

УДК 662.739

ВЛИЯНИЕ ТОРРЕФИКАЦИИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ТОПЛИВНЫХ СМЕСЕЙ ИЗ БИОМАССЫ И ВЫСОКОЗОЛЬНЫХ УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ

© 2024 г. Я. Д. Пудова*, В. А. Синельщиков**, Г. А. Сычев***

ФГБУН Объединенный институт высоких температур РАН (ОИВТ РАН), Москва, 125412 Россия

*e-mail: pudova.y.d@mail.ru

**e-mail: sinelshchikov@mail.ru

***e-mail: george.sytchev@yandex.ru

Поступила в редакцию 24.07.2023 г.

После доработки 19.09.2023 г.

Принята к публикации 04.10.2023 г.

Рассмотрено влияние процесса торрефикации на характеристики бинарных смесевых топлив, состоящих из растительной биомассы и высокозольных углеродсодержащих отходов техногенного происхождения. Показано, что за счет торрефикации можно компенсировать уменьшение теплоты сгорания смесевого топлива, связанное с добавкой высокозольного компонента. Предложен критерий для выбора режима торрефикации и получено соответствующее аналитическое выражение, позволяющее рассчитать минимально допустимое содержание биомассы в топливной смеси. Указанное выражение может быть использовано применительно к смесевым топливам из различных видов растительной биомассы и высокозольных углеродсодержащих отходов. Представлены количественные данные, демонстрирующие улучшение гидрофобных свойств смесевых топлив в результате торрефикации.

Ключевые слова: биомасса, углеродсодержащие отходы, торрефикация, смесевое топливо

DOI: 10.31857/S0023117724010061 EDN: OPTNWE

ВВЕДЕНИЕ

Постоянный рост отвалов золошлаковых отходов (ЗШО), образующихся на угольных тепловых электростанциях, является существенным фактором, приводящим к загрязнению окружающей среды. Площади, занимаемые ЗШО в РФ, составляют более 22 тыс. га, а количество накопленной золы превышает 1.5 млрд т и ежегодно увеличивается примерно на 26.6 млн т [1]. В рамках Энергетической стратегии, утвержденной Правительством РФ в июне 2020 г., поставлена задача к 2035 г. – увеличить объемы утилизации ЗШО до 50% от ежегодно образующихся. В настоящее время этот показатель в РФ не превышает 10%, в то время как в странах Евросоюза в 2016 г. он составлял 94%, в Китае – 70%, в США – 56%, а в Японии – 100% [2]. Главными потребителями ЗШО являются строительная промышленность (производство цемента, бетона, сорбентов), сельское хозяйство (рекультивация земель) и горно-строительная отрасль (ликвидация горных выработок) [2, 3]. Основной фактор, препятствующий более широкому вовлечению ЗШО в хозяйственный

оборот, – относительно высокое содержание несгоревшего углерода, связанное с недожогом топлива. В ряде случаев этот показатель может достигать до 25%, в то время как для использования ЗШО в строительной промышленности он не должен превышать 5%. Прямое дожигание углерода, содержащегося в ЗШО, представляется экономически нецелесообразным. Применение различных методов обогащения ЗШО позволяет получать углеродный концентрат (УК) с содержанием углерода вплоть до 65–70% и использовать его для повторного сжигания в качестве котельного топлива [4]. Совместное сжигание ЗШО с биомассой [5] можно рассматривать как альтернативный и более дешевый вариант их утилизации, что, с одной стороны, дает возможность использовать энергетический потенциал ЗШО, а с другой – при условии достаточного полного выгорания углерода позволяет применять оставшуюся золу в строительной индустрии.

Следует отметить, что совместное сжигание угля и биомассы рассматривается как весьма перспективный способ, дающий возможность

Таблица 1. Характеристики исходного сырья (*) и биомассы, торрефицированной при различных температурах, в расчете на сухое состояние

