_i + \left(1 - \sum_{i=1}^{n} \gamma_i\right) P_{\rm oxi}.$$
(33)

Объемные доли компонентов парогазовой смеси вычислялись по их массовым долям (по аналогии с [43]):

$$\gamma_i = Y_i / \mu_i / \sum_{i=1}^n \frac{Y_i}{\mu_i},\tag{34}$$

где μ_i — молярная масса *i*-го компонента газовой смеси. Коэффициент диффузии *i*-го компонента в многокомпонентной смеси рассчитывался из выражения [44]

$$D_i = \left(1 - \gamma_i\right) / \sum_{i \neq k} \frac{\gamma_i}{D_{ik}}.$$
(35)

1.3. Исходные данные

Исследовалось зажигание частиц водоугольного топлива из углей марки Д (длиннопламенный) и Б (бурый). Их теплофизические и термохимические характеристики приведены в табл. 1. Состав летучих, образующихся при термическом разложении органической части топлива, приведен в табл. 2. Термохимические константы реакций пиролиза, паровой газификации и воспламенения приведены в табл. 3. Численные исследования

Таблица 1

 $M^{\mathrm{daf}}, \%$ Уголь C^{Γ} , % *с*, Дж/(кг·К) $Q_{\rm td}$, кДж/кг λ , BT/(M·K) *ρ*, кг/м³ Длиннопламенный (Д) 1150 176,7 0,116 125,3 56 46 Бурый (Б) 1150 431 0,151 1200 48 34,3

Теплофизические и термохимические характеристики углей [45]

	Таблица	2
Состав газообразных продуктов пиролиза [46]		

Компонент	Содержание компонента, %	
	Бурый уголь	Каменный уголь
Углекислый газ (CO ₂)	15,5	2,3
Монооксид углерода (СО)	15,0	5,7
Метан (СН ₄)	20,5	65,9
Водород (H ₂)	25,6	18,6
Азот (N ₂)	23,4	7,5

Таблица З

Реакция	<i>Е_i</i> , Дж/(моль)	k_{i}, c^{-1}	Литературные источники
Термическое разложение	$56,9.10^{3}$	131,8	[47]
$H_2O + C = CO + H_2$	$220 \cdot 10^{3}$	$2,07 \cdot 10^7$	[38]
$\rm CO + 0.5 \cdot O_2 = \rm CO_2$	$200,0.10^{3}$	$2,50 \cdot 10^{12}$	[48]
$H_2 + 0.5 \cdot O_2 = H_2O$	$105,0.10^{3}$	$1,13 \cdot 10^{17}$	[49]
$CH_4 + 2 \cdot O_2 = CO_2 + 2 \cdot H_2O$	$35 \cdot 10^{3}$	$5,1\cdot 10^{14}$	[50]

Константы термохимических реакций

выполнены при следующих исходных данных: $T_0 = T(r, \Phi, t) = 298$ K, $p_{\text{atm}} = 101325$ Па, $\eta_0 = 0, \mu = 0,018$ кг/моль.

1.4. Метод решения

Сформулированная задача математической физики решена методом конечных разностей [51]. Аппроксимация двумерных уравнений теплопроводности, диффузии и пьезопроводности проводилась локально-одномерным методом Самарского с использованием неявного четырехточечного разностного шаблона [52]. Аппроксимация конвективных членов выполнялась с применением монотонной разностной схемы Самарского [53]. Например, уравнение (1) аппроксимировалось следующим образом:

rge $R_{i+1/2} = 0.5 \cdot (R_i + R_{i+1}), R_{i-1/2} = 0.5 \cdot (R_i + R_{i-1}), \Lambda_{i-1/2} = 0.5 \cdot (\Lambda_i + \Lambda_{i-1}), \Lambda_{i-1/2} = 0.5 \cdot (\Lambda_i + \Lambda_{i-1}).$

Сыродой С.В., Саломатов В.В.

Уравнения и краевые условия (2–27) аппроксимировались по аналогичной схеме. Система (1)–(27) решалась в период времени до достижения условий, соответствующих условиям зажигания твердых, жидких и многосоставных (композитных) топлив [22, 23]. Необходимо отметить, что численное моделирование процессов зажигания топлива в условиях интенсивных фазовых превращений (в частности испарения) является одним из самых сложных в теории горения. Последнее связано с тем, что испарение воды протекает в очень узкой (много меньше линейного размера частицы) области (фронта испарения). При этом, как правило, тепловые эффекты фазовых переходов очень высоки (до 2,5·10⁶ Дж/кг). В результате во влажной частице возникает внутренний локальный сток теплоты. Численные исследования усложняются еще и тем, что асимптотики процессов испарения и зажигания заметно отличаются (зажигание быстропротекающий процесс, испарение — более медленный).

