

РАЗРАБОТКА И АНАЛИЗ ФИЗИЧЕСКОЙ И МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛЕЙ ГОРЕНИЯ ЕДИНИЧНЫХ КАПЕЛЬ ВОДОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА В ТОПКАХ КОТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК

Рассмотрено одно из направлений повышения эффективности использования угля — сжигание его в виде суспензии водоугольного топлива (ВУТ). Разработаны физическая и математические модели горения капли ВУТ с разделением данного процесса на последовательность повторяющихся стадий испарения влаги и выгорания твердой фазы. Получена формула для расчета времени выгорания единичной капли ВУТ на основе уравнения Срезневского. Представлены и проанализированы результаты вычисления времени горения капли в зависимости от радиуса капли и содержания влаги.

Ключевые слова: водоугольное топливо, воспламенение капли ВУТ, горение капли ВУТ, физическая модель горения капли ВУТ, математическая модель горения капли ВУТ.

Введение. Вопросы повышения эффективности использования природных ресурсов и создания ресурсосберегающих технологий становятся все более актуальными. Для эффективного сжигания угля применяется технология ВУТ (дисперсной топливной системы, состоящей из угля, воды и стабилизирующих добавок).

Для наиболее полного сжигания ВУТ необходимо детальное исследование закономерностей воспламенения и горения данного топлива. Расчет времени выгорания единичной капли ВУТ позволяет выявить эти закономерности. Более того, определение времени выгорания капли ВУТ является одной из проблем технологии использования ВУТ, потому что данный параметр играет решающую роль в конструировании топочных устройств котельных агрегатов, предназначенных для сжигания данного топлива.

Разработка физической модели горения капли ВУТ. При моделировании процесса зажигания капли ВУТ была принята следующая гипотеза [1]: капля ВУТ имеет сферическую форму и многослойную структуру (рис. 1).

За счет действия сил поверхностного натяжения на поверхности каждой капли имеется плотный слой воды толщиной s_1 . Затем идет монослой твердого топлива толщиной s_2 . Таким образом, n слоев воды чередуются с n слоев твердого топлива. Значения s_1 и s_2 отличаются друг от друга и зависят от содержания воды в ВУТ:

$$s_1 = \frac{W \cdot r_k}{2n}, \quad (1)$$

$$s_2 = \frac{(1 - W) \cdot r_k}{2n}, \quad (2)$$

где r_k — радиус капли, мм; W — содержание воды в ВУТ; n — количество слоев воды и топлива.

Процесс воспламенения и горения капли ВУТ принято условно разделять на несколько периодов: сушки, термического разложения угля, воспламенения, горения коксового остатка. В действительности, капля ВУТ, попав в топочное пространство, практически сразу же вступает в реакцию с кислородом, а процессы сушки и термического разложения угля протекают параллельно с процессом горения [1, 2].

С течением времени фронт горения продвигается вовнутрь капли [1]. Происходит уменьшение радиуса капли до $r_{k2} = r_{k1} - s_2$ и теплообмен между каплей ВУТ и топочным пространством: поток тепла от топочных газов поступает к поверхности капли, в свою очередь, от капли происходит отток продуктов сгорания.

Далее процесс повторяется: испаряется второй слой воды и выгорает второй слой топлива и т. д., пока не выгорит вся капля ВУТ.

Следовательно, время выгорания капли ВУТ $\tau_{r.k.}$ будет включать в себя время испарения всех слоев воды и время выгорания всех слоев топлива:

$$\tau_{r.k.} = \sum_{i=1}^n \tau_{u.B.} + \sum_{i=1}^n \tau_{u.T.Ф.}, \quad (3)$$

где $i = 1 \dots n$ — номер слоя воды и твердого топлива; $\tau_{u.B.}$ — время испарения слоя воды; $\tau_{u.T.Ф.}$ — время выгорания слоя твердой фазы.

Таким образом, капля ВУТ представляется в виде следующей упрощенной структуры [1]:

1. Слои воды и твердого топлива в целом являются шарами с совпадающими центрами.