| Вид сырья и T_i | A , мас. % | Элементный состав, мас. % | | | | | δt | $M_{вр}$ | C_f | Q , МДж/кг |
|-------------------|--------------|---------------------------|------|------|------|-------|------------|----------|-------|-----------------|
| | | C | H | N | S | O | | | | |
| ДО* | 0.54 | 48.84 | 6.17 | 0.06 | 0.12 | 44.27 | – | 78.1 | 21.36 | 18.10 |
| ДО 240°C | 0.60 | 53.72 | 6.47 | 0.13 | 0.05 | 39.03 | 9.6 | 75.8 | 23.6 | 20.63 |
| ДО 270°C | 0.69 | 56.52 | 6.44 | 0.16 | 0.04 | 36.15 | 21.9 | 71.8 | 27.51 | 21.86 |
| ДО 300°C | 0.82 | 62.12 | 6.11 | 0.19 | 0.03 | 30.73 | 34.3 | 66.7 | 32.48 | 24.01 |
| ЛП* | 2.5 | 49.96 | 6.54 | 0.56 | 0.17 | 40.27 | – | 77.2 | 20.3 | 19.31 |
| ЛП 240°C | 2.93 | 56.21 | 6.37 | 0.88 | 0.16 | 33.45 | 14.6 | 73.3 | 23.77 | 21.99 |
| ЛП 270°C | 3.47 | 59.69 | 6.65 | 1.00 | 0.15 | 29.04 | 27.9 | 68.6 | 27.93 | 23.94 |
| ЛП 300°C | 4.64 | 70.23 | 5.08 | 1.16 | 0.26 | 18.63 | 46.1 | 57.7 | 37.66 | 27.04 |
| ЗШО* | 85.2 | 12.62 | 0.05 | 0.16 | 0.20 | 1.77 | – | 5.8 | 9.0 | 4.16 |
| УК* | 61.07 | 38.0 | 0.08 | 0.58 | 0.22 | 0.05 | – | 2.4 | 36.53 | 12.98 |

снизить вредное воздействие угольной энергетики на окружающую среду [6–10] и использовать в энергетических целях низкосортные угли [11]. Целесообразность совместного сжигания угля и твердого биотоплива подтверждается и экономическими оценками, согласно которым инвестиционные затраты в расчете на 1 кВт установленной мощности на строительство ТЭЦ, использующих в качестве топлива только биомассу, на порядок превышают инвестиционные затраты в расчете на 1 кВт выработанной мощности, необходимые для перевода действующих угольных электростанций на совместное сжигание угля и биомассы [12].

Использование смесового топлива, состоящего из торрефицированной биомассы и угля, дает дополнительные предпочтения при его сжигании как в котлах с ЦКС, так и в пылеугольных котлах. В последнем случае важным фактором является то, что торрефикация (нагрев в инертной газовой среде до температур порядка 300°C) позволяет не только повысить теплоту сгорания и улучшить гидрофобные свойства твердого биотоплива [13, 14], но и существенно снизить затраты на его размалывание и улучшить фракционный состав по сравнению с исходной биомассой [15, 16]. Приближение указанных характеристик торрефицированной биомассы к характеристикам угля дает возможность сжигать ее в пылеугольных котлах без их существенной модификации и снижения мощности, одновременно заметно уменьшая количество вредных выбросов.

В работе рассмотрены характеристики торрефицированного смесового топлива, состоящего

из биомассы и высокозольных углеродсодержащих отходов, и предложен критерий для выбора режимов торрефикации, которые целесообразно применять при термической обработке смесовых топлив различного состава.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ СЫРЬЯ

Как и в работе [5], исходными сырьевыми материалами для приготовления бинарных смесовых топлив являлись древесные опилки (ДО), лузга подсолнечника (ЛП), золошлаковые отходы (ЗШО) Дзержинской ТЭЦ-22 (Московская область), представлявшие собой твердые отходы от сжигания угля, удаленные в золоотвал мокрым способом, и углеродный концентрат (УК), полученный путем обогащения золошлаковых отходов Каширской ГРЭС методом реагентной флотации [4]. Характерный размер частиц биомассы не превышал 500 мкм. В составе ЗШО содержалось менее 0.6% частиц с характерным размером более 500 мкм, 9.5% частиц с размером в интервале от 300 до 500 мкм, остальные частицы имели размер менее 300 мкм. Аналогичные показатели для УК – 0.3 и 1% соответственно. Перед проведением исследований все сырьевые материалы высушивались при температуре 105°C. В результате влажность, измеренная с помощью анализатора влажности *Ohaus-MB45*, составляла менее 3.5% для ДО и 2% для ЛП. Влажность обоих видов углеродсодержащих отходов не превышала 1%. Из указанных сырьевых материалов были приготовлены четыре вида гранулированного смесового топлива (УШО-ДО, УШО-ЛП, ЗШО-ДО, ЗШО-ЛП) с различным соотноше-

