

УДК 662.654.1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОДОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА ПО УСЛОВИЯМ ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ И ГАЗИФИКАЦИИ

Мингалеева Г.Р.

*Исследовательский центр проблем энергетики Федерального
государственного бюджетного учреждения науки
Казанского научного центра РАН, г. Казань*

Одной из наиболее перспективных технологий энергетического использования угля является приготовление водоугольных суспензий, представляющих собой не просто механическую смесь угольной пыли и воды, а композиционное жидкое топливо, обладающее заранее заданными технологическими свойствами, обеспечивающими минимальные эксплуатационные затраты при его приготовлении, хранении, транспортировании, сжигании или газификации. Данным вопросам в последние годы было посвящено большое количество работ, наиболее интересные из них касаются разработки эффективных технологических схем [1–4] и моделирования процессов взаимодействия частиц угля с дисперсионной фазой – водой [5–7]. Основной проблемой при использовании водоугольного топлива (ВУТ) является высокая вязкость суспензии при необходимой концентрации угольной пыли. Исследователями рассматриваются различные параметры ВУТ, влияющие на вязкость, – содержание твердой фазы, температура суспензии, состав угля, состояние поверхности частиц и др. При этом многими авторами признано, что водоугольные суспензии с бифракционным составом дисперсной фазы обладают лучшими реологическими характеристиками по сравнению с традиционным топливом с полифракционным составом угольной пыли [4]. Однако для приготовления топлива с бифракционным составом угольной пыли требуется некоторое усложнение технологической схемы, связанной с установкой дополнительных измельчающих устройств или классификаторов.

Водоугольное топливо (ВУТ) является на сегодняшний день перспективным энергоресурсом как в плане замены жидкого котельного топлива – мазута, так и в качестве альтернативы природному газу. Для получения газа необходима термическая переработка ВУТ - газификация. При сопоставлении результатов исследований можно сделать вывод о том, что для проведения процесса газификации не обязательно доведение массовой доли угля до максимальных значений (60-65% по массе) поскольку наибольший химический КПД процесса достигается при гораздо меньшем содержании угля в суспензии – около 50% по массе [8].

В связи с этим в настоящей работе определялись оптимальные характеристики водоугольного топлива по условиям достижения минимальных значений динамической вязкости при транспортировании и максимальной теплотворной способности газа, получаемого при газификации данного вида топлива, а также выявлены наиболее значимые факторы, влияющие на данные процессы.

Существует несколько способов определения вязкости суспензий. Наиболее простой способ предполагает определение вязкости суспензии в зависимости от вязкости μ_0 сплошной фазы и объемной концентрации φ дисперсной фазы.

Вязкость суспензии μ может быть найдена в зависимости от эффективной вязкости μ_r и вязкости сплошной среды μ_0 :

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}. \quad (1)$$

Вязкость определяется по различным зависимостям для разбавленных и высококонцентрированных суспензий. Разбавленными принято считать суспензии с массовой долей дисперсной твердой фазы менее 45%, высококонцентрированными – с содержанием дисперсной фазы 45% и более. Водугольное топливо относится к высококонцентрированным суспензиям, поскольку изначально оно должно обеспечивать достаточно высокую теплотворную способность за счет содержания угольной пыли.

Для определения вязкости высококонцентрированных суспензий разработан ряд моделей – модель свободной поверхности, модель эффективной среды, модель смазки, учитывающие механизм течения и характер взаимодействия между частицами. Наилучшее согласование с экспериментальными данными дает модель смазки [7], впервые рассмотренная Фрэнкелем и Акривосом. В этой модели отдельная частица рассматривается в окружении z равноудаленных от нее ближайших соседей. Согласно модели смазки эффективная вязкость суспензии определяется по формуле [7]:

$$\mu_r = \frac{3z}{16} \cdot \frac{1}{(\varphi_m/\varphi)^{1/3} - 1}, \quad (2)$$

где φ_m – предельная объемная концентрация частиц твердой фазы, когда расстояние между поверхностями частиц много меньше их диаметра (для ВУТ обычно принимается 0,61). Плотность упаковки частиц характеризуется параметром z , который также зависит от φ :

$$z = \frac{4 - \varphi + \sqrt{(4 - \varphi)^2 - 16(1 - \varphi)}}{2(1 - \varphi)}. \quad (3)$$

В данной работе проведены расчеты эффективной динамической вязкости ВУТ по модели Фрэнкеля и Акривоса при массовой доле угля в суспензии от 45 до 75% для угольной пыли полидисперсного состава, полученной из Кузнецкого угля марки Т (табл. 1).