2. Твердое топливо и вода в составе ВУТ, а также топочные газы являются однородными средами

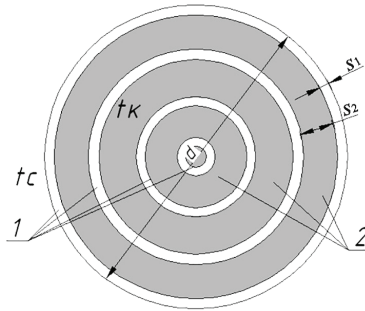


Рис. 1. Физическая модель горения капли ВУТ в топочном пространстве в начальный момент времени:

1 — вода; 2 — уголь; t_c — температура внешней среды;
 t_k — температура капли в начальный момент времени;
 s_1 — толщина слоя воды, мм;
 s_2 — толщина слоя угля, мм

с одинаковыми физико-механическими характеристиками по всему объему. Эти характеристики известны и не зависят от температуры.

3. Частица нагревается за счет конвекции.

4. Выделение смол органической части топлива под влиянием температуры не учитывается.

5. Процессы испарения влаги и выгорания топлива каждого из слоев последовательны (при горении слоя твердой фазы испарения следующего слоя жидкости не происходит).

Разработка математической модели горения единичной капли ВУТ. Важным показателем эффективности горения капли жидкого топлива является время выгорания капли. Чем ниже это значение, тем эффективнее протекает процесс горения топлива.

В настоящее время существует два подхода к описанию горения единичной капли топлива: с использованием диффузионной теории горения и по диффузионной теории горения с учетом кинетических факторов [3, 4]. Различие этих двух подходов к анализу горения капли заключается в следующем. Диффузионная теория предполагает, что время выгорания капли и характеристики процесса определяются диффузионным переносом паров топлива и кислорода к месту горения. При втором подходе дополнительно учитывается кинетическое сопротивление горению. При малых диаметрах каплей и малых числах Рейнольдса (относительная скорость потока газов и каплей в этом потоке мала) горение капли описывается чисто диффузионной теорией. Экспериментально установлено, что скорость испарения капли, подсчитанная по диффузионной теории, удовлетворительно совпадает с опытными данными, температура в зоне горения оказывается меньше расчетной, а зона горения расположена ближе к поверхности по сравнению с расчетными данными [2, 3].

На процесс испарения капли ВУТ влияют различные факторы: свойства топлива, температура газа, окружающей каплю, диаметр (радиус) капли [2, 5]. ВУТ представляет собой смесь двух фаз: твердой и жидкой. В соответствии с предложенной физической моделью горения единичной капли ВУТ при кипении капли происходит последовательное испарение слоев жидкой и твердой фазы. Так как диаметр капли небольшой, испарение слоев происходит очень быстро, диффузионные процессы выравнивания химического состава внутри каждого слоя практически отсутствуют, и можно считать, что испаряются фазы одного, среднего состава,

а температура капли в процессе испарения остается постоянной, равной температуре кипения. При этом считается, что теплообмен между пламенем и каплей осуществляется за счет конвекции.

Рассмотрим отдельно испарения каждого слоя капли [6–8].

1-й слой. Испарение слоя воды, толщиной s_1 с поверхности капли. Начальный радиус капли — r_k , конечный радиус капли — $r_k - s_1$.

За время испарения воды $d\tau_{и.в.}$ выделится количество теплоты:

$$dQ^1 = 4\pi r_k^2 \alpha (T_\Gamma - T_{и.в.}) d\tau_{и.в.}^1, \quad (4)$$

где $4\pi r_k^2$ — площадь медианного сечения капли; α — коэффициент теплоотдачи от газовой среды к слою; T_Γ — температура газовой среды в топке; $T_{и.в.}$ — температура поверхности слоя жидкой фазы.

При уменьшении радиуса капли на dr_k количество испарившейся воды составит:

$$dG_{т.ф.}^{(1)} = -4\pi r_k^2 \rho_B dr_k, \quad (5)$$

где ρ_B — плотность жидкой фазы.

