ПРИЛОЖЕНИЕ В

Базы данных

Наряду с представленным в разделе 1.3 описанием базы данных по задержке воспламенения высокоэнергетических углеводородных соединений, закономерностям влияния химического состава, соотношения компонентов и температуры, в результате выполнения исследований в ИХКГ СО РАН разработаны детальные химико-кинетические механизмы, к которым предоставлен открытый доступ в сети Интернет:

Детальный химико-кинетический механизм горения углеводородов C0-C12

http://str.kinetics.nsc.ru/kcp/Mechanisms/Mech_HC_PAH.zip ;

Детальный химико-кинетический механизм окисления углеводородных топлив, включающий ионно-молекулярные реакции

http://str.kinetics.nsc.ru/kcp/Mechanisms/Mech_KGK_2.zip

База данных по теплофизическим и термокинетическим параметрам, теплотворной способности, элементному составу, составу золы и другим характеристикам перспективных композиционных топлив (ТПУ)

Теплотехнические и кинетические характеристики топлива определяют многие аспекты его использования. Их важно учитывать при конструировании топок и камер сгорания, а также при хранении и транспортировке топлива. Кроме того, знание характеристик компонентов топлива необходимо для создания качественных математических моделей зажигания и горения. К теплотехническим можно отнести следующие характеристики: зольность, влажность, элементный состав, выход летучих, теплота сгорания. Кинетические характеристики топлива включают в себя энергию активации, предэкспоненциальный множитель, температуру зажигания.

На сегодняшний день наиболее часто используемым методом при изучении кинетических характеристик топлив является термогравиметрия (ТГ) [1, 2]. Данный метод основан на нагревании образца топлива с определенной скоростью при одновременном контроле изменения массы образца. Распространен также метод деривативной термогравиметрии (ДТГ), основанный на анализе скорости изменения термогравиметрической кривой [3]. Методы ТГ и ДТГ позволяют получить значения температуры зажигания, энергий активации топлива, скорость его прогорания [1, 4]. На сегодняшний день существует множество серийно изготавливаемых дериватографов, а

также современных синхронных термических анализаторов. Для определения теплоты сгорания топлива используются различные лабораторные калориметры [2, 5].

Характеристики горения полукокса и нефтешлама изучались в [2]. Температурный диапазон составлял 190–705 °C. Эксперименты проводились с использованием анализатора METTLER-TOLEDO TGA 2, скорость нагрева принималась равным 20 °C/мин. Согласно экспериментальным данным, при увеличении доли нефтешлама от 0 до 100%, температура зажигания топлива уменьшилась с 511.6 °C до 257 °C. Скорость прогорания, в свою очередь, напротив, увеличивалась по мере увеличения доли нефтешлама. Полнота прогорания топлива максимальна при доле шлама 60%. Наиболее оптимальным с точки зрения зажигания, полноты и скорости прогорания стал состав «40% полукокс, 60% нефтешлам».

Совместное сжигание пеллет на основе биомассы, каменного и бурого углей проводилось в статье [3]. Выбранный температурный диапазон – 25–900°C, темп нагрева – 20 °C/мин. По мере увеличения доли биомассы, скорость и полнота прогорания увеличивались, а температура зажигания – уменьшалась. Энергия активации при смешении пеллет и каменного угля минимальна при доле биомассы 30% (76,36 кДж/моль), а при смешении с бурым углем – при 10% (47,07 кДж/моль).

В [1] изучаются процессы зажигания каменного угля с добавками NiO, Fe_2O_3 и CeO_2. Для этого используется STA-200 (синхронный термический анализатор), являющийся типичным представителем оборудования для термогравиметрического анализа. Образец топлива массой 10 г помещали в тигель, в качестве окислителя использовался атмосферный воздух (расход 100 мл/мин). Нагрев образца проводился от комнатной температуры до 900 °C при различных скоростях нагрева (10–30 °C/мин). Определялись энергия активации, предэкспоненциальный множитель, температура зажигания, потеря массы. Согласно полученным экспериментальным данным, внесение металлических добавок снижает температуру зажигания, интенсифицирует процесс выгорания топливного образца. Энергия активации для каменного угля без добавок составила 131,8 кДж/моль, в то время как при внесении различных добавок она варьировалась в диапазоне 81,2–105,7 кДж/моль (снизилась на 25–62%).

