

УДК 662.739

## ТЕРМОГРАВИМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ТОПЛИВНЫХ СМЕСЕЙ ИЗ БИОМАССЫ И ВЫСОКОЗОЛЬНЫХ УГЛЕСОДЕРЖАЩИХ ОТХОДОВ

© 2020 г. О. М. Ларина<sup>1</sup>, В. А. Синельщиков<sup>1</sup>, \*, Г. А. Сычев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

\*E-mail: sinelshchikov@mail.ru

Поступила в редакцию 19.04.2020 г.

После доработки 20.05.2020 г.

Принята к публикации 18.06.2020 г.

С использованием методов термогравиметрического анализа исследованы характеристики двухкомпонентного смесового топлива. В качестве исходного сырья использовались два вида биомассы и высокозольные углесодержащие отходы, представляющие собой золошлаковые отходы угольной ТЭЦ и угольный концентрат, полученный путем обогащения отходов. Эксперименты проводились в инертной (азот) и окислительной (воздух) средах. Показано, что в области температур, характерных для горения биомассы, для оценки характеристик горения смесей нельзя использовать принцип аддитивности. Наличие углесодержащей компоненты в смеси приводит к непропорциональному снижению скорости массовых потерь как в интервале температур, характерных для выхода и окисления летучих продуктов биомассы, так и в области температур, при которых происходит окисление ее твердого остатка. Влияния биомассы на скорость окисления углесодержащей компоненты не наблюдалось.

DOI: 10.31857/S0040364420050051

### ВВЕДЕНИЕ

В последнее время большое внимание уделяется исследованию возможностей совместного сжигания ископаемых углей с различными видами биомассы. Интерес к этому вопросу обусловлен рядом факторов, важнейшим из которых является стремление уменьшить негативное влияние топливно-энергетического сектора экономики на окружающую среду. Биомасса является возобновляемым углеводородным ресурсом, сжигание которого считается нейтральным с точки зрения выбросов двуокиси углерода, поэтому даже частичная замена ископаемого топлива на любой вид биотоплива снижает вредное воздействие на природу. Добавки определенных видов биомассы к углю позволяют снизить выбросы и других парниковых газов. Авторы ряда работ [1, 2] считают, что совместное сжигание ископаемых углей и биомассы является самым низкочастотным способом сокращения выбросов твердых частиц и парниковых газов на угольных электростанциях. Предварительная термическая обработка биомассы (торрефикация) приближает ее характеристики к характеристикам угля, что дает возможность сжигать торрефицированное биотопливо в пылеугольных котлах без их существенной модификации и снижения мощности [3]. Увеличение доли биомассы в составе смесового топлива, в свою очередь, ведет к уменьшению количества

вредных выбросов на единицу выработанной мощности.

Привлекательность совместного сжигания угля и твердого биотоплива подтверждается и экономическими оценками, согласно которым инвестиционные затраты в расчете на кВт установленной мощности на строительство ТЭЦ, использующих в качестве топлива только биомассу, на порядок превышают инвестиционные затраты в расчете на кВт выработанной мощности, необходимые для перевода действующих угольных электростанций на совместное сжигание угля и биомассы [4].

Совместное сжигание биомассы и угля может рассматриваться и с точки зрения эффективной утилизации относительно дешевого, но некачественного и неподготовленного биосырья с низкой теплотой сгорания и высокой влажностью [5], или высоким содержанием компонентов, образующих при сжигании токсичные выбросы, в частности полициклические ароматические углеводороды [6].

При поиске путей энергетической утилизации высокозольных углесодержащих отходов весьма перспективным представляется направление, связанное с производством гранулированного смесового топлива из биомассы и углесодержащих отходов [7]. С одной стороны, добавка биомассы, которая характеризуется низким содержанием золы, приведет к снижению общей зольности

смесевое топливо. С другой стороны, наличие лигнина, входящего в состав биомассы и обладающего связующими свойствами, облегчит процесс пеллетизации.

Исследования, посвященные совместному сжиганию различных видов биомассы и углеродсодержащего сырья, можно разделить на две группы. К первой относятся исследования, проводимые на реальных котлах [8, 9] или лабораторных установках, моделирующих их работу [5, 10, 11]. Целью таких исследований является определение влияния состава смесевое топлива на эффективность работы котла и объем вредных выбросов, выбор оптимального состава смесевое топлива и режимных параметров работы котла.

