

УДК 536.7

МНОГОФАКТОРНЫЙ АНАЛИЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УТИЛИЗАЦИИ УГОЛЬНЫХ, НЕФТЯНЫХ И РАСТИТЕЛЬНЫХ ОТХОДОВ В СОСТАВЕ ТОПЛИВНЫХ СМЕСЕЙ

К. Ю. Вершинина, В. В. Дорохов, Д. С. Романов, П. А. Стрижак

Томский политехнический университет, 634050 Томск, vershininaks@tpu.ru

Представлены результаты комплексной оценки характеристик сжигания топлив на основе угольного шлама с добавкой (5 % мас.) отработанного турбинного масла и древесной биомассы с применением метода многофакторного (мультикритериального) анализа. Использовались результаты экспериментальных исследований процессов зажигания и горения топлив, данные о теплотворной способности, зольности, стоимости, составе дымовых газов. Смеси сжигались в виде таблеток, слоя и капель водной суспензии. Отмечено положительное влияние использования добавок на показатели энергетической, экологической и комплексной эффективности сжигания угольного шлама. Группа топлив, сжигаемых в виде таблеток, характеризуется минимальными показателями энергетической, экологической и комплексной эффективности. Наибольший экологический потенциал обнаружен у топлив, сжигаемых в виде капель водных суспензий. Результаты исследования подтверждают перспективы энергетической утилизации широкого спектра отходов угольного, нефтяного и растительного происхождения в составе смесевых топлив.

Ключевые слова: промышленные отходы, сжигание, смесевое топливо, суспензия, выбросы, мультикритериальный анализ эффективности топлива.

DOI 10.15372/FGV20220411

ВВЕДЕНИЕ

Скорость накопления техногенных и коммунальных отходов во многих регионах мира значительно превосходит технологические и экономические возможности их переработки и вторичного использования [1, 2]. Многие отходы обладают высоким энергетическим потенциалом и могут использоваться в качестве топливного ресурса. Основными поставщиками таких компонентов являются отрасли, связанные с добычей и переработкой полезных ископаемых, металлургические и химические предприятия, а также предприятия сельскохозяйственного сектора [1–3]. Результаты исследований последних лет привели к выводу [4–6], что сжигание, пиролиз и газификация могут стать основными способами эффективной утилизации низкосортных компонентов и отходов. Разработка и внедрение технологий сжигания и термохимической конверсии отходов и нетрадиционных топлив тре-

буют рассмотрения большого количества показателей, включающих в себя технологические, экономические и экологические характеристики [7]. Одним из инструментов исследования в этой области являются методы многокритериальной оценки эффективности [8, 9]. Они позволяют выполнять сравнительный анализ нескольких альтернатив (продуктов, проектов) с учетом комплекса критериев, имеющих разные единицы измерения или относящихся к разным оценочным категориям. Например, в исследовании [10] проводился многофакторный анализ использования сжиженного природного газа и попутного нефтяного газа в качестве топлива для морских судов. Для каждого варианта оценивались стоимость и доступность, наличие необходимой инфраструктуры, технологическая безопасность, социальная значимость и воздействие на окружающую среду. По результатам расчетов более предпочтительным оказался сжиженный газ [10]. В [11] оценивалась эффективность композиционных дизельных топлив, компонентами которых являлись дизель, нитрометан и диэтиловый эфир. Учитывались рабочие характеристики двигателя (термический КПД, коэффициент удельного сгорания топлива) и эко-

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение № 075-15-2020-806, договор № 13.1902.21.0014).

© Вершинина К. Ю., Дорохов В. В., Романов Д. С., Стрижак П. А., 2022.

гические показатели горения топлива (задымленность, концентрации CO , NO_x , HC). Все трехкомпонентные смеси показали лучшие результаты по агрегированной эффективности в сравнении с дизельным топливом [11].

В настоящей статье приведены результаты исследования смесевых топлив на основе угольных шламов, нефтяных и древесных отходов. Как показали ранние исследования (например, [12, 13]), термическая утилизация топливных смесей, в отличие от сжигания отдельных компонентов, предоставляет более широкие возможности для стабилизации важных показателей процесса [4, 12] (температуры горения, теплотворной способности и др.) и получения полезных синергетических эффектов (например, существенного снижения выбросов оксидов серы [14]). Смеси, рассматриваемые в настоящем исследовании, как и топлива на основе растительных компонентов, могут сжигаться в виде таблеток или необработанной смеси в котлах с неподвижным или кипящим слоем [14, 15], а также в составе водной суспензии, распыляемой в топочном объеме [16]. Каждый из этих подходов имеет свои преимущества и недостатки. Слоевое сжигание, например, является наиболее доступным и простым методом, подходящим для широкого перечня компонентов [15], но возникают проблемы, связанные с интенсивным шлакованием, низкой скоростью реагирования и неполным сгоранием топлива. Использование топливных таблеток [17, 18] перспективно с точки зрения улучшения эксплуатационных показателей на этапах хранения, транспортировки и подачи топлива в камеру сгорания. Однако при этом сжигание

таблеток из низкосортного сырья часто сопряжено с длительным инициированием горения и высокими топливными потерями. Использование топливных суспензий [19, 20] на основе отходов может быть осложнено низкой температурой горения и длительной задержкой зажигания, но оно перспективно в плане широких возможностей варьирования состава смеси, увеличения полноты выгорания топлива, снижения выбросов оксидов азота и серы [15, 16, 21, 22].