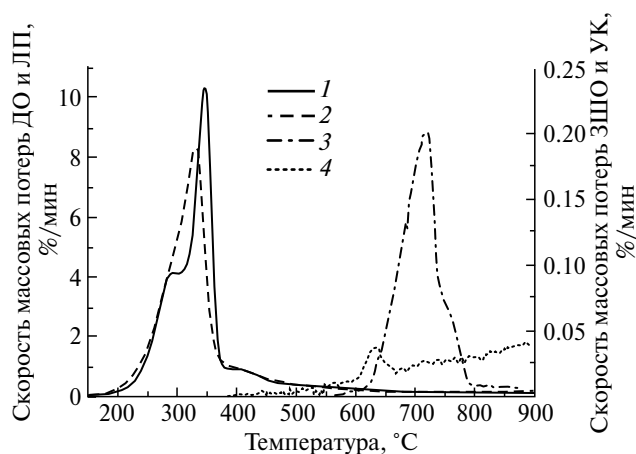


Рис. 1. ДТГ зависимости для исходных сырьевых материалов в потоке азота: ДО – 1, ЛП – 2, ЗШО – 3, УК – 4.

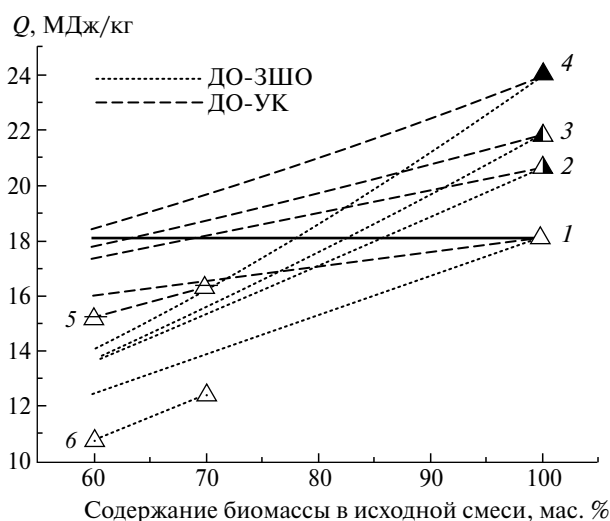


Рис. 2. Зависимость теплоты сгорания исходных (1, 5, 6) и торрефицированных при различных температурах (240°C – 2, 270°C – 3, 300°C – 4) пеллет из смесей ДО-ЗШО и ДО-УК от их состава перед торрефикацией: 1–4 – расчет по формуле Менделеева на основе результатов элементного анализа; 5, 6 – результаты calorиметрических измерений.

нием составляющих его компонентов. Высокое значение зольности углеродсодержащих отходов послужило ограничением на максимальное значение их содержания в смесевом топливе, которое не превышало 40 мас. %. Для изготовления пеллет использовался пресс с усилием сжатия около 180 МПа.

Добавка высокозольных углеродсодержащих отходов с низкой теплотой сгорания к биомассе приводит к заметному уменьшению теплоты сгорания смесевого топлива. Для компенсации

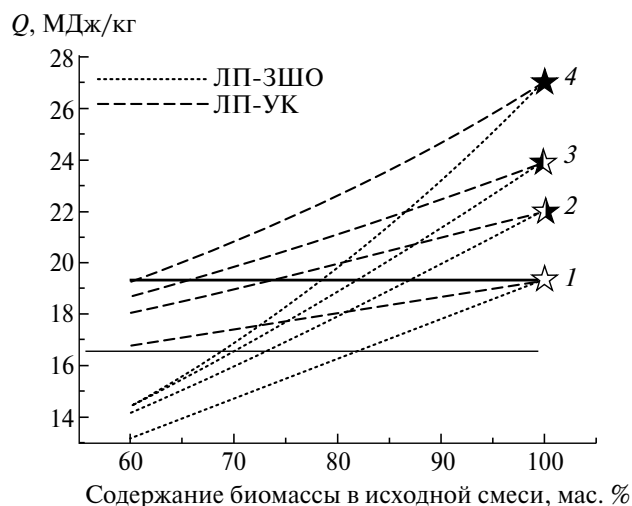


Рис. 3. Зависимость теплоты сгорания исходных (1) и торрефицированных при различных температурах (240°C – 2, 270°C – 3, 300°C – 4) пеллет из смесей ЛП-ЗШО и ЛП-УК от их состава перед торрефикацией.