Вторая группа включает работы, проводимые на аналитическом оборудовании с целью изучения характеристик горения (характерные температуры, реакционная способность, кинетические параметры) смесевых топлив и выяснения влияния состава смесевое топлива на перечисленные характеристики.

Основным методом исследования характеристик горения твердых топлив и их смесей в лабораторных условиях является термогравиметрический (ТГ) и дифференциальный термогравиметрический (ДТГ) анализы, проводимые в нейтральной и окислительной газовых средах. По ТГ- и ДТГ-зависимостям определяются характерные температуры [12], к которым относятся температура воспламенения, пиковая температура, соответствующая максимальному значению скорости потери массы, и температура выгорания. Реакционная способность топлива характеризуется величиной максимальной скорости массовых потерь. В ряде работ для количественной характеристики реакционной способности твердых топлив используется отношение максимальной скорости массовых потерь к пиковой температуре [13] и так называемые индексы воспламенения, выгорания и горючести, представляющие собой более сложные комбинации из перечисленных выше параметров, включая характерные времена, также определяемые по ТГ- и ДТГ-зависимостям [14, 15].

При исследовании смесевых топлив большое внимание уделяется вопросу о взаимном влиянии компонентов топлива друг на друга. В некоторых работах отмечается отсутствие такого влияния [16] и, как следствие, выполнение принципа аддитивности и возможность расчета характеристик смесевое топлива на основе соответствующих характеристик составляющих его компонентов. В других работах обнаружено влияние одной из компонент на другую, проявлявшееся в улучшении [17, 18] или ухудшении [12] характеристик ее горения. В [19] отмечается, что выполнение принципа аддитивности может зависеть от мас-

сового соотношения между компонентами смесевое топлива.

В [20] исследованы смеси из четырех видов биомассы и трех видов углей с сильно отличающейся зольностью. Использование в экспериментах углей с различной зольностью позволило авторам изучить не только влияние доли биомассы в смеси на характеристики горения смесевое топлива, но и выявить особенности поведения смесей в зависимости от качества угля, входящего в их состав. Из результатов экспериментов следует, что наибольшее взаимное влияние компонентов смеси друг на друга, проявляющееся в различии экспериментальных и рассчитанных в предположении аддитивности ДТГ-зависимостей, наблюдалось при совместном сжигании высокозольной биомассы и угля с низкой зольностью и относительно высоким содержанием летучих продуктов. Наиболее ярко это различие проявлялось в зоне выгорания твердого остатка для смесей с небольшим содержанием биомассы и нивелировалось с ростом доли биомассы в смеси.

Из вышесказанного следует, что при рассмотрении возможности использования смесевых топлив желательно иметь данные не только по характеристикам входящих в его состав конкретных видов биомассы и угля, но и по характеристикам смесей на их основе. Данная работа посвящена исследованию смесей, в состав которых входят углеродсодержащие отходы техногенного происхождения, а именно, золошлаковые отходы угольных ТЭЦ или угольный концентрат, полученный путем их обогащения. Отличительной особенностью указанных углеродсодержащих отходов является их предельно высокая зольность и низкое содержание летучих продуктов. Золошлаковые отходы, производимые десятками миллионов тонн в год, представляют собой существенную угрозу окружающей среде хотя бы тем, что занимают большие площади, размер которых в РФ ежегодно увеличивается в среднем на 4% [21]. Одновременно указанный вид отходов содержит от 5 до 25% несгоревшего углерода, который в принципе может быть использован в энергетических целях. Совместное сжигание перечисленных видов углеродсодержащих отходов с биомассой позволит, с одной стороны, уменьшить негативный эффект от сжигания столь низкокалорийного сырья, а с другой стороны, использовать оставшуюся золу при условии достаточно полного выгорания углерода в строительной индустрии.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ИСХОДНОГО СЫРЬЯ

В качестве исходного биосырья для приготовления смесевых топлив использовались два вида биомассы, относящиеся к отходам деревообрабатывающей промышленности и сельского хозяй-