Сформулированная задача зажигания является существенно нелинейной. Это обусловлено нелинейными эффектами (испарение внутрипоровой воды, термическое разложение, зажигание летучих). При решении системы разностных уравнений использовался метод итераций с применением метода прогонки на каждой итерации [52]. При этом скорость движения фронта фазового перехода $U_{\rm F}$, массовая скорость испарения $W_{\rm eva}$ и температура поверхности фронта испарения $T(r_{eva}, t)$ связаны явно. Для решения задачи определения скорости испарения и вычисления координат границы раздела системы «водонасыщенное топливо-сухой угольный каркас» разработан алгоритм, основанный на методе неявного выделения фронта фазового перехода [54]. Он основан на итерационной процедуре, базирующейся на проведении сквозной прогонки с разрывными коэффициентами, и выделении границы раздела водонасыщенной и сухой зон угольного каркаса топливной частицы. На первом этапе проводились вычисления, в результате которых рассчитывались значения температур. После этого по формуле (3) вычислялась массовая скорость испарения в узле разностной сетки, соответствующем фронту фазового перехода, координаты которого известны с предыдущего временного слоя. На следующем этапе по формуле (2) определялись координаты нового положения фронта испарения. Если выполнялось условие равенства смещения (ϕ) фронта фазового перехода шагу разностной сетки по координате, то координаты фронта изменялись на величину φ . По результатам вычислений положения границы раздела твердой и жидкой фаз проводилось задание теплофизических характеристик в каждом узле разностной сетки в соответствии с состоянием среды в этом узле (водонасыщенная или сухая часть топлива). После этого вычисления выполнялись снова. Итерации проводились до тех пор, пока разница значений температур в каждом узле разностной сетки на двух последовательных итерациях не становилась меньше заданной допустимой погрешности (0,001 К). Численное моделирование проводилось на разностной сетке 351×51, где 351 — число узлов (N) в направлении координатной оси R, 51 — число узлов по азимутальной координатной оси Ф.

При проведении математического моделирования процесса зажигания был принят шаг по времени $\tau = 1,62 \cdot 10^{-4}$. Такое малое значение временного шага обуславливается тем, что процессы зажигания, как правило, являются быстропротекающими. Особенно это проявляется в период непосредственного реагирования газообразных продуктов пиролиза и окислителя. По этой причине для определения времен задержки воспламе-

нения с приемлемой погрешностью временной шаг должен быть достаточно малым (не более 10^{-5} с в размерном виде).

2. Результаты и их обсуждение

2.1. Верификация математической модели

На рис. 2 приведены экспериментальные (по данным работы [20]) и полученные по результатам численного моделирования значения времен задержки зажигания частицы водоугольного топлива на основе длиннопламенного угля. Сравнительный анализ значений t_{ign} показывает, что в исследуемом диапазоне температур внешней среды ($T_g = 673 \div 1273$ K) математическая модель обеспечивает достаточно высокий уровень прогностического потенциала (в пределах доверительного интервала экспериментов ± 17 %) процессов зажигания капель ВУТ.

На рис. 3 приведены значения t_{ign} для капель ВУТ (на основе бурого угля), полученные по результатам математического моделирования и экспериментально [20]. По результатам сравнительного анализа зависимостей, представленных на рисунке, можно сделать вывод, аналогичный выводу из рис. 2 о высоком уровне прогностического потенциала разработанной математической модели. Можно отметить, что водоугольные частицы на основе бурого угля зажигаются значительно быстрее чем капли ВУТ на базе угля марки Д. Это обусловлено высоким содержанием летучих в буром угле по сравнению с длиннопламенным.

2.2. Анализ влияния фильтрационного теплопереноса на характеристики и условия воспламенения

На рис. 4 приведены времена задержки воспламенения частицы водоугольного топлива на основе длиннопламенного угля, рассчитанные с учетом фильтрации газообразных продуктов термического разложения и водяных паров сквозь пористый каркас (t_{ign}) , а также при допущении о мгновенном выходе продуктов пиролиза на поверхность топлива



Рис. 2. Времена задержки зажигания частиц водоугольного топлива, выполненных из угля марки Д в условиях высокотемпературного нагрева.