этого эффекта предлагается использовать торрефикацию. Торрефикация проводилась в инертной газовой среде при трех температурах $T_t = 240, 270$ и 300°C . Время выдержки при температуре T_t составляло 30 мин.

В табл. 1 представлены характеристики исходного сырья и биомассы, торрефицированной при различных температурах. Измерения зольности (A), массовых потерь при торрефикации (δm), массовых долей летучих продуктов (M_{vp}) и фиксированного углерода (C_f) проводились с помощью термоанализатора *SDT Q600*. Элементный состав исходных и торрефицированных пеллет с различным соотношением между биомассой и углеродсодержащими отходами определялся с помощью анализатора элементного состава *Vario MACRO Cube*. Низшая теплота сгорания (Q) рассчитывалась по формуле Менделеева [17] на основе результатов элементного анализа. Для неторрефицированных образцов смесевых топлив ЗШО-ДО и УК-ДО с содержанием биомассы, равным 60 и 70%, с помощью calorиметров *БКС-2Х* и *ИКА С6000* были проведены calorиметрические измерения теплоты сгорания.

Важным параметром, характеризующим свойства твердого топлива, является предел гигроскопичности W , который определяется как равновесная влажность образца, длительное время находившегося в воздухе со 100%-ной влажностью при постоянной температуре. Для опре-

Таблица 2. Минимальное содержание биомассы в смеси перед торрефикацией, удовлетворяющее условию (3)

| Бинарная смесь | Минимальное содержание биомассы в исходной смеси, мас. % | | |
|----------------|--|---------------------------|---------------------------|
| | $T_t = 240^\circ\text{C}$ | $T_t = 270^\circ\text{C}$ | $T_t = 300^\circ\text{C}$ |
| ДО-ЗШО | 85.9 | 82.5 | 78.1 |
| ДО-УК | 69.1 | 63.5 | 56.8 |
| ЛП-ЗШО | 86.8 | 81.9 | 78.3 |
| ЛП-УК | 73.4 | 65.4 | 60.3 |

деления W исследуемые пеллеты помещались в эксикатор, который располагался в термостате с температурой, равной 23°C . В результате периодического взвешивания образцов определялось максимальное значение влажности, которое и принималось за предел гигроскопичности.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 приведены дифференциальные термогравиметрические зависимости, снятые на термоанализаторе *SDT Q600* и характеризующие выход летучих при нагреве рассматриваемых сырьевых материалов в потоке инертного газа. Темп нагрева составлял $10^\circ\text{C}/\text{мин}$. Из представленных зависимостей видно, что при температурах торрефикации ($T_t \leq 300^\circ\text{C}$) термическая деструкция наблюдается только для образцов из ДО и ЛП. Выход летучих продуктов для углеродсодержащих отходов начинается при температурах выше 400°C , а скорость массовых потерь значительно меньше, чем для образцов из биомассы.

Из сказанного следует, что изменение характеристик смесевое топлива в процессе торрефикации обусловлено только изменением характеристик биомассы, входящей в его состав. Дополнительные исследования, проведенные с пеллетизированным смесевым топливом, показали, что в пределах нескольких процентов массовый выход как твердых, так и летучих продуктов торрефикации пропорционален доле биомассы в смеси и практически не зависит от вида углеродсодержащих отходов. На рис. 2 и 3 представлены зависимости теплоты сгорания исходных и торрефицированных при различных температурах смесевых топлив от их состава перед торрефикацией, определенные на основе данных элементного анализа. Для смесей ЗШО-ДО и УК-ДО с содержанием биомассы, равным 60 и 70%, на рис. 2 также приведены результаты калориметрических измерений. Отличие данных калориметрическо-

го анализа от данных, полученных по формуле Менделеева на основе измерений элементного состава, для смеси ЗШО-ДО не превосходит 13%, для смеси УК-ДО – 5% и уменьшается с ростом доли биомассы.