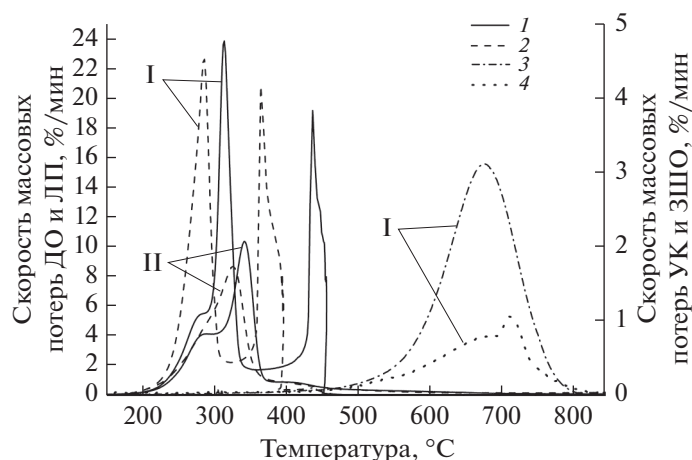


Рис. 1. ДТГ-зависимости для исходных сырьевых материалов в потоке воздуха (I) и азота (II): 1 – ДО, 2 – ЛП, 3 – УК, 4 – ЗШО.

ства: древесные опилки (ДО) и лузга подсолнечника (ЛП). Характерный размер частиц биомассы не превышал 500 мкм, а влажность составляла менее 3.5% для ДО и 2% для ЛП.

В качестве низкосортного углесодержащего сырья использовались золошлаковые отходы (ЗШО), взятые из отвалов Дзержинской ТЭЦ-22 (Московская область), и углеродный концентрат (УК), полученный обогащением методом реагентной флотации [21] золошлаковых отходов Каширской ГРЭС. Влажность обоих видов углеродсодержащих отходов не превышала 1%.

В экспериментах использовались четыре вида смесей с различным весовым соотношением биомасса/углесодержащее сырье: 90/10, 80/20, 70/30 и 60/40%. Термогравиметрический и дифференциальный термогравиметрический анализы проводились в потоке азота и воздуха. Темп нагрева составлял 10°C/мин, максимальная температура нагрева – 950°C.

Основные характеристики исходных сырьевых материалов, измеренные с помощью термоанализатора SDT Q600 и анализатора элементного состава Vario MACRO Cube, приведены в таблице. Низшая теплота сгорания рассчитывалась по формуле Менделеева [22] на основе данных по элементному составу.

Из представленных данных следует, что оба вида углесодержащих отходов характеризуются очень низким по сравнению с образцами из биомассы содержанием летучих продуктов и чрезвычайно высокой зольностью. Содержание связанного углерода в ЗШО существенно меньше, чем в образцах из биомассы. Содержание связанного углерода в УК заметно превышает аналогичный показатель для рассмотренных видов биомассы. Тем не менее по общему содержанию углерода оба вида углесодержащих материалов уступают

образцам из биомассы. Отметим, что высокое значение зольности углесодержащих отходов послужило ограничением на рассмотренный в работе диапазон соотношений биомасса/углесодержащие отходы. Увеличение доли ЗШО приведет к тому, что зольность смесового топлива превысит 40%, а теплота сгорания станет меньше 12 МДж/кг.

На рис. 1 приведены ДТГ-зависимости, измеренные для исследуемых сырьевых материалов в потоке азота и воздуха. Все приведенные здесь и далее ДТГ-зависимости пересчитаны на сухое состояние исследуемых образцов.

Термический распад обоих видов биомассы в инертной среде, сопровождающийся выделением летучих продуктов пиролиза, происходит в интервале температур 200–500°C и характеризуется одним максимумом на ДТГ-зависимости при 346°C для ДО и 330°C для ЛП (рис. 1). Максимальные значения скорости термической деструкции для ДО и ЛП различаются менее чем на 20%. В воздушной среде скорость массовых потерь при нагреве существенно возрастает, и на ДТГ-зависимостях появляются два максимума. Первый связан с выделением и окислением летучих продуктов и сдвинут в область более низких температур по сравнению с максимумом, наблюдаемым для того же вида биомассы в потоке азота. Второй максимум связан с окислением угольного остатка и наблюдается при температуре, превышающей температуру, при которой скорость массовых потерь в инертной среде падает до 1%/мин.