Размер частицы: $1, 2 - \delta \ge 3$ мм, $3, 4 - 2 < \delta < 3$ мм, 5, $6 - \delta \le 2$ мм; 1, 3, 5 -эксперимент [20], 2, 4, 6 -результаты математического моделирования.



Рис. 3. Времена задержки зажигания частиц водоугольного топлива, выполненных из бурого угля в условиях высокотемпературного нагрева.

Размер частицы: $l, 2 - \delta \ge 3$ мм, $3, 4 - 2 < \delta < 3$ мм, $5, 6 - \delta \le 2$ мм; l, 3, 5 -эксперимент [20], 2, 4, 6 - результаты математического моделирования.



Рис. 4. Времена задержки зажигания частиц размером $\delta = 3$ мм водоугольного топлива, выполненного из длиннопламенного угля в условиях высокотемпературного нагрева.

с учетом охлаждения в результате фильтрации,
 2 — без фильтрации.

без охлаждения пористой среды частицы ВУТ (t_{ign}^0) . Можно отметить, что в условиях фильтрации значения t_{ign} водоугольных частиц существенно выше, чем при предположении об отсутствии внутрипо-

рового конвективного теплообмена. Это обусловлено тем, что в условиях движения водяных паров сквозь пористый угольный каркас происходит его охлаждение. Последнее приводит к значительному снижению скорости реакции термического разложения. В результате происходит деинтенсификация выхода летучих и увеличение продолжительности всего индукционного периода.

Рисунок 5 иллюстрирует динамику изменения температуры поверхности капли ВУТ (T_{sur}) с учетом теплообмена в результате фильтрации продуктов пиролиза и водяных паров сквозь пористый угольный каркас и без внутрипоровой конвекции. Анализ зависимостей $T_{sur}(t)$ показывает, что весь период термической подготовки можно условно разделить на ряд последовательных характерных стадий. В начальный период времени (до $t \approx 0,18 \cdot t_{ign}$) происходит инертный нагрев капли ВУТ. После этого инициируется процесс интенсивного испарения воды. По его окончании формируется пористый угольный каркас с низкой теплопроводностью и теплоемкостью. При этом можно отметить, что период испарения воды является самым продолжительным. Это обусловлено тем, что в результате фильтрации водяных паров происходит охлаждение угля. На финальной стадии (при $t > 0,8 \cdot t_{ign}$) происходит резкое увеличение скорости роста температуры поверхности частицы, при этом ее изменение соответствует экспоненциальному закону ($\partial T/\partial t = \exp(-E \cdot R_{e}^{-1} \cdot T^{-1})$).

В то же время можно отметить, что в условиях теплопереноса в ВУТ только за счет теплопроводности температура поверхности капли ВУТ растет значительно быстрее. Это является следствием отсутствия процесса фильтрационного охлаждения угля. Можно отметить, что максимальные отличия температур поверхности капли ВУТ установлены в период испарения внутрипоровой влаги $(0,2 \cdot t_{ign} \le t \le 0,8 \cdot t_{ign} c)$. Это обусловлено тем, что наиболее интенсивное фильтрационное охлаждение происходит при сушке (влагоудалении) основного слоя топлива.

Для оценки влияния скорости движения парогазовой смеси на процесс охлаждения пористого углеродистого каркаса в индукционный период введем в рассмотрение фильтрационный аналог критерия Нуссельта [55]: *Т*_{стр} K

Рис. 5. Изменение температуры поверхности частицы водоугольного топлива диаметром $\delta = 3$ мм, выполненного на базе длиннопламенного угля в процессе воспламенения при температуре внешней среды $T_{\rm g} = 873$ К.

І — без фильтрации, 2 — с учетом охлаждения в результате фильтрации.



Теплофизика и аэромеханика, 2019, том 26, № 5

$$Nu_{filt} = 2 + 1, 1 \cdot Re_{filt}^{0,6} \cdot Pr^{1/3},$$
(36)

где

$$\operatorname{Re}_{\operatorname{filt}} = \frac{26,6(1-m)\sqrt{K_{\mathrm{p}}u_{\mathrm{gm}}\rho_{\mathrm{gm}}}}{m^{2,675}\mu_{\mathrm{gm}}} -$$
(37)

фильтрационное число Рейнольдса.