Иначе количество испарившейся влаги можно определить из выражения:

$$dG_B = \frac{dQ^1}{q_{исн.в.}}, \quad (6)$$

где $q_{исн.в.}$ — испарение жидкой фазы. С учетом (4):

$$dG_B = \frac{4\pi r_k^2 \alpha (T_\Gamma - T_{и.в.}) d\tau_{и.в.}^1}{q_{исн.в.}}. \quad (7)$$

Приравнявая (6) и (7), получим

$$-\rho_B dr_k = \frac{\alpha (T_\Gamma - T_{и.в.}) d\tau_{и.в.}^1}{q_{исн.в.}}, \quad (8)$$

откуда

$$d\tau_{и.в.}^1 = -\frac{q_{исн.в.} \rho_B dr_k}{\alpha (T_\Gamma - T_{и.в.})}. \quad (9)$$

Коэффициент теплоотдачи α определяется экспериментально. В условиях конвективного теплообмена α может быть найден из критерия Нуссельта:

$$Nu = \frac{\alpha d_k}{\lambda}, \quad (10)$$

где λ — коэффициент теплопроводности газовой смеси, окружающей каплю.

Известно, что для мелких каплей при $Re < 100$ критерий $Nu = 2$, тогда:

$$\alpha = \frac{\lambda}{r_k}. \quad (11)$$

Подставив найденное α в (9), получим

$$d\tau_{и.в.}^1 = -\frac{q_{исн.в.} \rho_B r_k dr_k}{\lambda (T_\Gamma - T_{и.в.})}. \quad (12)$$

За время испарения первого слоя радиус капли изменяется от r_k до $r_k - s_1$, т.е.

$$\int_0^{\tau_{и.в.}^1} d\tau_{и.в.}^1 = \frac{\int_{r_k - s_1}^{r_k} q_{исн.в.} \rho_B r_k dr_k}{\lambda (T_\Gamma - T_{и.в.})}. \quad (13)$$

Учитывая, что в соответствии с приведенными выше упрощениями все величины в (13), кроме r_k , остаются в процессе испарения постоянными, получаем после интегрирования

$$\tau_{И.В.}^1 = \frac{q_{исн.В.} \rho_B}{\lambda(T_\Gamma - T_{И.В.})} \left(r_k s_1 - \frac{s_1^2}{2} \right), \quad (14)$$

отсюда

$$\tau_{И.В.}^1 = k_{исн.В.} \left(r_k s_1 - \frac{s_1^2}{2} \right), \quad (15)$$

где $k_{исн.В.} = \frac{q_{исн.В.} \rho_B}{\lambda(T_\Gamma - T_{И.В.})}$ — константа испарения для жидкой фазы.

2-й слой. Испарение слоя твердой фазы, толщиной s_2 с поверхности капли. Начальный радиус капли — $r_k - s_1$, конечный радиус капли — $r_k - s_1 - s_2$.

За время испарения твердой фазы $d\tau_{и.т.ф.}^{(2)}$ выделяется количество теплоты:

$$dQ^{(2)} = 4\pi r_k^2 \alpha (T_\Gamma - T_{и.т.ф.}) d\tau_{и.т.ф.}^{(2)}, \quad (16)$$

где $T_{и.т.ф.}$ — температура поверхности слоя твердой фазы.

При уменьшении радиуса капли на dr_k количество испарившейся твердой фазы составит:

$$dG_{Т.Ф.}^{(2)} = -4\pi r_k^2 \rho_{Т.Ф.} dr_k, \quad (17)$$

где $\rho_{Т.Ф.}$ — плотность твердой фазы.

Иначе количество испарившейся влаги можно определить из выражения по аналогии с (6):

$$dG_{Т.Ф.}^{(2)} = \frac{dQ^{(2)}}{q_{исн.Т.Ф.}}, \quad (18)$$

где $q_{исн.Т.Ф.}$ — испарение твердой фазы. С учетом (16):

$$dG_{Т.Ф.}^{(2)} = \frac{4\pi r_k^2 \alpha (T_\Gamma - T_{и.т.ф.}) d\tau_{и.т.ф.}^{(2)}}{q_{исн.Т.Ф.}}. \quad (19)$$

Приравнявая (17) и (9) аналогично (8) и (9), получим

$$d\tau_{и.т.ф.}^{(2)} = -\frac{q_{исн.Т.Ф.} \rho_{Т.Ф.} dr_k}{\alpha (T_\Gamma - T_{и.т.ф.})}. \quad (20)$$

Проинтегрировав выражение (20) с учетом изменения радиуса капли от $r_k - s_1$ до $r_k - s_1 - s_2$, имеем

$$\tau_{и.т.ф.}^{(2)} = \frac{q_{исн.Т.Ф.} \rho_{Т.Ф.}}{\lambda (T_\Gamma - T_{и.т.ф.})} \left(r_k s_2 - s_1 s_2 - \frac{s_2^2}{2} \right) \quad (21)$$

или

$$\tau_{и.т.ф.}^{(2)} = k_{исн.Т.Ф.} \left(r_k s_2 - s_1 s_2 - \frac{s_2^2}{2} \right), \quad (22)$$

где $k_{исн.Т.Ф.} = \frac{q_{исн.Т.Ф.} \rho_{Т.Ф.}}{\lambda (T_\Gamma - T_{и.т.ф.})}$ — константа испарения для твердой фазы.