Из-за низкого содержания летучих максимальные значения скорости массовых потерь для углесодержащего сырья в инертной среде почти на два порядка меньше, чем для биомассы (на рис. 1 соответствующие ДТГ-зависимости не нанесены), и сдвинуты в высокотемпературную

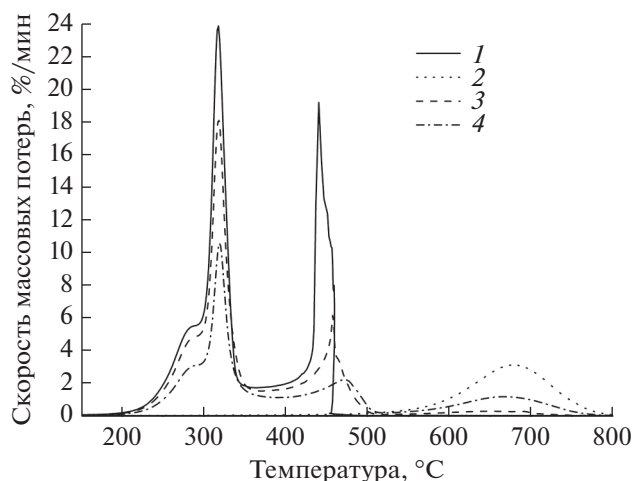


Рис. 2. ДТГ-зависимости в потоке воздуха для ДО (1) и УК (2), а также их смесей при массовом соотношении ДО/УК, равном 90/10 (3) и 60/40 (4).

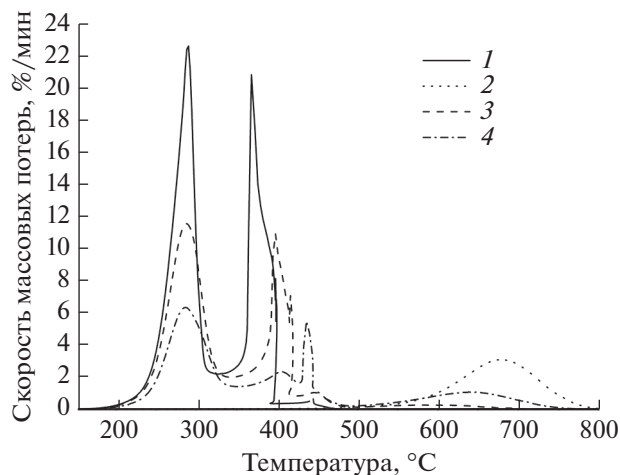


Рис. 3. ДТГ-зависимости в потоке воздуха для ЛП (1) и УК (2), а также их смесей при массовом соотношении ЛП/УК, равном 90/10 (3) и 60/40 (4).

область. В воздухе массовые потери за счет окисления для УК и ЗШО наблюдаются в интервале температур 500–800 °С. Максимальные значения на ДТГ-зависимостях (рис. 1) для углесодержащего сырья существенно меньше, чем для биомассы, что обусловлено как различием в структуре угольного остатка от пиролиза биомассы и углеродной составляющей УК и ЗШО, так и высокой зольностью последних.

Из сопоставления ДТГ-зависимостей, измеренных в инертной и окислительной средах, следует, что температурные области, соответствующие как пиролизу, так и горению биомассы, практически не перекрываются с аналогичными областями, характерными для углесодержащих отходов. Поэтому можно предположить, что компоненты рассматриваемых смесевых топлив не должны влиять друг на друга.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Рассмотрим особенности изменения ДТГ-зависимостей исследованных смесевых топлив при изменении соотношения между массовыми долями входящих в него компонентов. В случае отсутствия влияния компонентов смесевых топлив друг на друга должен выполняться принцип аддитивности, тогда дифференциальную термогравиметрическую зависимость для смеси  $ДТГ_{bl}$  можно представить в виде

$$ДТГ_{bl} = \alpha_b ДТГ_b + \alpha_c ДТГ_c, \quad (1)$$

где  $ДТГ_b$  и  $ДТГ_c$  – дифференциальные термогравиметрические зависимости для биомассы и углесодержащих отходов;  $\alpha_b$  и  $\alpha_c$  – массовые доли биомассы и углесодержащих отходов в смеси ( $\alpha_b + \alpha_c = 1$ ).

Из анализа ДТГ-зависимостей, измеренных в азоте для всех рассмотренных в данной работе смесей, следует, что максимальная скорость термической деструкции обоих видов биомассы уменьшается пропорционально уменьшению массовой доли биомассы в смеси, что свидетельствует о выполнении принципа аддитивности при пиролизе.

На рис. 2, 3 представлены ДТГ-зависимости, измеренные в воздухе для смесей ДО и ЛП с УК. Аналогичные зависимости для тех же видов биомассы с ЗШО носят качественно схожий характер.