На рис. 6 приведены зависимости безразмерных времен задержек воспламенения $\xi = t_{ign}/t_{ign}^0$, где $t_{ign}^0 = 2,75$ с — время задержки зажигания капли ВУТ без учета фильтрации (при условии нулевого градиента давления парогазовой смеси во внутрипоровом пространстве $\frac{\partial H}{\partial R} = \frac{1}{R} \cdot \frac{\partial H}{\partial \Phi} = 0$) частиц ВУТ, выполненных на основе длиннопламенного угля с характерным размером $\delta = 3$ мм, от среднего по объему частицы числа Нуссельта $\overline{\text{Nu}}_{\text{filt}} = \frac{3}{2\pi R^3} \int_{0}^{R} \int_{0}^{$

При вычислении Nu _{filt} принято, что область решения задачи ограничивается не всей частицей, а лишь ее половиной (другими словами $0 \le \Phi \le \pi$). Анализ зависимостей, представленных на рисунке показывает, что увеличение числа Нуссельта приводит к росту времени задержки зажигания. Как отмечалось выше, это обусловлено тем, что в результате фильтрации смеси водяных паров и газообразных продуктов пиролиза сквозь пористый угольный каркас происходит интенсивное охлаждение последнего и, соответственно, значительное снижение скорости реакции термического разложения. Также анализ зависимостей показывает, что фактор фильтрации значительно проявляется при высокой температуре внешней среды (например, при $T_g \ge 1273$ K). Это, скорее всего, обусловлено тем, что, как было установлено в работах [19–23], при этих температурах капли водоугольного топлива воспламеняются в условиях продолжающегося испарения (до полного завершения процесса удаления влаги) и, соответственно, фильтрации водяного пара.

Следует отметить, что при проведении процедуры математического моделирования процесса нагрева водоугольной частицы за базовую принята модель, учитывающая конвективный фильтрационный теплоперенос. При этом принята гипотеза о незначительной, практически равной нулю, разности температур между парогазовой смесью и угольным каркасом. Стоит отметить, что в реальных условиях температура пара ниже температуры пористого каркаса, однако уравнение (1) этого не описывает и, следовательно, использование модели (1) для описания теплопереноса не всегда обосновано. В связи с вышеизложенным проведен анализ влияния модели теплопереноса, учитывающей разницу температур водяных паров и пористого угольного каркаса на результат прогностического моделирования процессов зажигания капель водоугольного топлива. Для этого уравнение (1) преобразовано

к виду

Рис. 6. Зависимость безразмерных времен задержки воспламенения частиц водоугольного топлива с характерным размером $\delta = 3$ мм на базе угля марки Д от фильтрационного критерия Нуссельта.

Температура внешней среды: $T_{\rm g} = 1273 \ (1), \ 1073 \ (2), \ 873 \ (3) \ {\rm K}.$





На рис. 7 приведены зависимости времен задержки зажигания частиц водоугольного топлива, рассчитанных с применением уравнений (1) и (38). Можно отметить, что значения t_{ign} , найденные при решении уравнений (1) и (38), отличаются незначительно (отклонения составляют не более 12 %). При этом времена задержки воспламенения, полученные при применении уравнения (1), меньше, чем при использовании модели (38). Это скорее всего обусловлено тем, что уравнение энергии (1) базируется на гипотезе об идентичности значений температур фильтрующегося агента и пористого каркаса (другими словами, коэффициент внутрипоровой теплоотдачи $\alpha \rightarrow \infty$). Уравнение (38) описывает процесс теплопереноса при разности температур между парогазовой смесью и углеродистым каркасом, поэтому интенсивность охлаждения угля при решении уравнения (38) выше.

В целом можно отметить, что описание процесса фильтрационного теплопереноса с помощью модели (1) или (38) оказывает незначительное влияние на характеристики зажигания частиц водоугольного топлива. Это обусловлено тем, что тепловой эффект процесса фильтрационного охлаждения изменяется несущественно для двух рассмотренных вариантов моделей.

Выводы

Разработана прогностическая модель процесса зажигания капли водоугольного топлива в условиях высокотемпературного нагрева. Сравнительный анализ теоретических и экспериментальных значений основных интегральных характеристик процесса воспламенения (времени задержки зажигания t_{ign}) показал их удовлетворительное (в пределах разброса экспериментальных значений t_{ign}) согласование.

По результатам численного моделирования установлено, что фильтрация водяных паров и газообразных продуктов пиролиза сквозь пористый угольный каркас может оказывать существенное влияние на характеристики и условия воспламенения капель водоугольного топлива. Показано, что при увеличении скорости фильтрации происходит значительная интенсификация процесса охлаждения сухого угольного слоя в период термической подготовки (t_{ion} может повышаться в 1,5÷2 раза).