В [4] проводились эксперименты по совместному сжиганию угольной породы и арахисовой скорлупы. В качестве экспериментальной установки используется термогравиметрический анализатор TGA 8000. Максимальная температура составляла 1000 °C, а темп нагрева варьировался в диапазоне 10–30 °C. Результаты экспериментов демонстрируют улучшение характеристик горения и зажигания смесевого топлива по сравнению с его отдельными компонентами. Энергия активации угольной породы

составляет 138,26 кДж/моль, арахисовой скорлупы – 123,46 кДж/моль. При их совместном сжигании энергия активации снизилась до 114,27 кДж/моль. Температуры зажигания угольной породы, арахисовой скорлупы и их смеси составили 455,9; 282,3; 282,1 °С, соответственно.

Совместное сжигание угля и осадка сточных вод в высушенном виде и продукта его пиролиза исследовалось в [5]. Эксперименты проводились на термогравиметрическом анализаторе STA 449 F3 Jupiter. Максимальная температура в ходе эксперимента составляла 900 °С, а скорость нагрева изменялась от 10 до 20 °С/мин. Отмечено, что температура зажигания композиционного топлива на основе угля и осадка сточных вод меньше (208,9 и 270,9 °С соответственно) по сравнению с температурой зажигания аналогичного угля (352,1 °С). Энергия активации композиционного топлива также снизилась на 7–15% по сравнению с чистым углем.

Jiang et al. [6] исследовали топливные композиции, включающие в свой состав осадок сточных вод и растительные компоненты (камфорная и рисовая солома). Чтобы оценить влияние доли биомассы (20–80%) на характеристики зажигания топлив, проводился термогравиметрический анализ в окислительной атмосфере. В результате проведенных экспериментов отмечено, что минимальные температуры зажигания составляют в среднем 220–290 °С [6].

Характеристики горения суспензий на основе угля и отходов его приготовления исследуются в [7]. В качестве топливных образцов выступали ВУТ (на основе каменного угля), суспензия на основе каменного угля и технической воды, а также ВУТ с добавкой угольного шлама. Эксперименты проводились при помощи термогравиметрического анализатора TA SDT Q600. Максимальная температура сжигания достигала 1000 °С, а скорость нагрева составляла 10 °С/мин. Согласно полученным данным, добавка шлама снизила температуру зажигания ВУТ на 5 °С по сравнению с обыкновенным ВУТ. Снижение температуры зажигания связывают [7] с тем фактом, что угольный шлам содержит значительную долю летучих, выход которых способствует более раннему зажиганию. Также исследователи сделали предположение о том, что угольный шлам содержит в своем составе минеральные вещества, которые могут выступать катализатором процесса зажигания.

В [8] изучается влияние добавки оксида титана на ВУТ. Смеси изготавливались на основе бурого и длиннопламенного углей, а также антрацита. Доля твердой части для вышеперечисленных углей составляла 58; 65; 70 %, соответственно. Доля оксида титана составляла 3%. Определяясь характеристики зажигания и горения капель таких топливных смесей. Экспериментальные исследования, проведенные при температуре в

камере сгорания 550–800 °С показали, что внесение оксида титана увеличивает теплопроводность получившейся топливной смеси на 9–17% и уменьшает ее теплоемкость на 12–23%. Время испарения воды при добавке титана уменьшается на 40–45%, а температура зажигания уменьшается на 35–50 °С. Такие изменения объясняют тем [8], что частицы оксида титана, оказавшиеся на поверхности капли топлива, снижают поверхностное натяжение, в также образуют локальные центры нагрева, что увеличивает скорость прогрева капли топлива.

Совместное сжигание угольного шлама и осадка сточных вод в слоевой топке, а также термогравиметрический анализ компонентов композиционного топлива и их смеси выполнялось в [9]. В качестве оборудования для термогравиметрии использовался PerkinElmer STA6000 синхронный термический анализатор. Максимальная температура в ходе термогравиметрии достигала 1000 °С. Скорость нагрева изменялась в диапазоне 10–60 °С. Процесс горения разделяют [9] на три стадии: просушивание топлива и первичный выход летучих (40–170 °С), выход летучих (172–400 °С) и зажигание твердой части (401–600 °С). Экспериментальные данные говорят о том, что, по мере увеличения доли осадка сточных вод в топливной композиции, температура зажигания топливной смеси уменьшается с 424,2 °С до 318,5 °С (на 33%). Это обусловлено [9] большей долей летучих в составе осадка сточных вод и их более интенсивным выходов в ходе первой и второй стадий. Скорость изменения массы образца топлива по мере увеличении доли биомассы увеличивается с 0,34 %/мин до 2,27 %/мин на второй стадии, однако на третьей стадии падает с 5,96 %/мин до 1,58 %/мин. Это также объясняется высокой скоростью выхода летучих осадка сточных вод и меньшей долей твердого горючего компонента, горение которого и обеспечивает уменьшение массы на третьей стадии. Наиболее предпочтительным композиционным топливом с точки зрения кинетики зажигания и горения, согласно результатам анализа полученных данных, является смесь, содержащая 80% угольного шлама и 20% осадка сточных вод.