В рамках настоящего исследования экспериментально определены основные характеристики зажигания и горения нескольких составов топливных смесей на основе распространенных промышленных отходов. С помощью методов многокритериальной оценки выполнен сравнительный анализ показателей эффективности топлив, сжигаемых в виде таблеток, капель водной суспензии и неподвижного слоя.

КОМПОНЕНТЫ И ПОДГОТОВКА ТОПЛИВ

Основой для приготовления топливных смесей служил угольный шлам — отходы флотационного обогащения коксующегося угля. В исходном состоянии угольный шлам представляет собой смесь воды, поверхностно-активных веществ, угольных и минеральных частиц размером до 100 мкм. В качестве добавок использовались древесные опилки и отработанное турбинное масло. Свойства применяемых компонентов приведены в табл. 1 и 2. Высшую теплоту сгорания определяли с помощью калориметра ИКА С 2000 в соответствии со стандартом ISO [23, 24]. Количество летучих и

Таблица 1

Свойства твердых компонентов

Материал	Технический анализ				Элементный состав, %				
	W^a , %	A^d , %	V^{daf} , %	Q , МДж/кг	C^{daf}	H^{daf}	N^{daf}	S_t^d	O^{daf}
Угольный шлам	—	24.46	23.08	24.83	87.20	5.09	2.05	1.02	4.46
Опилки сосновые	6.5	1.5	83.64	16.42	52.11	6.58	0.22	Следы	40.70

Таблица 2

Свойства отработанного турбинного масла

Плотность при 20 °С, кг/м ³	Зольность, %	Температура вспышки, °С	Температура зажигания, °С	Теплота сгорания, МДж/кг
868	0.03	175	193	44.99

Таблица 3

Составы топлив

Топливная композиция	Состав	Форма сжигания
1	100 % угольного шлама	Таблетка
2	95 % угольного шлама, 5 % турбинного масла	
3	95 % угольного шлама, 5 % опилок	
4	100 % угольного шлама	Слой
5	95 % угольного шлама, 5 % турбинного масла	
6	95 % угольного шлама, 5 % опилок	
7	50 % угольного шлама, 50 % воды	Суспензия
8	45 % угольного шлама, 5 % турбинного масла, 50 % воды	
9	45 % угольного шлама, 5 % опилок, 50 % воды	

зольность твердых топлив находили по методикам [25, 26]. Элементный состав угольного шлама и опилок определяли на приборе vario MICRO cube Elementar в соответствии с методиками [27], свойства турбинного масла — в соответствии с [24, 28, 29]. Выбор угольного шлама в качестве базового компонента обусловлен его доступностью, большими объемами накопления и приемлемой теплотворной способностью. Опилки и отработанное турбинное масло также требуют утилизации. Их можно использовать в составе смесевых топлив для улучшения характеристик (например, для уменьшения времени задержки зажигания, увеличения теплотворной способности).

Составы исследуемых топлив представлены в табл. 3. Угольный шлам перед использованием просушивался в муфельной печи в течение 2 ч при температуре 105 °С. Опилки измельчались в роторной мельнице (частота оборотов ротора 6 000 ÷ 20 000 об/мин) и просеивались для выделения фракции со средним размером частиц 80 ÷ 100 мкм.

Топлива сжигались в трех формах — в виде таблетки, капель водной суспензии и слоя. Для слоевого сжигания компоненты смешивались механически. Для изготовления цилиндрических топливных таблеток однородная смесь компонентов массой 0,2 г помещалась в пресс-форму и уплотнялась гидравлическим прессом под давлением 5 кПа в течение 30 с. Для приготовления топливных суспензий применялась лабораторная магнитная мешалка AIBOTE ZNCLBS-2500. Если композиция включала в себя масло, то сначала готови-

лась водомасляная эмульсия, а затем добавлялся угольный шлам. Вода и масло смешивались при скорости 2 000 об/мин в течение 10 мин. Жидкости (вода или водомасляная эмульсия) и сухой угольный шлам смешивались в течение 15 ÷ 20 мин со скоростью вращения магнитного ротора 1 500 об/мин.

КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ ТОПЛИВНЫХ СМЕСЕЙ. МЕТОДИКА РАСЧЕТА ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ

Для сравнительного анализа топливных смесей (см. табл. 3) выбраны следующие критерии: стоимость (C); теплотворная способность (Q), зольность (A), температура зажигания (T_{ign}^{min}), время задержки газофазного (τ_{d1}) и гетерогенного (τ_{d2}) зажигания, температура горения (T^{max}), относительный показатель выгорания (\bar{m}_b); концентрация оксидов азота (NO_x) и диоксида серы (SO_2) в дымовых газах.

Теплотворная способность и зольность смесей рассчитывалась на основе свойств и массовых долей компонентов, входящих в топливо (см. табл. 1–3). Стоимость определялась на основе сведений о среднерыночной стоимости компонентов.