Из сказанного в предыдущем разделе, а также из рис. 2 и 3 следует, что при анализе ДТГ-характеристик смесевых топлив, измеренных в окислительной среде, можно выделить три температурных интервала: интервал 200–350 °С, в котором происходит интенсивное выделение и окисление летучих продуктов термической деструкции биомассы; интервал 350–500 °С, соответствующий горению угольного остатка от биомассы; интервал 500–800 °С, в котором происходит горение углесодержащих отходов.

В интервале температур 200–350 °С изменение доли углесодержащих отходов в смеси не сказывается на положении первого пика  $ДТГ_{max}^1$  на ДТГ-зависимостях для всех рассмотренных видов смесевых топлив. Увеличение доли углесодержащих отходов приводит лишь к уменьшению величины  $ДТГ_{max}^1$  (рис. 2, 3). На рис. 4 приведены экспериментальные данные, характеризующие изменение максимальной скорости массовых потерь  $ДТГ_{max}^1$  в зависимости от доли биомассы в смеси. На рис. 4 также нанесен доверительный интервал значений  $ДТГ_{max}^1$  для обоих видов био-

массы как в инертной, так и в окислительной средах, рассчитанный по формуле (1) в предположении выполнения принципа аддитивности.

Из представленных данных видно, что для смесей с ДО экспериментальные значения максимальной скорости массовых потерь находятся на границе доверительного интервала, соответствующего принципу аддитивности. Для смесей с ЛП отклонение от принципа аддитивности носит ярко выраженный характер. С увеличением доли углесодержащих отходов максимальная скорость массовых потерь уменьшается быстрее, чем падает массовая доля ЛП в смеси, и при  $\alpha_b \leq 0.7$  приближается к значениям, измеренным в инертной среде (рис. 4). Таким образом, добавка углесодержащих отходов приводит к непропорционально большому уменьшению реакционной способности ЛП в температурном интервале 200–350°C.

Присутствие кислорода в газовой среде увеличивает скорость термической деструкции биомассы в области интенсивного выхода летучих (см. рис. 1). Наличие углесодержащих отходов препятствует диффузии кислорода к поверхности частиц биомассы и тем самым снижает эффект от его присутствия, приводя к отклонению от принципа аддитивности. В большей степени это отклонение проявляется для смесей с ЛП.

В интервале температур 350–500°C увеличение доли углесодержащих отходов в смеси приводит не только к уменьшению максимальной скорости массовых потерь  $DTG_{\max}^2$ , но и к заметному сдвигу этого максимума в область более высоких температур. Для смесей с ДО указанный сдвиг составляет порядка 40°C, для смесей с ЛП около 60°C. Из данных, представленных на рис. 5, видно, что в результате добавки углесодержащих отходов происходит существенное замедление процесса окисления угольного остатка от биомассы и, соответственно, увеличение времени его выгорания. В этой области температур отклонение от аддитивности в большей степени проявляется для смесей, в состав которых входят ДО. Исходя из схожести характеристик ДО и ЛП, представленных в таблице и на рис. 1, заметное количественное различие в степени влияния углесодержащей компоненты на реакционную способность двух

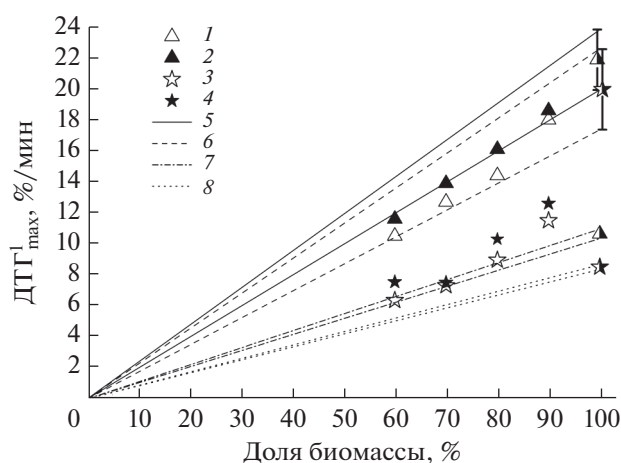


Рис. 4. Влияние углесодержащей компоненты на реакционную способность биомассы в области температур 200–350°C для различных смесей: 1 – УК–ДО, 2 – ЗШО–ДО, 3 – УК–ЛП, 4 – ЗШО–ЛП; доверительный интервал изменения  $DTG_{\max}^1$  в воздухе (5, 6) и азоте (7, 8) при выполнении принципа аддитивности для смесей с ДО (5, 7) и ЛП (6, 8).