Исследование [10] посвящено исследованию процесса газификации суспензий на основе бурого угля и жидких продуктов пиролиза биомассы (рисовая шелуха, фруктовые отходы). Эксперименты проводились при помощи термогравиметрического анализатора STA409PG. Температура в ходе газификации достигала 1200 °С, скорость нагрева принята постоянной (20 °С/мин). Согласно экспериментальным данным, энергия активации суспензии с добавкой рисовой шелухи ниже на 27% по сравнению с бурым углем (58,84 кДж/моль и 74.82 кДж/моль соответственно). Температура газификации топливных суспензий оказалась ниже, чем у чистого бурого угля (на 5–7%).

Технический и элементный анализ, теплофизические свойства компонентов суспензионных топлив

Органоводоугольные (ОВУТ) и водоугольные (ВУТ) топлива представляют гомогенные смеси нескольких компонентов. В общем случае суспензия ОВУТ включает твердую и жидкую составляющие. В частных случаях как твердая, так и жидкая части могут включать несколько горючих и негорючих компонентов. Ниже представлены перечни перспективных (по экологическим, энергетическим, экономическим, технологическим и/или социальным критериям) компонентов для приготовления топливных смесей, а также типичные диапазоны массовых и/или объемных концентраций компонентов (определены на основе научно-практического опыта, анализа публикаций по реологии, распылению, зажиганию и горению топливных суспензий).

Твердые горючие компоненты: каменные и бурые угли; торф; угольные отходы (шламы, фильтр-кеки, промпродукт); биомасса и древесные компоненты (кора, опилки, древесный уголь); твердые бытовые отходы (картон, резина, пластик, целлюлозно-бумажные материалы и др.). Общая массовая доля твердых составляющих в топливной суспензии может варьироваться от 40% до 60%.

Жидкие горючие компоненты (массовые доли 5–15%): масла нефтяного происхождения (отработанные и исходные); нефтяные шламы; тяжелая нефть и мазут; растительные масла; глицерин; жидкие продукты пиролиза различных компонентов; спирты и др. Типичный жидкий негорючий компонент – вода (массовая доля 40–60%) для подготовки смесей может быть водопроводной, технической, сточной, дистиллированной и др.

Помимо перечисленных в состав суспензии могут вводиться компоненты, улучшающие стабильность или снижающие вязкость (синтетические и природные ПАВы, масла, крахмал, лигнин, камеди и др.). Их массовая доля, как правило, варьируется в диапазоне 0,5–5%.

Табл. В1 иллюстрирует свойства различных компонентов (влажность, зольность, содержание летучих, теплота сгорания, содержание углерода, водорода, серы и т.д., а также теплофизические и термокинетические характеристики). В Табл. В2 представлены результаты анализа характеристик жидких горючих нефтепродуктов. Анализ свойств компонентов заключался в определении влажности аналитической пробы в воздушно-сухом состоянии (W^a), зольности в сухом состоянии (A^d), выхода летучих веществ на сухое беззольное состояние (V^{daf}) по методикам, соответствующим стандартам:

– ГОСТ Р 52911-2013 (ISO 589:2008) Топливо твердое минеральное. Определение общей влаги (погрешность 0,3 %);

– ГОСТ Р 55661-2013 (ISO 1171:2010) Топливо твердое минеральное. Определение зольности (ISO 1171:2010) (погрешность 0,2 %);

– ГОСТ Р 55660-2013 (ISO 5071-1:2013) Топливо твердое минеральное. Определение выхода летучих веществ (погрешность 0,5 %).

Высшая теплота сгорания ($Q^a_{s,V}$) аналитических проб твердых и жидких компонентов при постоянном объеме установлена с помощью калориметра IKA C 2000 в соответствии с методикой, описанной в ГОСТ 147-2013 (ISO 1928-2009) Топливо твердое минеральное. Определение высшей теплоты сгорания и расчет низшей теплоты сгорания (погрешность 0,2%).