Характеристики зажигания и горения топлив определялись в экспериментах. Образцы топлив эквивалентных масс ($\approx 0,2$ г) сжигались в лабораторной трубчатой муфельной печи в стационарных условиях. Температура нагрева составляла 700 ÷ 900 °С. Топливо на держателе подавалось в разогретую муфельную

печь с помощью механизированного устройства. Для таблеток и слоя в качестве держателя использовалась металлическая сетка, для суспензий — пучок из нихромовых проволок, на которых размещались капли топлива. Эксперимент записывался высокоскоростной видеокамерой Phantom Camera Control (частота записи не менее 50 кадр/с при разрешении 800×600 пиксель, минимальная возможная межкадровая задержка 198.4 мкс). Идентификация моментов зажигания и завершения горения выполнялась при анализе видеоизображений. Под временем задержки газофазного зажигания понимался временной интервал от начала теплового воздействия (момент попадания топлива в печь) до момента регистрации световой вспышки в воздушном пространстве вокруг топливного образца. Время от начала теплового воздействия до момента зажигания твердого остатка образца являлось временем задержки гетерогенного зажигания. Экспериментально с помощью термпарных измерений верифицированы границы, соответствующие началу и окончанию реакции горения твердого материала. Эти границы соотнесены с цветовой моделью RGB, применяемой для анализа видеоизображений. Максимальные температуры горения определялись при помощи тепловизора Testo 885-2 (рабочий диапазон (переключаемый) $0 \div 1200$ °C, погрешность измерения ± 2 °C). Относительный показатель выгорания топлива рассчитывался по формуле

$$\bar{m}_b = \frac{m_0 - m_1}{m_0},$$

где m_0 — начальная масса образца, m_1 — масса несгоревшего остатка, измеряемые с использованием аналитических весов Vibra AF 225 DRCE (дискретность 10^{-4} г).

Концентрации NO_x и SO_2 в дымовом газе определялись с помощью лабораторного газоанализатора (Тест-1 Бонэр-ВТ). Тренды, полученные в процессе выгорания топлив, обрабатывались путем осреднения и интегрирования значений. Все эксперименты проводились многократно, с последующим исключением грубых ошибок, вычислением коэффициентов вариации и оценкой случайной погрешности при доверительной вероятности 95 % [30]. Подробное описание используемых экспериментальных методик и характеристики оборудования приведены в [31, 32].

Экспериментальные данные положены в

основу расчета относительного показателя эффективности топлива по методу взвешенной суммы критериев (weighted sum method (WSM)) [9] в соответствии с формулой

$$A_n = \sum_{i=1}^n w_i \cdot \bar{x}_i,$$

где w_i — весовой коэффициент для каждого критерия, \bar{x}_i — нормированное значение критерия.

Значения весовых коэффициентов могут варьироваться от 0 до 1 в соответствии с принятым распределением приоритета между учитываемыми критериями оценки. Нормирование значений критериев выполняется либо относительно эталонного варианта (идеального случая), либо относительно значения, наилучшего среди существующих вариантов. В настоящей работе использован последний подход, т. е. значение той или иной характеристики топливного состава нормировалось относительно наилучшего значения этой характеристики у других рассматриваемых топлив. Показатель A_n можно рассчитывать как по ограниченной группе показателей (например, выбросы оксидов азота и серы), так и по всей совокупности известных характеристик. Значения A_n могут изменяться от 0 до 1. Чем выше значение A_n , тем более эффективным считается топливо по совокупности учитываемых характеристик в принятом варианте распределения приоритета.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В табл. 4 приведены исходные данные, используемые при многокритериальном анализе эффективности топлив на основе угольного шлама. На рис. 1 представлены результаты оценки эффективности низкосортных топлив по группе энергетических и экологических показателей. Значения A_n получены при равных весовых коэффициентах отдельных составляющих. Показатель энергетической эффективности в настоящей работе оценивался через совокупность следующих характеристик: зольность, удельная теплотворная способность, температуры зажигания и горения, время задержки газофазного и гетерогенного зажигания, относительный показатель выгорания топлива (см. табл. 4). Показатель экологической эффективности рассчитывался на основании

Таблица 4

Исходные данные для расчета показателей эффективности топлив

Параметр	Топливные композиции								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$C, \$/кг$	0.014	0.018	0.015	0.014	0.018	0.015	0.007	0.012	0.008
$Q, \text{МДж/кг}$	14.83	16.34	15.01	14.83	16.34	15.01	7.42	8.93	7.58
$A, \%$	26.46	25.14	25.21	26.46	25.14	25.21	13.23	11.91	11.98
$T_{ign}^{\min}, ^\circ\text{C}$	480	500	500	480	450	500	480	480	480
$T = 700 ^\circ\text{C}$									
$\tau_{d1}, \text{с}$	14.34	6.37	13.9	15.16	3.624	9.32	23.59	5.42	15.68
$\tau_{d2}, \text{с}$	47.97	43.46	43.58	11.55	39.56	28.16	18.62	13.59	31.42
$T^{\max}, ^\circ\text{C}$	959	980	993	955	957	967	988	969	1035
$\bar{m}_b, \%$	0.719	0.711	0.745	0.737	0.762	0.771	0.726	0.83	0.839
NO_x, ppm	78	70	73	75	69	67	53	67	51
SO_2, ppm	46	51	33	45	51	34	30	33	30
$T = 800 ^\circ\text{C}$									
$\tau_{d1}, \text{с}$	8.964	5.18	7.69	12.89	2.05	2.95	18.19	5.17	11.74
$\tau_{d2}, \text{с}$	42.29	40.94	34.97	9.40	23.98	19.51	11.81	12.11	29.48
$T^{\max}, ^\circ\text{C}$	1008	1031	1033	1026	1032	1032	1004	1001	1041
$\bar{m}_b, \%$	0.72	0.74	0.75	0.77	0.79	0.78	0.83	0.88	0.86
NO_x, ppm	110	101	87	118	87	79	64	73	57
SO_2, ppm	79	84	41	88	96	46	37	45	31
$T = 900 ^\circ\text{C}$									
$\tau_{d1}, \text{с}$	6.164	3.304	5.728	4.491	1.508	2.012	15.121	1.456	6.372
$\tau_{d2}, \text{с}$	35.952	35.348	28.632	8.791	25.060	16.320	12.283	2.122	23.476
$T^{\max}, ^\circ\text{C}$	1014	1068	1114	1109	1085	1087	1052	1058	1072
$\bar{m}_b, \%$	0.73	0.76	0.77	0.78	0.8	0.79	0.84	0.9	0.88
NO_x, ppm	185	201	163	173	192	156	125	146	115
SO_2, ppm	130	145	115	136	149	114	85	75	63