Обозначения

- *T* температура, К,
- $\Delta T = T_{eva} T_0$ температура нагрева
- до начала процесса парообразования, К,
- *T*_{eva} = 373 К максимально возможная температура испарения,
- *T*₀ температура в начальный момент времени,
- *R*_о универсальная газовая постоянная,
- Дж/(моль К),
- δ характерный размер частицы топлива, м,
- σ постоянная Стефана–Больцмана, Вт/(м²·K⁴),
- β коэффициент сжимаемости пара, 1/Па, $\varepsilon(T)$ — интегральная степень черноты, зависящая от температуры,
- *p* давление, Па,
- η степень пиролизации топлива,
- Ф угловая (азимут) координата,
- Z-угловая (зенит) координата,
- *k* предэкспонент гетерогенной (м/с)
- или гомогенной (1/с) реакции, - скорость движения смеси водяных паров и газообразных продуктов пиролиза
- в порах топлива в радиальном направлении, м/с, - скорость движения смеси водяных паров
- и газообразных продуктов пиролиза в порах в азимутальном направлении, м/с,
- $K_{\rm p}$ коэффициент проницаемости угля, м², $M^{\rm daf}$ содержание летучих,

*W*_{eva} — массовая скорость испарения воды (в уравнении (3)) или химической реакции

 $O_{\rm wcf}$ — объем частицы, м³,

- (в уравнениях (10), (12)-(14)),
- О тепловой эффект, Дж/кг,

∞ — динамическая вязкость, Па·с,

- λ коэффициент теплопроводности, Bt/(м·K),
- с теплоемкость, Дж/(кг·К),
- $\chi = K_{\rm p} / (\omega \beta m_0)$ коэффициент
- пьезопроводности, м²/с,
- ρ плотность, кг/м²,
- *µ* молярная масса, кг/моль,
- $a = \lambda/(c\rho)$ коэффициент
- температуропроводности, м²/с,
- *r* радиус, м,
- h_s параметр трансформации фронта испарения, м,
- *h_R* шаг по пространственной сетке в направлении оси R (радиус),
- h_{Φ} шаг по пространственной сетке

 $\Pi = m/m^*$ — пористость, $H = p/p^*$ — давление парогазовой смеси в пористой структуре частицы, $X = \chi/\chi^*$ — коэффициент пьезопроводности, $D_i = d_i/d_i^*$ — коэффициент диффузии,

- в направлении Ф (азимутальный угол),
- s характерный размер поры м,

Pr — критерий Прандтля,

∆ — функция Дирака.

- *t* время, с,
- $t_{\rm hw} = (r^*)^2 / a^*$ характерное время распространения волны теплового возмущения по радиусу r^* , с.

Безразмерные величины

- $\theta = (T T_0)/\Delta T$ температура,

- $\tau = t/t^*$ время, $C = c/c^*$ теплоемкость, $P = \rho/\rho^*$ плотность, $\Lambda = \lambda/\lambda^*$ коэффициент теплопроводности,
- $U = u/u^*$ скорость в радиальном направлении,
- $V = v/u^*$ скорость в азимутальном направлении,
- $R = r/r^*$ радиус,
- Re критерий Рейнольдса,
- Nu критерий Нуссельта,

Безразмерные комплексы и критерии

 $E = \omega u^* / p^* r^*$ — параметр торможения,

 $Da = \omega r^* u^* / K_p p^*$ — критерий Дарси,

 $Ku = Q_{eva} / (\Delta T \cdot c^*)$ — критерий Кутателадзе,

 $K_{\lambda} = \lambda_{\rm s} / \lambda_{\rm wcf}$ — симплекс, характеризующий интенсивность перетока теплоты

из пограничного слоя частицы в слой топлива, Fo = $a^*t^*/(r^*)^2$ — критерий Фурье,

Fo_{*H*} =
$$\chi^* t^* / (r^*)^2$$
 — аналог критерия Фуры
в уравнении пьезопроводности (4),

 $Pe = u^* r^* / a^*$ — критерий Пекле,

 $Po = Q_i W_i (r^*)^2 / (\lambda^* \Delta T)$ — критерий Померанцева для *i*-ой химической реакции,

 $Po_i^H = W_i(r^*)^2 \omega / (\rho_{gm} p^* K_P^*)$ — аналог критерия

Померанцева (см. уравнение пьезопроводности (4)) для химических реакций (термическое разложение, взаимодействие водяных паров и углерода кокса),

$$\operatorname{Po}_{\operatorname{eva}}^{H} = W_{\operatorname{eva}}(r^{*})^{2} \omega / (s \rho_{\operatorname{sm}} p^{*} K_{\operatorname{P}}^{*})$$
 — аналог критерия