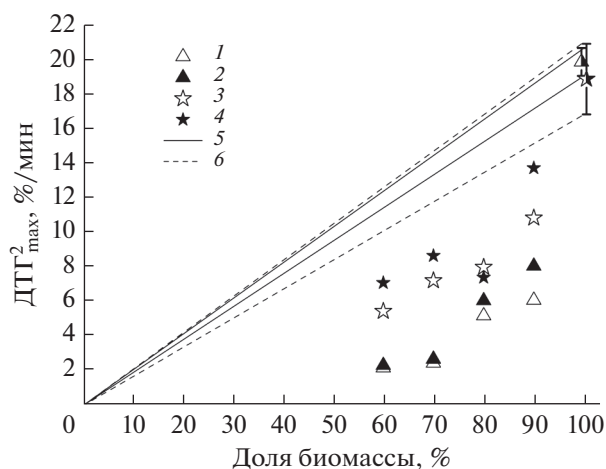
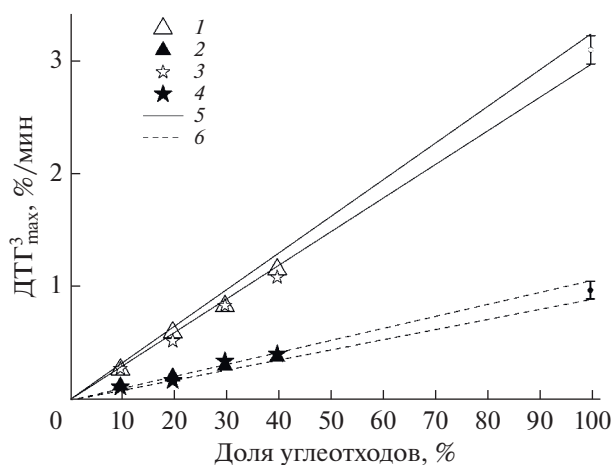


Рис. 5. Влияние углесодержащей компоненты на реакционную способность биомассы в области температур 350–500°C для различных смесей: 1–4 – см. рис. 4; доверительный интервал изменения  $DTG_{\max}^2$  в воздухе при выполнении принципа аддитивности для смесей с ДО (5) и ЛП (6).

#### Характеристики исходного сырья в расчете на сухое состояние

	Зольность, %	Элементный состав, мас. %					Низшая теплота сгорания, МДж/кг	Содержание летучих, %	Связанный углерод, %
		С	Н	N	S	О			
ДО	1.56	48.84	6.17	0.06	0.12	43.25	18.22	79.52	18.92
ЛП	2.26	49.96	6.54	0.56	0.17	40.51	19.29	77.24	20.50
ЗШО	85.2	12.62	0.05	0.16	0.20	1.77	4.16	5.82	8.98
УК	61.07	38.0	0.08	0.58	0.22	0.05	12.99	2.40	36.53





**Рис. 6.** Влияние биомассы на реакционную способность углеродсодержащей компоненты для различных смесей: 1–4 – см. рис. 4; доверительный интервал изменения  $ДТГ_{\max}^3$  в воздухе при выполнении принципа аддитивности для смесей с УК (5) и ЗШО (6).

рассмотренных видов биомассы может быть обусловлено различием в гранулометрическом составе и структуре поверхности частиц из ДО и ЛП.

При сопоставлении влияния двух видов углеродсодержащих отходов на характеристики горения биомассы можно сказать, что УК и ЗШО в целом проявляют себя как нейтральные компоненты. Их влияние сводится к влиянию на скорость диффузии кислорода к поверхности частиц биомассы, а различие в величинах  $ДТГ_{\max}^i$  ( $i = 1, 2$ ) для смесей УК и ЗШО с одним и тем же видом биомассы практически находится в пределах экспериментальной погрешности.