данных о выбросах NO_x и SO_x (см. табл. 4). В принятой постановке эксперимента как энергетические, так и экологические показатели при прочих равных условиях определяются составом топлива и формой его сжигания (таблетка, слой, капли суспензии). Результаты показали, что с точки зрения энергетических показателей (рис. 1, а) одними из наиболее эффективных являются топливные смеси, сжигаемые в виде слоя с добавками отработанного турбинного масла и опилок ($A_n \approx 0.783$ и 0.837 со-

ответственно). Их высокая эффективность обусловлена высокой температурой горения, малым временем задержки зажигания и достаточно высоким показателем выгорания исходной массы. Группа топлив, сжигаемых в виде таблеток, имела в целом самые низкие показатели энергетической эффективности. Таблетки наиболее инерционны с точки зрения зажигания, а также хуже выгорают, чем капли суспензий или слой топлива. Эти особенности обусловлены тем, что диффузия кислоро-

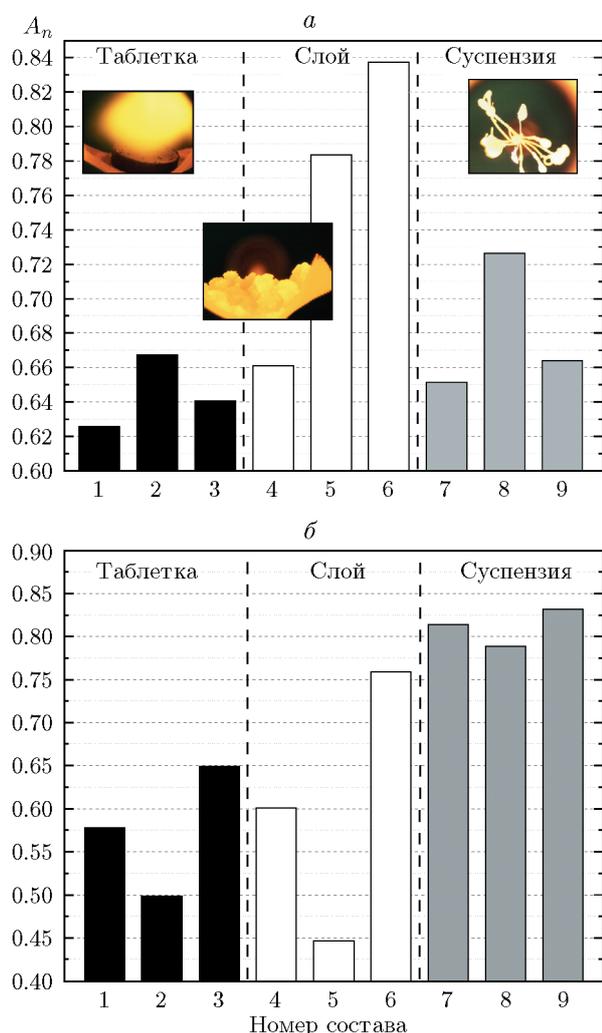


Рис. 1. Относительный показатель энергетической (а) и экологической (б) эффективности топлив ($T_g \approx 800$ °С, номера составов соответствуют номерам топливных композиций в табл. 3)

да и продуктов горения вне образца топлива и внутри него (в трещинах и порах) затруднена вследствие плотной структуры таблетки. Капли суспензии характеризовались высокими показателями выгорания исходной массы, высокими температурами горения, однако имели низкую удельную теплоту сгорания и достаточно длительную задержку зажигания по сравнению с топливами, сжигаемыми в виде таблетки или слоя. По этим причинам совокупный энергетический показатель эффективности суспензий (рис. 1,а) был меньше на $7 \div 20$ %, чем у смесей, сжигаемых в виде слоя.