Элементный состав образцов в соответствии с методикой ASTM D5373-14e1, Standard Test Methods for Determination of Carbon, Hydrogen and Nitrogen in Analysis Samples of Coal and Carbon in Analysis Samples of Coal and Coke (погрешность 0,2 %) выполнялся с помощью специализированного оборудования (vario MICRO cube фирмы Elementar). Сжигалась навеска образца в атмосфере кислорода при температуре 1373 К. Выполнялось последующее хроматографическое разделение образовавшихся газов и детектирование с помощью катарометра. Установленные массовые доли компонентов (C^a, H^a, N^a, S^a) пересчитывались на сухое беззольное состояние (C^{daf}, H^{daf}, N^{daf}, S^{daf}):

$$C^{daf} = C^a \frac{100}{100 - W^a - A^a}; \; H^{daf} = H^a \frac{100}{100 - W^a - A^a};$$

$$N^{daf} = N^a \frac{100}{100 - W^a - A^a}; \; S^{daf} = S^a \frac{100}{100 - W^a}.$$

Плотность (ρ) жидких нефтепродуктов определена с помощью ареометра (диапазон измерения 820–880 кг/м^3, цена деления шкалы – 1 кг/м^3). Влажность и зольность вычислялись по методикам ISO 3733-1999 (Petroleum products and bituminous materials. Determination of water. Distillation method) и ISO 6245-2001 (Petroleum products. Determination of ash), температура вспышки (T_f) и температура воспламенения (T_{ign}) – по методике ISO 2592-2000 (Petroleum products. Determination of flash and fire points. Cleveland open cup method).

Таблица В1. Результаты технического, элементного и теплофизического анализов компонентов ОВУТ

Компоненты	Влаж-ность на рабочую массу, %	A^d, %	V^{daf}, %	$Q^a_{s,V}$, МДж/кг	C^{daf}, %	H^{daf}, %	N^{daf}, %	S_t^d, %	O^{daf}, %	λ, Вт/(м·К)	C_p, Дж/(кг·К)	a, см^2/с
Основной угольный компонент												
Фильтр-кек «Г»	53	33.82	43.11	22.16	75.12	4.64	1.92	0.23	18.09	0.323-0.42	1317.43-1651.93	0.00156-0.00166
Фильтр-кек «Д»	56.8	36.99	41.47	19.24	73.27	4.9	2.35	0.22	19.26	0.296-0.34	1795.43-1987.46	0.00133-0.0014
Фильтр-кек «Ж»	37.9	57.67	45.24	20.9	73.16	5.00	2.6	0.64	18.60	0.22-0.29	922.63-1543.8	0.0011-0.0014
Фильтр-кек «К»	43.5	26.46	23.08	24.83	87.20	5.09	2.05	1.02	4.64	0.366-0.37	1895.2-2235.36	0.00153-0.00176
Фильтр-кек «Т»	39.1	21.20	16.09	26.92	90.13	4.26	2.31	0.44	2.87	0.246-0.342	1894.3-2191.41	0.0012-0.00147
Фильтр-кек «СС»	37.9	50.89	30.16	15.23	87.47	5.04	2.15	0.44	4.90	0.31-0.496	1489.2-2435.47	0.00127-0,00147
Фильтр-кек ОФ Северная	42.5	26.4	21.7	25.88	89.44	4.67	2.19	0.83	2.87	0.31-0.39 (57-152 °С)	1398.1-2256.8 (57-152 °С)	0.0016-0.0013 (57-152 °С)
Фильтр-кек ОФ Анжерская	39.3	57.4	24.2	22.51	86.66	4.39	2.29	0.39	6.27	0.31-0.48 (57-305 °С)	1624.2-3533.9 (57-305 °С)	0.0016-0.0012 (57-305 °С)
Шлам	18.8	20.2	20.8	28.3	88.27	4.35	2.18	0.57	4.63	0.313-0.511 (57-305 °С)	1499.4-3490.0 (57-305 °С)	0.0020-0.0014 (57-305 °С)
Торф Суховской	9.9	22.8	74.8	11.8	52.06	6.31	3.58	0.20	37.85	0.4-0.23 (26-110 °С)	2398.57-1480.97 (26-110 °С)	0.0013-0.0012 (26-110 °С)
Нефтекокс [11,12]	0.47 - 1.22	0.34-0.43	10.57-10.90	35.60 - 36.00	85.48 - 88.59	3.59-3.82	1.11- 1.71	1.52-5.54	0.75-7.47	-	-	-