3-й слой. Испарение слоя жидкой фазы, толщиной s_1 с поверхности капли. Начальный радиус капли — $r_k - s_1 - s_2$, конечный радиус капли — $r_k - 2s_1 - s_2$. Преобразования проводятся по формулам (4)–(15). Получаем

$$\tau_{И.В.}^3 = k_{исн.В.} \left(r_k s_1 - \frac{3s_1^2}{2} - s_1 s_2 \right). \quad (23)$$

4-й слой. Испарение слоя твердой фазы, толщиной s_2 с поверхности капли. Начальный радиус капли — $r_k - s_1 - s_2$, конечный радиус капли — $r_k - 2s_1 - 2s_2$. Преобразования проводятся по формулам (16)–(22). Получаем

$$\tau_{и.т.ф.}^{(4)} = k_{исн.Т.Ф.} \left(r_k s_2 - 2s_1 s_2 - \frac{3s_2^2}{2} \right). \quad (24)$$

Соответственно, для **5-го слоя**

$$\tau_{И.В.}^{(5)} = k_{исн.В.} \left(r_k s_1 - \frac{5s_1^2}{2} - 2s_1 s_2 \right), \quad (25)$$

и т. д. для n слоев жидкой и твердой фаз.

Анализируя формулы (15) и (22)–(25), можно выявить зависимость. Вводим коэффициенты k_B и $k_{Т.Ф.}$ для жидкой и твердой фаз

$$k_B = s_1 s_2 + s_1^2, \quad (26)$$

$$k_{Т.Ф.} = s_1 s_2 + s_2^2. \quad (27)$$

С учетом (3)

$$\tau_{Г.К.} = k_{исн.В.} \sum_{i=1}^n \left(r_k s_1 - \frac{s_1^2}{2} - k_B (n-1) \right) + k_{исн.Т.Ф.} \sum_{i=1}^n \left(r_k s_2 + \frac{s_2^2}{2} - k_{Т.Ф.} n \right). \quad (28)$$

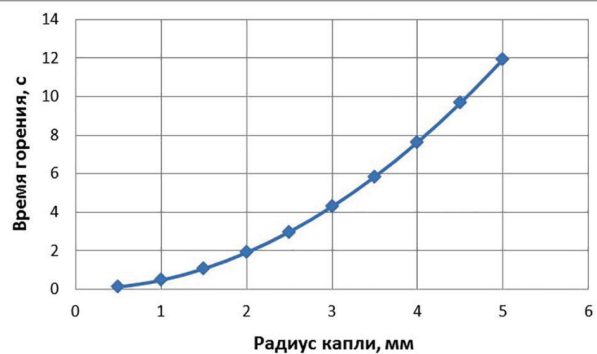


Рис. 2. Зависимость времени выгорания капли ВУТ от радиуса капли

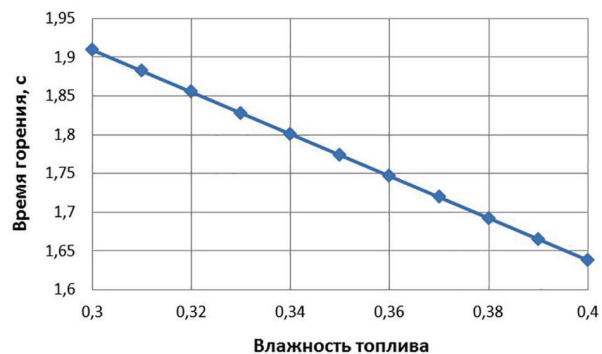


Рис. 3. Зависимость времени выгорания капли ВУТ от содержания жидкой фазы при радиусе капли 2 мм

Преобразуем (28), используя (1), (2), (26) и (27)

$$\tau_{г.к.} = k_{исп.В} \cdot r_k^2 W \sum_{i=1}^n \left(\frac{2n+1}{8n^2} \right)_i + k_{исп.Т.Ф} \cdot r_k^2 (1-W) \sum_{i=1}^n \left(\frac{2n+1-W}{8n^2} \right)_i. \quad (29)$$

Для более точных расчетов принимаем $n \rightarrow \infty$. Поэтому формула (29) примет вид:

$$\tau_{г.к.} = (k_{исп.В} \cdot W + k_{исп.Т.Ф} \cdot (1-W)) \cdot r_k^2. \quad (30)$$

Выражение (30) является законом Срезневского для горения единичной капли ВУТ.