Рис. 1,б иллюстрирует показатели экологической

эффективности исследуемых топлив. Наибольшие перспективы с точки зрения минимизации вредных выбросов имеют топлива, сжигаемые в виде капель водной суспензии. При идентичных температурных условиях ($700 \div 900$ °С) выбросы NO_x и SO_x при их горении в $1.2 \div 2$ раза ниже по сравнению с топливами на основе аналогичных компонентов, но сжигаемых в виде слоя или таблетки. Полученный результат иллюстрирует положительную роль воды в формировании вредных выбросов. В процессе прогрева и выгорания суспензии образуется водяной пар, который согласно [33–35] может способствовать протеканию ряда химических взаимодействий, препятствующих превращению соединений серы и азота в опасные газы. Несмотря на положительную роль воды, ее наличие в составе суспензии требует увеличения расхода топлива и затрат тепловой энергии на парообразование. Добавка турбинного масла к угольному шламу во всех случаях приводила к уменьшению показателя экологической эффективности топлив на $2 \div 30$ % (см. рис. 1,б). Турбинное масло интенсифицирует выгорание и повышает тепловыделение в зоне горения, что ведет к росту выбросов NO_x и SO_x . Добавка древесной биомассы, напротив, увеличивала показатель экологической эффективности сжигания угольного шлама на $5 \div 25$ %. Результат обусловлен сравнительно низким серо- и азотосодержанием опилок, а также высокими концентрациями таких металлов, как магний, кальций, калий. С их участием при нагреве протекают реакции образования сульфатов, т. е. сера частично удерживается в зольном остатке, а не выделяется в виде SO_2 . Рассматривая совокупность полученных результатов (см. рис. 1), можно сделать вывод, что добавка опилок к угольному шламу положительно влияет как на энергетический, так и на экологический показатель эффективности при всех трех формах сжигания. Добавку турбинного масла наиболее целесообразно использовать при сжигании водной суспензии, поскольку она значительно (см. рис. 1,а) улучшает энергетические показатели при умеренном снижении показателя экологической эффективности (на $2 \div 5$ %).

Рис. 2 иллюстрирует итоговый показатель эффективности топливных смесей, рассчитанный при условии равных приоритетов составляющих. Учитывались энергетический и экологический показатели эффективности, а так-

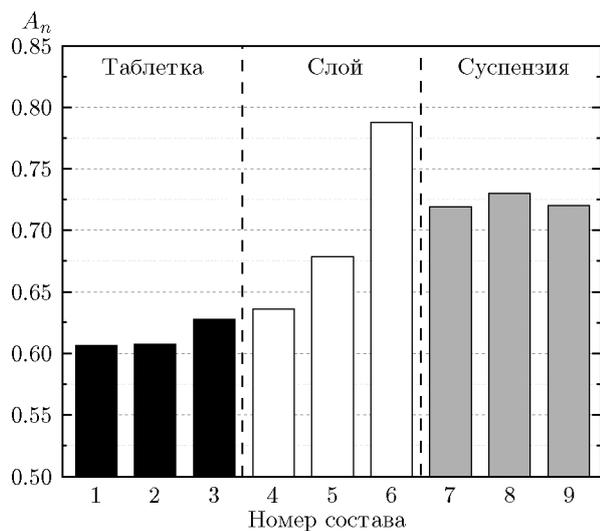


Рис. 2. Итоговый показатель эффективности топлив ($T_g \approx 800 \text{ }^\circ\text{C}$, номера составов соответствуют номерам топливных композиций в табл. 3)

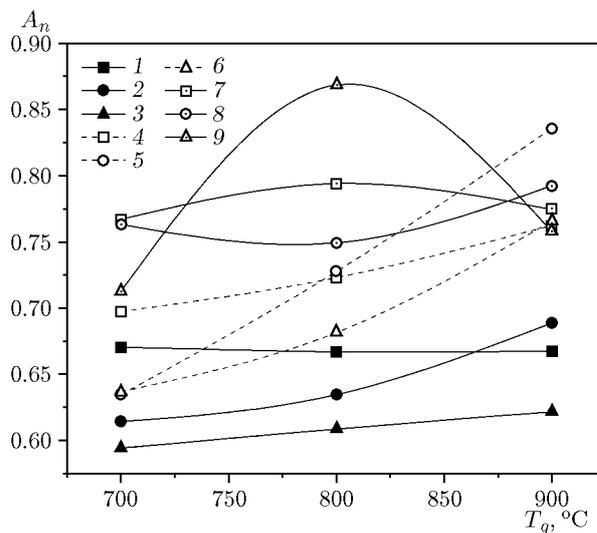


Рис. 3. Итоговый показатель эффективности топлив в зависимости от температуры в печи (кривые 1–9 соответствуют номерам топливных композиций в табл. 3)

же удельная стоимость топлива. Согласно полученным данным, максимальной итоговой эффективностью ($A_n \approx 0.775$) характеризуется состав 95 % угольного шлама + 5 % опилок, сжигаемый в виде слоя. Аналогичное топливо, сжигаемое в виде таблетки, имело один из самых низких показателей итоговой эффективности ($A_n \approx 0.627$). Брикетирование низкорекреакционных топлив может приводить к значительному ухудшению характеристик зажигания и горения, что, в свою очередь, снижает общую эффективность технологического процесса. Можно предположить, что для развития технологии сжигания топливных таблеток и брикетов целесообразно предъявлять более строгие требования к качеству сырья, использовать высокорекреакционные добавки и улучшать условия тепло- и массопереноса в камере сгорания для интенсификации выгорания органической массы. Высокие показатели итоговой эффективности ($0.718 \div 0.729$) также характерны для топлив, сжигаемых в виде капель суспензии. Для этих топлив значения A_n находились в наименьшей зависимости от типа используемой добавки, однако наибольшей эффективности топлива достигали при использовании в составе суспензии отработанного турбинного масла. Добавка опилок приводила к наибольшему росту (на 24 %) показателя итоговой эффективности угольного шлама, сжигаемого в виде слоя.