Поскольку в процессе торрефикации отсутствует влияние компонентов смесевых топлив друг на друга, при расчете характеристик торрефицированного смесевое топлива можно использовать принцип аддитивности. В этом случае теплоту сгорания торрефицированного смесевое топлива можно записать в виде:

$$Q_{bl}^t = Q_b^t \alpha_b^t + Q_c^0 \alpha_c^t \quad (\text{МДж/кг}), \quad (1)$$

где Q_b^t – теплота сгорания торрефицированной биомассы, Q_c^0 – теплота сгорания углеродсодержащих отходов, α_b^t и α_c^t – доля биомассы и углеродсодержащих отходов в смесевом топливе после торрефикации. Два последних показателя определяются величиной массовых потерь за счет термической деструкции биомассы в процессе торрефикации и могут быть записаны в виде:

$$\alpha_b^t = \frac{(1 - \delta m) \alpha_b^0}{1 - \delta m \alpha_b^0}, \quad \alpha_c^t = 1 - \alpha_b^t = \frac{1 - \alpha_b^0}{1 - \delta m \alpha_b^0}, \quad (2)$$

где α_b^0 – доля биомассы в смесевом топливе до торрефикации; δm – величина относительных массовых потерь в расчете на сухое состояние, выраженная в массовых долях. Как следует из уравнений (1)–(2), рост удельной теплоты сгорания биомассы Q_b^t в результате торрефикации приводит к росту теплоты сгорания смесевое топлива, в то время как падение ее массовой доли α_b^t уменьшает значение Q_{bl}^t . Увеличение наклона зависимости Q_{bl}^t от содержания биомассы в смеси с увеличением температуры торрефикации (см. рис. 2 и 3) обусловлено увеличением массовых потерь в результате термической деструкции биомассы при переходе к более высоким значениям T_t .

В качестве критерия для выбора режима термической обработки, который целесообразно применять при торрефикации смесевых топлив различного состава, можно использовать условие, согласно которому теплота сгорания торрефицированного смесевое топлива должна быть не меньше, чем теплота сгорания исходной биомассы Q_b^0 , входящей в его состав:

$$Q_{bl}^t = Q_b^0. \quad (3)$$

Как следует из данных рис. 2 и 3, требование соблюдения условия (3) накладывает существенные ограничения на максимальное содержание углеродсодержащих отходов или минимальное содержание биомассы в бинарных топливных смесях (сплошная линия на рис. 2 и 3). Значения минимального содержания биомассы в рассмотренных смесях при различных температурах торрефикации, соответствующие выполнению условия (3), приведены в табл. 2. Следует отметить, что использование данных по теплоте сгорания, полученных калориметрическим способом, вместо аналогичных данных, основанных на результатах элементного анализа, приведет к увеличению минимального предпочтительного содержания биомассы в рассмотренных смесях.

Как видно из табл. 2, ужесточение режимов торрефикации, выражающееся в увеличении температуры от 240°C до 300°C и приводящее к увеличению удельной теплоты сгорания торрефицированной биомассы, позволяет увеличить содержание ЗШО в смесях с ДО и ЛП на 7.8 и 8.5% соответственно, а содержание УК – на 12.3 и 13.1%.

Учитывая уравнения (1), (2), минимальную долю биомассы в исходной смеси, удовлетворяющую предложенному критерию (3), можно представить в виде функции от величин массовых потерь и теплот сгорания углеродсодержащих отходов, исходной и торрефицированной биомассы:

$$\alpha_b^0 = \frac{1 - \frac{Q_c^0}{Q_b^0}}{\frac{Q_b^t}{Q_b^0}(1 - \delta m) + \delta m - \frac{Q_c^0}{Q_b^0}}. \quad (4)$$

Теплота сгорания торрефицированной биомассы зависит от режимных параметров процесса термической обработки, а именно от температуры торрефикации и времени выдержки. В [18, 19] при описании массового выхода и характеристик продуктов торрефикации различных видов биомассы в качестве определяющего параметра использована величина массовых потерь, выраженная в относительных единицах. Возможность использования универсальной однопараметрической зависимости для описания изменения от-

носительной теплоты сгорания $\frac{Q_b^t}{Q_b^0}$ различных видов растительной биомассы в процессе торрефикации иллюстрируется данными, представ-