На рис. 2 и 3 представлены результаты расчетов времени выгорания единичной капли ВУТ в зависимости от радиуса капли и влажности.

Выводы

Проанализировав выражения (15), (22), (30) и рис 2 и 3, можно сделать выводы:

1. Время выгорания капли ВУТ резко возрастает с увеличением радиуса капли. Эта зависимость носит параболический характер. Поэтому важно уменьшать размер капли для более полного и эффективного горения ВУТ.

2. Время выгорания капли ВУТ связано с содержанием воды в данном топливе. Обычно его доля составляет 30–40 % [9, 10]. При превышении этих значений выгорание капли приобретает затяжной характер, уменьшается температура горения топлива, увеличивается объем продуктов сгорания, понижается эффективность горения. С другой стороны, если содержание воды меньше, то повышается вязкость топлива и, как следствие, ухудшается распыление топлива, диаметр капель увеличивается и также время выгорания капли возрастает. Исходя из вышеизложенного, необходимо поддерживать содержание воды в ВУТ в данных пределах.

3. С ростом температуры газовой среды, уменьшается время выгорания капли топлива. Но по технологическим требованиям необходимо поддерживать температуру в допустимых пределах, чтобы не допустить пережога поверхностей нагрева котельного агрегата или погасание факела.

Библиографический список

1. Флек Е. С. Разработка физической модели горения капли водоугольного топлива // Омский научный вестник. 2017. № 6 (156). С. 102–105.

2. Винтовкин А. А., Ладыгичев М. Г., Годобин Ю. М. [и др.]. Технологическое сжигание и использование топлива. М.: Металлургия, 1998. 286 с.

3. Зельдович Я. Б., Баренблатт Г. И., Либрович В. Б. [и др.]. Математическая теория горения и взрыва. М.: Наука, 1980. 480 с.

4. Споддинг Д. Б. Основы теории горения. М.: Государственное энергетическое изд-во, 1959. 321 с.

5. Деягин Г. Н. Опыт сжигания водоугольных суспензий в топках паровых котлов (обзор). М.: ЦНИИТЭИ угля, 1966. 89 с.

6. Калинина В. Н., Панкин В. Ф. Математическая статистика. 4-е изд., испр. М.: Дрофа, 2002. 336 с. ISBN 5-7107-6039-0.

7. Кобзарь А. И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. М.: Физматлит, 2006. 816 с.

8. Vershinina K. Y., Egorov R. I., Strizhak P. A. The ignition parameters of the coal-water slurry droplets at the different methods of injection into the hot oxidant flow // Applied thermal engineering. 2016. № 107. P. 10–20. DOI:10.1016/j.applthermaleng.2016.06.156.

9. Годобин Ю. М., Кузнецов П. С. О сжигании распыленного жидкого топлива // Вестник ЮУрГУ. Сер. Энергетика. 2016. Т. 16, № 4. С. 91–94.

10. Ермакова Л. А., Мочалов С. П., Калашников С. Н., Пермяков А. А. Механизм горения капель суспензионного водоугольного топлива в вихревой топке автоматизированного энергогенерирующего комплекса // Вестник КемГУ. 2012. № 4 (52), т. 2. С. 164–169.

ФЛЕК Екатерина Сергеевна, аспирантка кафедры «Теплоэнергетика».

SPIN-код: 3231-5660

AuthorID (РИНЦ): 862561

Адрес для переписки: voropaeva90@list.ru

Для цитирования

Флек Е. С. Разработка и анализ физической и математической моделей горения единичных капель водоугольного топлива в топках котельных установок // Омский научный вестник. 2018. № 4 (160). С. 99–102. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-160-99-102.

Статья поступила в редакцию 22.05.2018 г.

© Е. С. Флек