Исходя из характеристик высокзолных углеродсодержащих отходов, входящих в состав рассматриваемых смесевых топлив, вряд ли можно ожидать сколько-нибудь заметного влияния на них добавок биомассы. Во-первых, при  $500^\circ\text{C}$ , когда угольный остаток от обоих видов биомассы практически выгорел, скорость окисления углеродсодержащих отходов составляет всего  $0.15\%/мин$  для УК и  $0.12\%/мин$  для ЗШО. Максимальная скорость массовых потерь для УК достигается при  $674^\circ\text{C}$ , для ЗШО – при  $706^\circ\text{C}$ . Во-вторых, поскольку зольность ДО и ЛП мала по сравнению с зольностью УК и ЗШО, минеральная составляющая, оставшаяся после выгорания биомассы, не может оказывать сколько-нибудь заметного негативного влияния, связанного с затруднением диффузии кислорода. Позитивное влияние биомассы на характеристики горения углеродсодержащих отходов может проявляться в том случае, если минеральная составляющая биомассы обладает каталитическими свойствами. Такого рода

эффект наблюдался в [9, 23], когда в состав смесевое топлива наряду с угольной компонентой входила солома. В [9] добавка соломы приводила к уменьшению выбросов  $\text{SO}_2$ . В [23] зольный остаток от соломы повышал реакционную способность высокзолных углеродсодержащих отходов.

На рис. 6 приведены данные по зависимости максимальной скорости горения углеродсодержащих отходов  $ДТГ_{\max}^3$  от их массовой доли в смесевом топливе.

Из представленных данных следует, что для всех рассмотренных видов смесевых топлив можно считать, что с учетом экспериментальной погрешности  $ДТГ_{\max}^3$  изменяется пропорционально массовой доле углеродсодержащих отходов в смеси, т.е. в соответствии с принципом аддитивности. Таким образом, в интервале температур  $500\text{--}800^\circ\text{C}$  компоненты рассмотренных смесевых топлив не оказывают влияния друг на друга, а зола ДО и ЛП не проявляет каталитических свойств.

Отметим, что во всех экспериментах происходило полное выгорание углерода, входящего в состав смесевое топлива. Об этом свидетельствует линейная зависимость экспериментальных значений величины зольного остатка, измеренных в ходе термогравиметрических исследований, от доли биомассы в смеси.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью методов термогравиметрического анализа выполнено исследование влияния компонентов смесевое топлива, состоящего из биомассы и высокзолного углеродсодержащего сырья, на скорость его термической деструкции при нагреве в инертной и окислительной газовых средах. Показано, что при нагреве в инертной газовой среде скорость термической деструкции смесей подчиняется аддитивному принципу, что свидетельствует об отсутствии взаимного влияния компонентов смеси друг на друга. При нагреве в воздухе добавка углеродсодержащего сырья приводит к тому, что скорость термической деструкции биомассы падает быстрее, чем доля биомассы в смеси. Этот эффект наблюдается как в области температур, соответствующих интенсивному выделению летучих продуктов, так и в области температур, соответствующих окислению угольного остатка от биомассы. Одновременно положение максимума скорости окисления угольного остатка от биомассы сдвигается в область более высоких температур. Температурный сдвиг увеличивается с ростом массовой доли углеродсодержащего сырья в смеси. В результате в области температур, соответствующих горению биомассы, характеристики горения ее смесей с углеродсодержащими отходами нельзя рассчитывать на основе принципа аддитивности. В то же время добавка биомассы не