Угольный шлам (жидкий)[7,13]	75.92-78.97	45.38 - 55.60	45.48 - 68.74	8.49 - 9.53	24.48 - 59.30	3.15 - 5.47	2.36 -4.36	0.94 - 5.06	5.82 - 23.68	-	-	-
Бурый уголь[12–15]	12.15-15.76	2.29 - 22.40	39.1 - 44.52	17.33-29.34	41.40-71.09	3.00 - 5.00	0.60 -1.72	0.96 - 3.25	18.40 - 33.02	-	-	-
Тощий уголь[13,14]	0.54-0.71	8.87-25.84	16.03-19.51	31.39	86.67-90.98	4.72-5.16	1.41 - 1.64	0.49 - 2.26	2.40-4.28	-	-	-
Коксующийся уголь [13,14]	1.06 - 1.26	6.67-10.13	24.44-36.17	30.80	85.35-86.27	4.98 - 5.99	1.48 - 2.04	0.57 - 0.73	4.96 - 7.62	-	-	-
Полукокс [16]	1.80	15.49	9.71	30.82	73.77	2.51	2.89	0.41	-	-	-	-
Угольный шлам [16]	2.59	36.44	21.33	16.26	54.94	3.07	1.91	0.93	-	-	-	-
Длиннопламенный уголь[14]	8.67	10.87	39.25	-	76.22	4.81	0.95	0.26	17.16	-	-	-
Каменный уголь (без уточнения марки) [7,17–20]	5.93-14.34	3.45-28.53	24.90 - 34.94	20.14-27.44	52.92-75.57	3.27-4.29	0.46 - 1.52	0.41 – 1.03	6.62 – 18.17	-	-	-
Антрацит [17,20,21]	0.39-4.42	8.63-19.13	2.95-10.74	24.24-32.67	67.78-84.98	0.44-4.04	0.63- 1.38	0.64-1.07	6.30-8.53	-	-	-
Несгоревший кокс[22]	0.52	17.91	2.44	26.35	80.10	0.26	0.3	-	0.56	-	-	-
Жидкий продукт пиролиза угля[23]	14.64	5.58	66.76	27.46	56.46	6.01	1.12	1.94	14.25	-	-	-
Угольный шлам (влажный)[24]	78.97	45.38	45.48	8.58	24.48	3.15	2.36	0.94	23.68	-	-	-
Бородинский бурый уголь	32.6	9.2	47.3	24.19	73.5	5.1	1.0	0.3	20.1	-	-	-
Балахтинский бурый уголь	20.8	6.2	44.6	29.33	74.1	5.0	0.9	0.3	19.7	-	-	-

Каа-хемский каменный уголь	3.3	6.8	47.5	33.94	82.0	5.8	1.5	0.3	10.4	-	-	-
Чаданский каменный уголь	3.0	8.0	37.5	35.79	85.7	5.6	1.3	0.3	7.1	-	-	-
Изыхский каменный уголь	20.0	15.9	39.2	31.85	78.0	5.0	2.2	0.8	14.0	-	-	-
Майрыхский каменный уголь	14.0	10.0	42.5	33.02	81.9	5.1	3.6	0.5	8.9	-	-	-
Аршановский каменный уголь	4.75	7.3	41.7	32.96	80.6	4.8	1.8	0.5	12.3	-	-	-
Черногорский каменный уголь	13.0	17.8	44.0	31.00	77.5	5.2	2.1	0.6	14.6	-	-	-
Полукокс из каа-хемского угля	0.7	16.2	11.5	33.52	93.3	1.6	1.2	0.3	3.6	-	-	-
Полукокс из чаданского угля	0.4	12.7	3.3	34.02	97.5	0.8	0.9	0.3	0.5	-	-	-
Полукокс из балахтинского угля	2.0	9.8	4.7	33.22	91.8	1.8	1.1	0.3	5.0	-	-	-
Полукокс из березовского угля	5.0	10.0	8.0	32.68	93.1	2.5	1.1	0.3	3.0	-	-	-
Полукокс из бородинского угля	0.4	8.6	8.3	33.62	93.6	2.5	2.4	0.2	1.3	-	-	-
Полукокс из черногорского	1.3	11.9	3.4	34.79	94.9	1.6	2.1	0.4	1.0	-	-	-