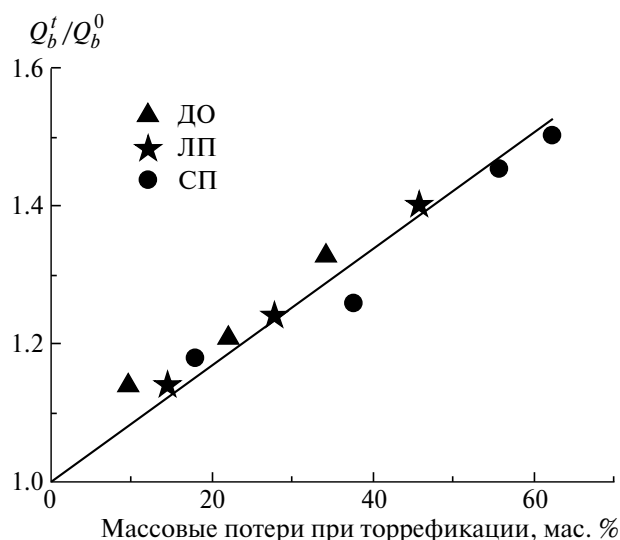


Рис. 4. Зависимость относительной теплоты сгорания торрефицированной биомассы от величины массовых потерь при торрефикации в расчете на сухое состояние: ДО – древесные опилки, ЛП – лузга подсолнечника, СП – соломенные pellets.

ленными на рис. 4. Данные по теплоте сгорания торрефицированных pellets из соломы (СП) взяты из работы [20]. Из рис. 4 видно, что рассматриваемая зависимость с хорошей степенью точности (коэффициент детерминации $R^2 = 0.999$) описывается линейной функцией:

$$\frac{Q_b^t}{Q_b^0} = 1 + b\delta m = 1 + 0.84\delta m, \quad (5)$$

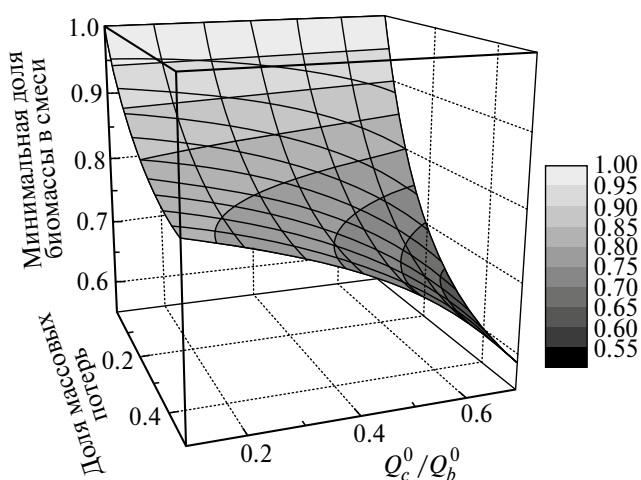


Рис. 5. Минимальная доля биомассы в исходной смеси, удовлетворяющая критерию (3), в зависимости от доли массовых потерь при торрефикации и величины отношения теплоты сгорания углеродсодержащих отходов к теплоте сгорания биомассы.

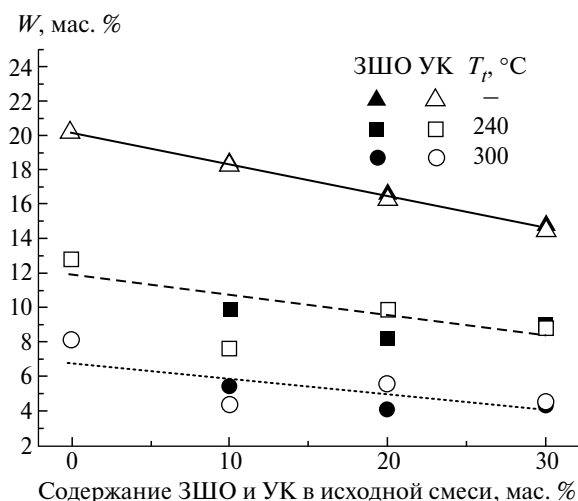


Рис. 6. Предел гигроскопичности исходных и торрефицированных при различных температурах пеллет из смесей ДО-ЗШО и ДО-УК в зависимости от содержания углеродсодержащих отходов в исходной смеси.

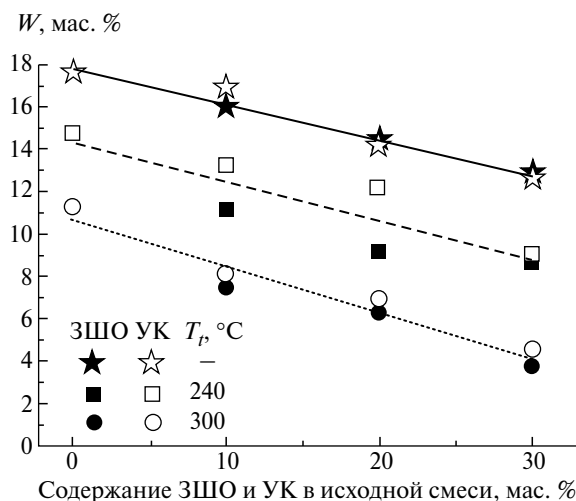


Рис. 7. Предел гигроскопичности исходных и торрефицированных при различных температурах пеллет из смесей ЛП-ЗШО и ЛП-УК в зависимости от содержания углеродсодержащих отходов в исходной смеси.