Эксперименты подтвердили, что время задержки газофазного и гетерогенного зажигания, выбросы оксидов серы и азота при горении топлив достаточно сильно зависят от температуры в печи T_g . На рис. 3 представлена зависимость итогового показателя эффективности топлив от температуры нагрева. Несмотря на то, что характеристики зажигания и горения достаточно однозначно зависели от температуры в печи, итоговый показатель эффективности A_n разных топлив не имел определенной зависимости от значения T_g (см. рис. 3). Результат в основном был обусловлен методикой нормирования отдельных составляющих показателя A_n . Согласно алгоритму расчета все характеристики нормировались относительно наилучшего значения среди существующих вариантов, т. е. нормирование проводилось при анализе всех исследуемых топлив. Соответственно, после нормирования критерий оценки может изменить характер зависимости от температуры в печи. Среди исследуемых топлив максимальный показатель эффективности ($A_n \approx 0.868$) достигался при сжигании при $800 \text{ }^\circ\text{C}$ суспензии на основе угольного шлама и опилок. Наибольшее изменение A_n (на $10 \div 30 \%$) при увеличении температуры в диапазоне $700 \div 900 \text{ }^\circ\text{C}$ характерно для топлив, сжигаемых в виде слоя.

На рис. 4 приведена диаграмма, иллюстрирующая результаты вычисления итогового

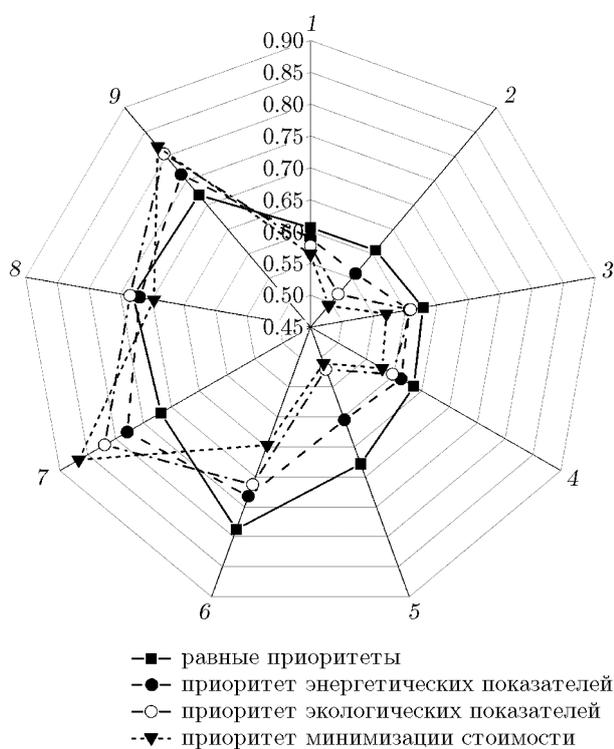


Рис. 4. Итоговый показатель эффективности топливных смесей при варьировании приоритетов групп критериев оценки ($T_g \approx 800$ °С, номера лучей диаграммы соответствуют номерам топливных композиций в табл. 3)

го показателя эффективности топлива при варьировании весовых коэффициентов. Рассмотрены четыре случая:

- 1) весовые коэффициенты для всех групп критериев одинаковы ($w_i = 0.33$);
- 2) максимальный приоритет присваивается группе энергетических показателей (весовой коэффициент $w_i = 0.5$); для группы экологических показателей и стоимости принимается $w_i = 0.25$;
- 3) максимальный приоритет присваивается группе экологических показателей ($w_i = 0.5$); для группы энергетических показателей и стоимости принимается $w_i = 0.25$;
- 4) максимальный приоритет присваивается минимизации стоимости ($w_i = 0.5$); для групп энергетических и экологических показателей принимается $w_i = 0.25$.

Результаты подтверждают, что выбор приоритета критериев оценки значительно влияет на итоговый показатель эффективности топлив: значение A_n для топлива одного состава могло изменяться в $1.07 \div 1.32$ ра-

за. При этом наименьшая зависимость от распределения приоритетов характерна угольному шламу без добавок, сжигаемому в виде таблетки или слоя. В этих случаях свойства топлива и характеристики его зажигания и горения не позволяли получить преимущества при присвоении максимального весового коэффициента какой-либо категории оценки. Независимо от распределения весовых коэффициентов наблюдалась следующая тенденция: максимальная эффективность характерна суспензиям всех трех составов, а также угольному шламу с добавкой опилок, сжигаемому в виде слоя. Результат связан с тем, что суспензии, несмотря на ряд значительных недостатков (например, низкую теплотворную способность), обладают комбинацией важных преимуществ, позволяющих получить приоритет при анализе комплекса энергетических, экологических характеристик и стоимости. В большинстве случаев наилучшими из рассмотренных составов стали смеси 50 % угольного шлама + 50 % воды и 45 % угольного шлама + 5 % опилок + 50 % воды. Суспензия на основе угольного шлама с добавлением турбинного масла, несмотря на энергетическую эффективность (см. рис. 1, а), не получила высокого показателя комплексной эффективности в сравнении с другими суспензиями по причине достаточно высокой стоимости отработанного турбинного масла. При этом ее общая эффективность выше (на $10 \div 40$ %), чем у составов с аналогичной добавкой, но сжигаемых в виде таблетки и слоя. Среди всех рассмотренных вариантов распределения весовых коэффициентов наибольший показатель эффективности ($A_n \approx 0.866$) характерен для топлива 50 % угольного шлама + 50 % воды при приоритете минимизации стоимости смеси. Близкой эффективностью характеризуется суспензия с добавлением опилок в случаях, когда приоритет отдается минимизации стоимости и выбросов при горении ($A_n \approx 0.819$ и 0.804 соответственно).