Y_i — массовая доля *i*-го компонента газовой смеси

Померанцева (см. уравнение

(CH₄, H₂O, H₂, CO, CO₂, N₂, O₂),

пьезопроводности (4)) для процесса испарения,

$$Po_i^{dif} = W_i(r^*)^2 / (\rho_g d^*)$$
 — аналог критерия

Померанцева (см. уравнение диффузии (14)),

 $Ki_{C+O_{*}} = W_{C+O_{*}}Q_{C+O_{*}}r^{*}/(\lambda^{*}\Delta T)$ —критерий Кирпичева для реакции горения углерода,

 $\operatorname{Sk}(\theta) = \varepsilon(T) \cdot \sigma \cdot \Delta T^3 / \lambda^*$ — критерий Старка,

$$\Omega = V_{\rm F} \cdot t_{\rm hw} / h_{\rm s}$$
 — скорость испарения воды,

$$N = \rho^* u^* r^* / (d^* \rho_{\rm g}) ,$$

$$\Gamma = \lambda_{\rm gm} r^* / (s \lambda_{\rm wcf} T^*),$$

$$\zeta = (r^*)^2 / K_{\rm P}$$

Подстрочные индексы

0 — начальный момент времени,	eva — граница раздела системы "влажное
1 — область исходного топлива,	топливо-сухой углеродистый каркас",
2 — область сухого топлива,	filt – фильтрация,
3 — уголь,	ign — зажигание,
4 — вода,	out — внешний радиус частицы,
5 — водяные пары,	std — начало термического разложения,
f — состояние воды при температуре замерзания,	etd — окончание процесса термического
F — фронт испарения,	разложения,
g — высокотемпературный газ,	sur — поверхность частицы,
gm — смесь водяных паров и газообразных	td — процесс термического разложения,
продуктов пиролиза,	охі — окислитель (воздух),
с — коксовый остаток,	vol – летучие,
<i>i</i> — номер реакции,	wci — водоугольная суспензия,
atm — внешняя среда,	wat — жидкая вода.

Надстрочные индексы

 г — на горючую массу, daf — сухое беззольное топливо, end — окончание процесса термического 	$ \rho^* = \rho_{\text{oxi}} - $ для уравнений (7) и (16), $\lambda^* = \lambda_1,$ $u^* = u_{\text{oxi}},$
разложения, fl — поток высокотемпературной среды, * — масштаб величин, $t^* = 1$ с, $c^* = c_1$,	$r^* = r_{out},$ $m^* = m_0,$ $p^* = p_0,$ $\chi^* = \chi_1,$
$\rho^* = \rho_1$ — для уравнения (1),	$d_i^* = d_{iO_2}.$