где δm выражена в массовых долях. Учитывая формулу (5), формулу (4) можно переписать в виде:

$$\alpha_b^0 = \frac{1 - \frac{Q_c^0}{Q_b^0}}{1 + b\delta m(1 - \delta m) - \frac{Q_c^0}{Q_b^0}}. \quad (6)$$

Таким образом, минимальная доля биомассы в исходной смеси, удовлетворяющая предложенному выше критерию, определяется отношением теплот сгорания углеродсодержащих отходов и биомассы, входящих в состав смесевое топлива, а также величиной массовых потерь биомассы при торрефикации.

Зависимость $\alpha_b^0 = f\left(\delta m, \frac{Q_c^0}{Q_b^0}\right)$, представлен-

ная на рис. 5 в графическом виде, может быть использована для бинарных смесей, состоящих из различных видов высокозольных углеродсодержащих отходов и растительной биомассы. Условие применимости формулы (6) состоит в том, что температура термической обработки смесевое топлива должна быть меньше температуры, при которой начинается термическая деструкция углеродсодержащих отходов.

Данные по влиянию температуры торрефикации на предел гигроскопичности пеллети-

зированных смесевых топлив с различным соотношением составляющих его компонентов приведены на рис. 6 и 7. Из представленных данных следует, что увеличение содержания углеродсодержащих отходов само по себе приводит к улучшению гидрофобных свойств смесевое топлива, независимо от вида углеродсодержащего компонента. Такое поведение обусловлено меньшей гигроскопичностью ЗШО и УК по сравнению с гигроскопичностью биомассы. В то же время за счет увеличения температуры торрефикации можно добиться кратного уменьшения предела гигроскопичности рассмотренных смесевых топлив. Таким образом, торрефикация пеллетизированного смесевое топлива позволяет придать ему гидрофобные свойства, что существенно облегчает условия его хранения и транспортировки и снижает соответствующие затраты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований показано, что за счет торрефикации можно улучшить теплотехнические свойства бинарных смесевых топлив на основе растительной биомассы (древесные опилки и лузга подсолнечника) и высокозольных углеродсодержащих отходов, в качестве которых использовались золошлаковые отходы угольной ТЭЦ и угольный концентрат, полученный путем их обогащения. В качестве критерия для выбора предпочтительного режима торрефикации предложено условие, согласно