Результаты исследования представляют интерес при анализе сильных и слабых сторон технологий и обоснования возможности сжигания широкого спектра отходов в составе композиционных топлив. Варианты присвоения приоритетов позволяют оценить потенциальную выгоду, которую можно получить от сжигания того или иного топлива. Результаты экспериментальных исследований процессов зажига-

ния и горения низкосортных топливных смесей целесообразно применять для разработки эффективных технологий энергетической утилизации отходов.

ВЫВОДЫ

1. Максимизация энергетической эффективности возможна при сжигании обезвоженного угольного шлама с добавкой биомассы или отработанного масла в виде сухой смеси. В промышленном масштабе такие топлива можно эффективно использовать в вихревых камерах сгорания и котлах с кипящим слоем. Группа топлив, сжигаемых в виде таблеток, имела самые низкие показатели энергетической, экологической и комплексной эффективности.

2. Добавка опилок (5 % мас.) положительно влияла на энергетическую и экологическую эффективность сжигания угольного шлама. Отработанное турбинное масло наиболее целесообразно использовать при сжигании угольного шлама в виде капель суспензии. В этом случае основные характеристики зажигания и горения значительно улучшаются при умеренном снижении показателя экологической эффективности.

3. Независимо от распределения значимости критериев оценки максимальная комплексная эффективность характерна для суспензий на основе угольного шлама, а также сухой смеси 95 % угольного шлама + 5 % опилок, сжигаемой в виде слоя.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Global Waste Management Outlook** / D. C. Wilson (Ed.). — Vienna: Int. Solid Waste Association General Secretariat, 2015.
2. **Kaza S., Yao L. C., Bhada-Tata P., Van Wierden F.** What a waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050. — Washington, DC: World Bank, 2018.
3. **International Bioenergy Trade: History, Status & Outlook on Securing Sustainable Bioenergy Supply, Demand and Markets** / M. Junginger, C. S. Goh, A. Faaij (Eds). — Dordrecht: Springer, 2014.
4. **Zhao Z., Wang R., Ge L., Wu J., Yin Q., Wang C.** Energy utilization of coal-coking wastes via coal slurry preparation: The characteristics of slurring, combustion, and pollutant emission // *Energy*. — 2019. — V. 168. — P. 609–618. — DOI: 10.1016/j.energy.2018.11.141.
5. **Wang J., Zhang B., Zhong Z., Ding K., Deng A., Min M., Chen P., Ruan R.** Catalytic fast co-pyrolysis of bamboo residual and waste lubricating oil over an ex-situ dual catalytic beds of MgO and HZSM-5: Analytical PY-GC/MS study // *Energy Convers. Manage.* — 2017. — V. 139. — P. 222–231. — DOI: 10.1016/j.enconman.2017.02.047.
6. **Malika A., Mohammed A., Guhel Y.** Energetic combustion characteristics and environmental impact of Moroccan biomass wastes and their solid biofuel // *Waste Biomass Valorization*. — 2019. — V. 10. — P. 1311–1322. — DOI: 10.1007/s12649-017-0128-2.
7. **Demirbas A.** Combustion characteristics of different biomass fuels // *Prog. Energy Combust. Sci.* — 2004. — V. 30, N 2. — P. 219–230. — DOI: 10.1016/j.pecs.2003.10.004.
8. **Shahnazari A., Rafiee M., Rohani A., Nagar B. B., Ebrahimini M. A., Aghkhani M. H.** Identification of effective factors to select energy recovery technologies from municipal solid waste using multi-criteria decision making (MCDM): A review of thermochemical technologies // *Sustain. Energy Technol. Assessm.* — 2020. — V. 40. — P. 100737. — DOI: 10.1016/j.seta.2020.100737.
9. **Kumar A., Sah B., Singh A. R., Deng Y., He X., Kumar P., Bansal R. C.** A review of multi criteria decision making (MCDM) towards sustainable renewable energy development // *Renew. Sustain. Energy Rev.* — 2017. — V. 69. — P. 596–609. — DOI: 10.1016/j.rser.2016.11.191.
10. **Andra Luciana T., Gasparotti C., Rusu E.** Green fuels — A new challenge for marine industry // *Energy Rep.* — 2021. — V. 7. — P. 127–132. — DOI: 10.1016/j.egy.2021.06.020.
11. **Kumar C., Rana K. B., Tripathi B.** Performance evaluation of diesel-additives ternary fuel blends: An experimental investigation, numerical simulation using hybrid Entropy-TOPSIS method and economic analysis // *Therm. Sci. Eng. Prog.* — 2020. — V. 20. — P. 100675. — DOI: 10.1016/j.tsep.2020.100675.
12. **Kuan Y. H., Wu F. H., Chen G. B., Lin H. T., Lin T. H.** Study of the combustion characteristics of sewage sludge pyrolysis oil, heavy fuel oil, and their blends // *Energy*. — 2020. — V. 201. — P. 117559. — DOI: 10.1016/j.energy.2020.117559.
13. **Fu B., Liu G., Mian M. M., Zhou C., Sun M., Wu D., Liu Y.** Co-combustion of industrial coal slurry and sewage sludge: Thermochemical and emission behavior of heavy metals // *Chemosphere*. — 2019. — V. 233. — P. 440–451. — DOI: 10.1016/j.chemosphere.2019.05.256.
14. **Zhao X., Zhu W., Huang J., Li M., Gong M.** Emission characteristics of PCDD/Fs, PAHs and PCBs during the combustion of sludge-coal water slurry // *J. Energy Inst.* — 2015. — V. 88, N 2. — P. 105–111. — DOI: 10.1016/j.joei.2014.07.005.
15. **Skoglund N., Bäfver L., Fahlström J., Holmén E., Renström C.** Fuel design in co-