оказывает влияния на реакционную способность углесодержащего сырья, и при оценке скорости окисления последнего можно использовать принцип аддитивности.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (проект № 05.604.21.0232, идентификатор RFMEFI60419X0232).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Tehapda A.H., Pisupati S.V.* A Review of Thermal Co-conversion of Coal and Biomass Waste // *Energies*. 2014. V. 7. P. 1098.
2. *Любов В.К., Ивуть А.Е.* Совместное сжигание каменного угля с биотопливом // *Вестн. Череповецк. гос. ун-та*. 2016. № 5. С. 160.
3. *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. 71p.
4. *Передерий С.* Краткий обзор европейских ТЭЦ, использующих совместное сжигание топлива // *Лес-ПромИнформ*. 2011. № 8 (82). С. 172.
5. *Akram M., Tan C.K., Garwood D.R., Fisher M., Gent D.R., Kaye W.G.* Co-firing of Pressed Sugar Beet Pulp with Coal in a Laboratory-scale Fluidised Bed Combustor // *Appl. Energy*. 2015. V. 139. P. 1.
6. *Peng N.N., Li Y., Liu Z.G., Liu T.T., Gai C.* Emission, Distribution and Toxicity of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) During Municipal Solid Waste (MSW) and Coal Co-combustion // *Sci. Total Environ*. 2016. V. 565. P. 1201.
7. *Isemin R., Mikhalev A., Klimov D., Grammelis P., Margaritis N., Kourkoumpas D.-S., Zaichenko V.* Torrefaction and Combustion of Pellets Made of a Mixture of Coal Sludge and Straw // *Fuel*. 2017. V. 210. P. 859.
8. *Tillman D.A.* Biomass Cofiring: the Technology, the Experience, the Combustion Consequences // *Biomass & Bioenergy*. 2000. V. 19. P. 365.
9. *Pedersen L.S., Nielsen H.P., Kiil S., Hansemn L.A., Dam-Johansen K., Kildsig F., Christensen J., Jespersen P.* Full-scale Co-firing of Straw and Coal // *Fuel*. 1996. V.75. P. 1584.
10. *Kumar R., Singh R.I.* An Investigation in 20 kW<sub>th</sub> Oxygen-enriched Bubbling Fluidized Bed Combustor Using Coal and Biomass // *Fuel Proc. Technol*. 2016. V. 148. P. 256.
11. *Areprasert C., Scala F., Coppola A., Urciuolo M., Chirone R., Chanyavanich P., Yoshikawa K.* Fluidized Bed Co-combustion of Hydrothermally Treated Paper Sludge with Two Coals of Different Rank // *Fuel Proc. Technol*. 2016. V. 144. P. 230.
12. *Yuzbasi N.S., Selçuk N.* Air and Oxy-fuel Combustion Characteristics of Biomass/Lignite Blends in TGA-FTIR // *Fuel Proc. Technol*. 2011. V. 92. P. 1101.
13. *Park S.W., Jang C.H.* Effects of Pyrolysis Temperature on Changes in Fuel Characteristics of Biomass Char // *Energy*. 2012. V. 39. P. 187.
14. *Чжан Ю.-Ю., Лу Ц.-Ф., Чэн Ф.-Ц., Го Я.-С.* Исследование характеристик и кинетики горения пустой угольной породы // *ФГВ*. 2015. Т. 51. № 6. С. 53.
15. *Han K., Wang Q., Zhao J., Luo K.H., Li H., Chen Y., Lu C.* Combustion Pattern, Characteristics, and Kinetics of Biomass and Chars from Segmented Heating Carbonization // *Asia-Pac. J. Chem. Eng*. 2016. <https://doi.org/10.1002/apj.2016>
16. *Gil M.V., Casal D., Pevida C., Pis J.J., Rubiera F.* Thermal Behaviour and Kinetics of Coal/Biomass Blends During Co-combustion // *Bioresour. Technol*. 2010. V. 101. P. 5601.
17. *Wang Q., Xu H., Liu H., Jia C., Bai J.* Thermogravimetric Analysis of the Combustion Characteristics of Oil Shale Semi-coke/Biomass Blends // *Oil Shale*. 2011. V. 28. № 2. P. 284.
18. *Liu X., Chen M., Yu D.* Oxygen Enriched Co-combustion Characteristics of Herbaceous Biomass and Bituminous Coal // *Thermochim. Acta*. 2013. V. 569. P. 17.
19. *Haykiri-Асма Н., Yaman S.* Effect of Co-combustion on the Burnout of Lignite/Biomass Blends: a Turkish Case Study // *Waste Manag*. 2008. V. 28 (11). P. 2077.
20. *Luo R., Zhou Q.* Combustion Kinetic Behavior of Different Ash Contents Coals Co-firing with Biomass and the Interaction Analysis // *J. Therm. Anal. Calorim*. 2017. V. 128. P. 567.
21. *Рябов Ю.В., Делицын Л.М., Ежова Н.Н., Сударева С.В.* Методы обогащения золошлаковых отходов угольных ТЭЦ и пути их вовлечения в хозяйственный оборот (обзор) // *Теплоэнергетика*. 2019. № 3. С. 3.
22. *Энергетическое топливо СССР (ископаемые угли, горючие сланцы, торф, мазут и горючий газ)*. Спр. М.: Энергия, 1979. 128 с.
23. *Larina O.M., Sinelshchikov V.A., Sytchev G.A.* Investigation of Combustion Characteristics of Mixed Fuel of Biomass and Coal Sludge // *Chem. Eng. Trans*. 2020. V. 80. P. 205.