которому удельная теплота сгорания торрефицированного смесового топлива должна быть не меньше удельной теплоты сгорания исходной биомассы, входящей в его состав. На основе этого критерия определена минимальная допустимая доля биомассы (или максимальная допустимая доля углеродсодержащих отходов) в исходной смеси в зависимости от режима торрефикации. Получено аналитическое выражение, связывающее минимальную допустимую долю биомассы с величиной массовых потерь при торрефикации и соотношением между теплотами сгорания компонентов, входящих в состав топливной смеси. Использование величины массовых потерь, обусловленных термической деструкцией биомассы, входящей в состав смесового топлива, в качестве универсальной характеристики режима торрефикации позволяет применять полученное выражение к бинарным топливным смесям, состоящим из различных видов растительной биомассы и широкого круга углеродсодержащих отходов. Показано, что торрефикация приводит к существенному уменьшению гигроскопичности гранулированного смесового топлива на основе биомассы и высокозольных углеродсодержащих отходов, что существенно уменьшает логистические издержки при его использовании в энергетических целях.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность В.А. Лаврену и А.В. Григоренко за проведение калориметрических измерений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Делицын Л.М., Власов А.С. // Теплоэнергетика. 2010. № 4. С. 49. [Thermal Engineering, 2010, vol. 57, no. 4, p. 325. <https://doi.org/10.1134/S0040601510040087>].
2. Золотова И.Ю. // Инновации и инвестиции. 2020. № 7. С. 123.
3. Худякова Л.И., Залуцкий А.В., Палеев П.Л. // XXI век. Техносферная безопасность. 2019. Т. 4. № 3. С. 375. <https://doi.org/10.21285/2500-1582-2019-3-375-391>.
4. Рябов Ю.В., Делицын Л.М., Ежов Н.Н., Сударева С.В. // Теплоэнергетика. 2019. № 3. С. 3. <https://doi.org/10.1134/S0040363619030056> [Thermal Engineering, 2019, vol. 66, no. 3, p. 149. <https://doi.org/10.1134/S0040601519030054>].
5. Ларина О.М., Синельщиков В.А., Сычев Г.А. // ТВТ. 2020. № 5. С. 782. <https://doi.org/10.31857/S0040364420050051> [High Temp. 2020, vol. 58, no. 5, p. 710. <https://doi.org/10.1134/S0018151X20050041>].
6. Pedersen L.S., Nielsen H.P., Kiil S., Hansen L.A., Dam-Johansen K., Kildsig F., Christensen J., Jespersen P. // Fuel. 1996. V. 75. P. 1584.
7. Sahu S.G., Chakraborty N., Sarkar P. // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2014. V. 39. P. 575. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.106>
8. Demirbas A. // Energy Conversion and Management. 2003. V. 44. P. 1465. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(02\)00144-9](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(02)00144-9)
9. Любовь В.К., Ивуть А.Е. // Вестн. Череповецкого гос. ун-та. 2016. № 5. С. 160.
10. Basu P., Butler J., Leon M.A. // Renewable Energy. 2011. V. 36. № 1. P. 282. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.06.039>
11. Varol M., Atimtay A.T., Bay B., Olgun H. // Thermochimica Acta. 2010. V. 510. P. 195. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2010.07.014>
12. Пепедеруй С. // ЛесПромИнформ. 2011. №8(82). С. 172.
13. Bergman P.C.A., Kiel J.H.A. Torrefaction for Biomass Upgrading // Proc. 14th Europ. Biomass Conf. Paris, 2005. P. 206.
14. Kosov V.V., Sinelshchikov V.A., Sytchev G.A., Zaichenko V.M. // High Temp. 2014. V. 6. № 6. P. 907. <https://doi.org/10.1134/S0018151X14060170>
15. Bergman P.C.A., Boersma A.R., Zwart R.W.W., Kiel J.H.A. Torrefaction for biomass co-firing in existing coal-fired power stations "BIOCOAL". ECN Tech. Report ECN-C-05-013, 2005. 71 p.
16. Gil M.V., Garcia R., Pevida C., Rubiera F. // Bioresource Technology. 2015. V. 191. P. 205. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.04.117>
17. Энергетическое топливо СССР (ископаемые угли, горючие сланцы, торф, мазут и горючий газ). Справочник. М.: Энергия, 1979. 128 с.
18. Peng J, Wang J, Bi X.T., Lim C.J., Sokhansanj S., Peng H., Jia D. // Fuel Processing Technology. 2015. V. 129. P. 168.
19. Директор Л.Б., Синельщиков В.А., Сычев Г.А. // ТВТ. 2020. Т. 58. № 1. С. 47. <https://doi.org/10.31857/S0040364420010044> [High Temp. 2020, vol. 58, no.1, p. 50. <https://doi.org/10.1134/S0018151X20010046>].
20. Сычев Г.А. Экспериментальные исследования особенностей процесса торрефикации биомассы растительного происхождения: Автореф. дисс. канд. техн. наук. М.: ОИВТ РАН, 2020. 20 с.

Influence of Torrefaction on the Characteristics of Fuel Blends of Biomass and High-Ash Carbon-Containing Waste

Ya. D. Pudova*, V. A. Sinelshchikov, G. A. Sytchev*****

Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 125412 Russia

**e-mail: pudova.y.d@mail.ru*

***e-mail: sinelshchikov@mail.ru*

****e-mail: george.sytchev@yandex.ru*

The influence of torrefaction on the characteristics of binary fuel blends consisting of plant biomass and high-ash carbon-containing technogenic waste is considered. It has been shown that through torrefaction it is possible to compensate for the decrease in the heating value of fuel blends associated with the addition of a high-ash component. A criterion for choosing a torrefaction mode is proposed and the corresponding analytical expression is obtained that allows one to calculate the minimum permissible biomass content in the fuel blend. This expression can be used in relation to fuel blends of various types of plant biomass and high-ash carbon-containing waste. There are presented quantitative data demonstrating the improvement of the hydrophobic properties of fuel blends as a result of torrefaction.

Keywords: biomass, carbon-containing waste, torrefaction, fuel blends