- combustion of demolition wood chips and municipal sewage sludge // *Fuel Process. Technol.* — 2016. — V. 141, N 2. — P. 196–201. — DOI: 10.1016/j.fuproc.2015.08.037.
16. **Gaber C., Wachter P., Demuth M., Hochenauer C.** Experimental investigation and demonstration of pilot-scale combustion of oil-water emulsions and coal-water slurry with pronounced water contents at elevated temperatures with the use of pure oxygen // *Fuel.* — 2020. — V. 282. — P. 118692. — DOI: 10.1016/j.fuel.2020.118692.
 17. **Ahn J., Kim H. J.** Combustion process of a Korean wood pellet at a low temperature // *Renew. Energy.* — 2020. — V. 145. — P. 391–398. — DOI: 10.1016/j.renene.2019.05.031.
 18. **Guo F., Zhong Z.** Optimization of the co-combustion of coal and composite biomass pellets // *J. Cleaner Product.* — 2018. — V. 185. — P. 399–407. — DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.03.064.
 19. **Hong F., Yan G., Gao M.** The operation control and application of CFB boiler unit with high blending ratio of coal slurry // *Control Eng. Practice.* — 2019. — V. 85. — P. 80–89. — DOI: 10.1016/j.conengprac.2018.12.001.
 20. **Wang Y., Cao M., Wang Z., Wei L., Zhao S.** A novel suspension-floating-circulating fluidized combustion technology for coal slurry // *Int. J. Coal Sci. Technol.* — 2016. — V. 3. — P. 35–46. — DOI: 10.1007/s40789-016-0106-5.
 21. **Staroń A., Banach M., Kowalski Z., Staroń P.** Impact of waste soot on properties of coal-water suspensions // *J. Cleaner Production.* — 2016. — V. 135. — P. 457–467. — DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.06.127.
 22. **Liu J., Wang R., Xi J., Zhou J., Cen K.** Pilot-scale investigation on slurring, combustion, and slagging characteristics of coal slurry fuel prepared using industrial wasteliquid // *Appl. Energy.* — 2014. — V. 115. — P. 309–319. — DOI: 10.1016/j.apenergy.2013.11.026.
 23. **ISO 1928:2020.** Coal and coke — Determination of gross calorific value, 2020.
 24. **ASTM D240-19.** Standard Test Method for Heat of Combustion of Liquid Hydrocarbon Fuels by Bomb Calorimeter. — ASTM Int.: West Conshohocken, 2019.
 25. **ISO 11722:2013.** Solid mineral fuels — Hard coal — Determination of moisture in the general analysis test sample by drying in nitrogen. — 2013.
 26. **ISO 1171:2010.** Solid mineral fuels — Determination of ash. — 2010.
 27. **ASTM D5373-21.** Standard Test Methods for Determination of Carbon, Hydrogen and Nitrogen in Analysis Samples of Coal and Carbon in Analysis Samples of Coal and Coke. — ASTM Int.: West Conshohocken, 2021.
 28. **ISO 6245:2001.** Petroleum products — Determination of ash. — 2001.
 29. **ISO 2592:2017.** Petroleum and related products — Determination of flash and fire points — Cleveland open cup method. — 2017.
 30. **Rabinovich S. G.** Measurement Errors and Uncertainties: Theory and Practice. — New York: Springer, 2005.
 31. **Vershinina K., Strizhak P., Dorokhov V., Romanov D.** Combustion and emission behavior of different waste fuel blends in a laboratory furnace // *Fuel.* — 2021. — V. 285. — P. 119098. — DOI: 10.1016/j.fuel.2020.119098.
 32. **Vershinina K., Nyashina G., Strizhak P.** Lab-scale combustion of high-moisture fuels from peat, coal waste and milled lignite // *Waste Biomass Valorization.* — 2021. — V. 12. — P. 6619–6634. — DOI: 10.1007/s12649-021-01482-2.
 33. **Zhou H., Li Y., Li N., Qiu R., Cen K.** Conversions of fuel-N to NO and N₂O during devolatilization and char combustion stages of a single coal particle under oxy-fuel fluidized bed conditions // *J. Energy Inst.* — 2019. — V. 92. — P. 351–363. — DOI: 10.1016/j.joei.2018.01.001.
 34. **Olympiou G. G., Efstathiou A. M.** Industrial NO_x control via H₂-SCR on a novel supported-Pt nanocatalyst // *Chem. Eng. J.* — 2011. — V. 170, N 2-3. — P. 424–432. — DOI: 10.1016/j.cej.2011.01.001.
 35. **Tu Y., Liu H., Su K., Chen S., Liu Z., Zheng C., Li W.** Numerical study of H₂O addition effects on pulverized coal oxy-MILD combustion // *Fuel Process. Technol.* — 2015. — V. 138. — P. 252–262. — DOI: 10.1016/j.fuproc.2015.05.031.

*Поступила в редакцию 24.01.2022.
Принята к публикации 28.02.2022.*