Таблица 1. Результаты расчетов эффективной вязкости ВУТ

| | | | | | | | |
|---------------------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| Массовая доля угля в суспензии, x | 0,45 | 0,5 | 0,55 | 0,6 | 0,65 | 0,7 | 0,75 |
| Объемная доля угля в суспензии, φ | 0,32 | 0,35 | 0,39 | 0,43 | 0,46 | 0,5 | 0,53 |
| Параметр, характеризующий плотность упаковки, z | 3,90 | 4,16 | 4,44 | 4,76 | 5,11 | 5,52 | 5,98 |
| Эффективная вязкость суспензии, μ_r , Па·с | 0,42 | 0,49 | 0,56 | 0,63 | 0,71 | 0,78 | 0,86 |

Поскольку динамическая вязкость ВУТ в значительной степени зависит от массовой доли угля в суспензии, а повышение вязкости топлива приводит к росту энергетических затрат на смешение и транспортирование по трубопроводам,

необходимо стремиться к оптимальному значению данного параметра, не превышающего 0,5 Па·с. Для определения возможного изменения вязкости суспензии при транспортировании по трубопроводам были проведены измерения при помощи ротационного вискозиметра RM 100 в широком диапазоне скоростей сдвига от 2 до 304 с⁻¹ для суспензии, приготовленной на основе Кузнецкого угля марки Т с массовой долей дисперсной фазы 50% (табл. 2). Результаты показывают, что значения μ_r не превышают 0,5 Па·с.

Таблица 2. Результаты измерения динамической вязкости ВУТ, приготовленного на Кузнецкого угля марки Т

| | | | | | | | | |
|------------------------------------------------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|
| Скорость сдвига, с ⁻¹ | 2,87 | 4,1 | 8,43 | 17,5 | 35,3 | 72,5 | 149,0 | 304,0 |
| Эффективная вязкость суспензии, μ_r , Па·с | 0,46 | 0,39 | 0,14 | 0,08 | 0,05 | 0,04 | 0,03 | 0,02 |

Для совместного рассмотрения таких важных характеристик процесса использования ВУТ как доля угля, эффективная вязкость, теплотворная способность получаемого при газификации ВУТ газа создана оптимизационная математическая модель, включающая уравнения материального и теплового баланса процесса газификации ВУТ, зависимости для определения динамической вязкости разбавленных и высококонцентрированных суспензий, в которой в качестве управляемых переменных выбраны массовая доля угля в суспензии и температура газификации в диапазоне 700-1200 °С. Критерием оптимизации являлась теплотворная способность газа, полученного из 1 кг ВУТ.

Расчет по модели заключался в том, чтобы определить:

$$\max \left[Q_{\text{гг}}(\varphi) = \sum_i Q_i(\varphi)x_i \right], \quad (4)$$

при условии

$$\min[\mu_r = f(\varphi)], \quad (5)$$

где $Q_{\text{гг}}$ – теплотворная способность генераторного газа, полученного из 1 кг ВУТ; φ – объемная доля угля в ВУТ; Q_i – теплотворная способность i -го компонента генераторного газа; x_i – объемное содержание i -го компонента в генераторном газе.

Рассматривался процесс воздушной газификации ВУТ в потоке при атмосферном давлении. Состав генераторного газа определялся по равновесному содержанию основных компонентов – H₂, CO, CO₂, CH₄, H₂O, N₂ (рис. 1).

Анализ полученных результатов показывает, что при массовой доле угля в суспензии 45–50% динамическая вязкость составляет не более 0,5 Па·с, при этом достигается наибольшая в данном температурном диапазоне теплотворная способность генераторного газа за счет увеличения содержания водорода до 18%. Проведено сравнение полученных результатов с известными расчетными и экспериментальными данными других авторов. Отдельные расчетные данные по определению динамической вязкости ВУТ подтверждены собственными экспериментальными исследованиями.