Список литературы

- Longwell J.P., Rubin E.S., Wilson J. Coal: energy for the future // Progress in Energy and Combustion Sci. 1995. Vol. 21, No. 4. P. 269–360.
- 2. Горлов Е.Г. Композиционные водосодержащие топлива из углей и нефтепродуктов // Химия твердого топлива. 2004. № 6. С. 50–61.
- Syrodoy S.V., Kuznetsov G.V., Gutareva N.Y., Salomatov V.V. The efficiency of heat transfer through the ash deposits on the heat exchange surfaces by burning coal and coal-water fuels // J. Energy Institute. 2018. Vol. 91. P. 1091–1101.
- 4. Zhang Y., Bo Y., Wu Y., Wu X., Huang Z., Zhou J., Cen K. Flow behavior of high-temperature flue gas in the heat transfer chamber of a pilot-scale coal-water slurry combustion furnace // Particuology. 2014. Vol. 17. P. 114–124.
- Liu J., Wang R., Xi J., Zhou J., Cen K. Pilot-scale investigation on slurrying, combustion, and slagging characteristics of coal slurry fuel prepared using industrial wasteliquid // Applied Energy. 2014. Vol. 115. P. 309–319.
- Waqas S.M., Fattah A.S., Raza M.K. Coal water slurry in energy sector // Int. Conf. on Engng Sci. Institute of Chemical Engineering & Technology, University of Punjab. 2012. P. 1–6.
- Huang Z., Qin C., Gao G. Theoretical analysis on CWM drop combustion history // Proc. 8-th Symp. (Intern.) Coal Slurry Fuels Preparation and Utilization. Pt. 1. USA, Orlando, 1986. P. 343–358.
- Matthews K.J., Jones A.R. The effect of coal composition on coal-water slurry combustion and ash deposition characteristics // Proc. 8-th Symp. (Intern.) Coal Slurry Fuels Preparation and Utilization. Pt. 1. USA, Orlando, 1986. P. 388–407.
- 9. Kijo-Kleczkowska A. Combustion of coal-water suspensions // Fuel. 2011. Vol. 90. P. 865-877.
- Kolb T., Farmayan W.F., Walsh P.M., Beer J.M. The contribution of radiation to the ignition of a confined turbulent coal-water slurry diffusion flame // Combustion Sci. and Technology. 1988. Vol. 58. P. 77–95.
- Muto M., Yuasa K., Kurose R. Numerical simulation of ignition in pulverized coal combustion with detailed chemical reaction mechanism // Fuel. 2017. Vol. 190. P. 136–144.
- Саломатов В.В., Кравченко И.В. Теоретическое исследование горения капли водоугольного топлива. Ч. І. Стадия прогрева // Горение и плазмохимия. 2007. Т. 5, вып. 3. С. 178–188.
- Саломатов В.В., Кравченко И.В. Теоретическое исследование горения капли водоугольного топлива. Ч. П. Стадия испарения // Горение и плазмохимия. 2007. Т. 5, вып. 3. С. 189–198.
- Саломатов В.В., Кравченко И.В. Теоретическое исследование горения капли водоугольного топлива. Ч. III. Стадия воспламенения // Горение и плазмохимия. 2008. Т. 6, вып. 1. С. 56–59.
- Саломатов В.В., Кравченко И.В. Теоретическое исследование горения капли водоугольного топлива. Ч. IV. Стадия горения // Горение и плазмохимия. 2008. Т. 6, вып. 3. С. 171–178.

- 16. 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 Sci. and Engng. 2014. Vol. 66. P. 012040-1–012040-7.
- 17. 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.
- 18. Кузнецов Г.В., Саломатов В.В., Сыродой С.В. Влияние условий теплообмена на характеристики зажигания частиц водоугольного топлива // Теплоэнергетика. 2015. № 10. С. 16–21.
- 19. Сыродой С.В., Кузнецов Г.В., Саломатов В.В. Влияние форм частиц на характеристики воспламенения водоугольного топлива // Химия твердого топлива. 2015. Т. 3, № 6. С. 28–34.
- 20. Syrodoy S.V., Kuznetsov G.V., Zhakharevicha 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 // Combustion and Flame. 2017. Vol. 80. P. 196–206.
- 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. P. 01018-1–01018-6.
- **22.** Франк-Каменецкий Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1947. 367 с.
- 23. Сполдинг Д.Б. Основы теории горения. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1959. 320 с.
- 24. Ahn K.Y., Bbaek S.W., Choi C.E. Investigation of a coal-water slurry droplet exposed to hot gas stream // Combustion Sci. and Technology. 1994. Vol. 97, No. 4–6. P. 429–447.
- 25. Hertz H. On the evaporation of liquids, especially mercury, in vacuo // Annals of Physics. 1882. Vol. 17, No. 177. P. 12–17.
- 26. Кузнецов Г.В. Экспериментальная оценка прочности кокса обугливающегося резиноподобного теплозащитного материала // Физика горения и взрыва. 1996. Т. 32, № 5. С. 143–150.
- 27. Кузнецов Г.В. Высокотемпературное разрушение резиноподобных теплозащитных материалов в условиях высоких давлений // Теплофизика высоких температур. 1996. Т. 34, № 6. С. 919–923.
- 28. Формалев В.Ф. Моделирование нелинейной неизотермической фильтрации в условиях пленочного охлаждения анизотропных тел // Теплофизика высоких температур. 1997. Т. 35, № 2. С. 286–292.
- **29. Формалев В.Ф.** Тепломассоперенос в анизотропных телах // Теплофизика высоких температур. 2001. Т. 39, № 5. С. 810–832.
- 30. Salomatov V.V., Kuznetsov G.V., Syrodoy S.V., Gutareva N.Y. Ignition of coal-water fuel particles under the conditions of intense heat // Applied Thermal Engng. 2016. Vol. 106. P. 561–569.
- **31.** Syrodoy S.V., Kuznetsov G.V., Gutareva N.Y., Bugaeva K.A., Taburchinov R.I. The conditions and characteristics of wood particles ignition in the stream of the high temperature gases // Combustion Sci. and Technology. 2018. Vol. 190. P. 663–686.
- 32. Кузнецов Г.В., Саломатов В.В., Сыродой С.В. Воспламенение частиц влажной древесной биомассы в условиях конвективной диффузии водяных паров в пристенной области // Физика горения и взрыва. 2018. Т. 54, № 3. Р. 325–336
- 33. 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. С. 84–87.
- 34. Chen Y., Aanjaney K., Atrey A. A study to investigate pyrolysis of wood particles of various shapes and sizes // Fire Safety J. 2017. Vol. 91. P. 820–827.
- 35. Leverett M. C. Flow of oil-water mixtures through unconsolidated and sands // Trans AIME. 1939. Vol. 132. P. 149–171.
- 36. Stokes G.G. On the effect of the internal friction of fluids on the motion of pendulums // Transactions of the Cambridge Philosophical Society. 1851. Vol. 9, No. 8. P. 1–86.
- 37. Гремячкин В.М., Мазанченко Е.П. Газификация углерода в парах воды // Химическая физика. 2009. Т. 28, № 8. С. 36–43.
- 38. Шендрик Т.Г. Формирование пористой структуры бурого угля при термолизе с гидроксидом калия // Химия твердого топлива. 2009. № 5. С. 51–55.
- 39. Страхов В.Л., Гаращенко А.Н., Кузнецов Г.В., Рудзинский В.П. Математическое моделирование теплофизических и термохимических процессов при горении вспучивающихся огнезащитных покрытий // Физика горения и взрыва. 2001. Т. 37, № 2. С. 63–73.
- 40. Энхжаргал Х., Саломатов В.В. Математическое моделирование термоподготовки и горения угольной частицы. 5. Стадия выгорания // Инж.-физ. журнал. 2011. Т. 84, № 4. С. 836-841.
- **41. 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. P. 01006-1–01006-5.
- 42. Arrhenius S.A. Über die Dissociationswärme und den Einfluss der Temperatur auf den Dissociationsgrad der Elektrolyte // Zeitschrift für Physikalische Chemie. 1889. Vol. 4. P. 96–116.
- 43. Глушков Д.О., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Тепломассоперенос при газофазном зажигании слоя измельченного угля нескольими нагретыми до высоких температур металлическими частицами // Теплофизика и аэромеханика. 2017. Т. 24, № 4. С. 609–621.
- 44. Соколова И.А. Модельное описание диффузии в многокомпонентных газах // Математическое моделирование. 1993. Т. 5, № 5. С. 71–91