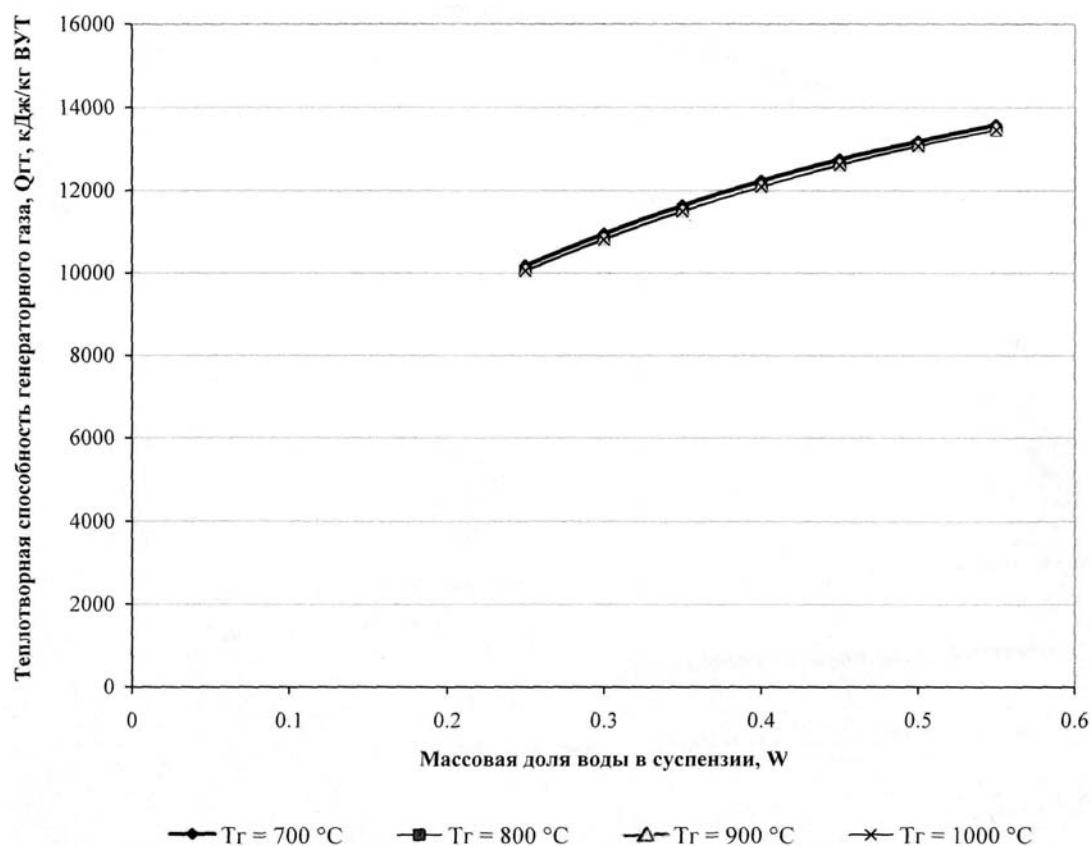


Рис. 1. Зависимость теплотворной способности генераторного газа от доли воды в суспензии, приготовленной на основе Кузнецкого угля марки Т

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №12-08-97055).

Литература

1. Крапчин И.П., Потапенко И.О. Экономическая эффективность приготовления и использования водоугольных суспензий – экологически чистого топлива для электростанций // Уголь. – 2003. – № 11. – С. 50-52.
2. Пат. РФ № 2268289. Способ получения композиционного водоугольного топлива / Мурко В.И., Федяев В.И., Дзюба Д.А. // БИ. 2006. №2.
3. Пат. РФ № 2178455. Способ получения водоугольного топлива / Делягин Г.Н., Петраков А.П., Ерохин С.Ф. // БИ. 2002. №2.
4. Пат. РФ № 1586170. Способ получения водоугольной суспензии / Ходаков Г.С., Золотухин В.С., Редькина Н.И. // БИ.1995. №8.
5. Потанин А.А., Черномаз В.Е., Тараканов В.М., Урьев Н.Б. Текучесть суспензий со структурообразующей высокодисперсной фракцией // Инженерно-физический журнал. – 1991. – Т.60. №1. – С.32-41.
6. Ходаков Г.С. Реология суспензий. Теория фазового течения и ее экспериментальное обоснование // Российский хим. журнал. – 2003. – Т. XLVII. №2. – С. 33-44.
7. Урьев Н.Б., Потанин А.А. Текучесть суспензий и порошков // М.: Химия, 1992. – 256 с.
8. Свищёв Д.А., Кейко А.В. Термодинамический анализ режимов газификации водоугольного топлива в потоке // Теплоэнергетика. – 2010. - №6. – С.33-36