- 45. Агроскин А.А., Глейбман В.Б. Теплофизика твердого топлива. М.: Недра, 1980. 256 с.
- 46. Липович В.Г. Химия и переработка угля. М.: Химия, 1988. 336 с.
- 47. Померанцев В.В. Основы практической теории горения. Л.: Энергоатомиздат, 1986. 312 с.
- Mantzaras J. Catalytic combustion of syngas // Combustion Sci. and Technology. 2008. Vol. 180, No. 6. P. 1137–1168.
- 49. Jian W.C., Wen J., Lu S., Guo J. Single-step chemistry model and transport coefficient model for hydrogen combustion // Sci. China Technology Sci. 2012. Vol. 55. P. 2163–2168.
- 50. 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 gases // J. Energy Institute. 2018. Vol. 91, Iss. 1. P. 133–144.
- 51. Roache P.J. Computational fluid dynamics. Albuquerque: Hermosa Publishers, 1976. 446 p.
- 52. Самарский А.А. Локально-одномерные разностные схемы на неравномерных сетках // Журн. вычисл. матем. и матем. физики. 1963. Т. 3, № 3. С. 431–466.
- 53. Полежаев В.И., Бунэ А.В., Верезуб А.В., Глушко Г.С., Грязнов В.Л., Дубовик К.Г., Никитин С.А., Простомолов А.И. Математическое моделирование конвективного тепломассообмена на основе уравнений Навье-Стокса. М.: Наука, 1987. 272 с.
- 54. Самарский А.А., Моисеенко Б.Д. Экономичная схема сквозного счета для многомерной задачи Стефана // Журн. вычисл. матем. и матем. физики. 1965. Т. 5, № 5. С. 816–827.
- 55. Салганский Е.А., Фурсов В.П., Глазов С.В., Салганская М.В., Манелис Г.Б. Модель паровоздушной газификации в фильтрационном режиме // Физика горения и взрыва. 2006. Т. 42, № 1. С. 65–72.

Статья поступила в редакцию 4 сентября 2018 г.,

после переработки — 7 мая 2019 г., принята к публикации 4 июня 2019 г.