угля												

Твердые добавки из числа растительных, промышленных и бытовых отходов												
Опилки [15, 23]	6.0-15.62	0.21 - 1.6	72.35-83.4	17.39 - 19.05	45.96-52.5	4.54-6.00	0.08- 0.22	Следы-0.64	32.82-43.30	0.23-0.19 (22–153 °C)	1998.7-2947.3 (22-153 °C)	0.0009-0.0006 (22-153 °C)
Хвоя сосны	9.72	1.65	75.68	20.35	48.21	6.57	0.44	0.02	42.52	0.15-1.18	1618-2409	0.0008-0.0007
Листья березы	6.95	6.25	76.85	17.05	48.91	5.92	0.86	0.09	41.03	0.22-0.23	1856-2651	–
Солома [15, 23, 25]	7.0-12.20	2.8-7.42	64.75-78.5	15.34-17.7	38.38-50.20	4.31-6.36	0.40- 1.09	следы	37.00-43.10	0.15-0.17	1546.5-2103.33	0.0013-0.0012
Кора сосны	10.88	2.64	78.82	18.12	47.2	5.43	0.33	0.02	49.5	0.12-0.14	1774-2173	0.001-0.0007
Щепа	7.8	1.9	81.5	18.9	50.32	6.05	0.24	следы	40.70	0.18-0.15 (26-49 °C)	2457.55-2121.2 (26-49 °C)	0.0007 (26-49 °C)
Отруби, лузга	11.5	5.9	81	16.6	48.44	6.92	3.05	следы	41.59	0.13-0.18 (26-152 °C)	1722.35-3263.57 (26-152 °C)	0.0007-0.0005 (26-152 °C)
Скорлупа кедрового ореха	13.0	1.0	69.7	21.0	51.81	6.39	0.24	следы	41.56	0.19-0.22 (24–152 °C)	1908.9-2574 (24-152 °C)	0.0009-0.0008 (24-152 °C)
Скорлупа подсолнечника [26, 27]	10.10	1.95-4.2	77.72	17.37	50.26	5.98	1.28	0.25	42.23	–	1500	–
Пивная дробина, пивные дрожжи [28, 29]	3.97	3.22	83.3	21.6	47.2	7.2	3.6	1.1	37.6	0.35-0.57 [35]	2500-3500 [35]	0.001-0.0012[35]
Упаковочный материал (картон,	3.8-5.7	9.6-29.2	79.4-83.1	13.9-14.95	34.9-43	4.4-5.4	0.14-0.18	0.015-0.09	31.3-56.08	0.14-0.23	1090-1500	0.0007-0.0018

бумага) [30–34]												
Твердый продукт пиролиза сосновых опилок [35–39]	<1- 7.2	3.6	7.2	27.2 - 32.0	82.14 - 90.18	0.74 - 3.17	0.11-0.3	0 .06 - 0.6	8.91 - 14.2	-	-	-
Хлорелла обыкновенная [36]	<1	12.3	78.9	-	48.6	7.3	9.0	0.9	34.2	-	-	-
Древесный уголь [40]	7.2-7.53	8.7-14.1	20.4-22.1	28.5-29.1	70.3-74.2	2.1-2.36	0.51-0.6	-	-	-	-	-
Жидкий продукт пиролиза сосны [38]	23.6	-	-	18.5	42.50	7.10	0.06	следы	50.34	-	-	-
Осадок сточных вод [15, 18, 41, 42]	1.60 - 8.2	7.08 - 36.40	51.4-70.97	12.57-13.8	28.47-52.5	4.81 - 7.7	4.84 - 7.3	0.49 - 2.9	31.1-60.96	-	-	-
Артишок [41]	5.7	7.5	74.5	14.9	45.4	6.6	2.6	0.2	45.2	-	-	-
Рисовая шелуха [19, 20, 43]	5.62-6.79	14.77-17.82	62.61-65.65	16.02	38.23-49.40	4.88-6.20	0.40-1.02	0.16-0.30	33.29-34.15	-	-	-
Арахисовая скорлупа[43]	7.88	1.60	68.10	21.42	54.90	6.10	1.37	0.10	7.47	-	-	-
Стебель бамбука [23]	15.62	0.92	75.24	17.41	44.22	5.15	0.49	0.22	39.40	-	-	-
Осадок сточных вод (влажный) [24]	73.89	52.04	46.86	5.95	19.87	2.10	1.95	0.91	23.13	-	-	-
Кукурузный отход [42]	2.16	2.68	77.64	-	40.67	5.51	0.79	0.09	52.94	-	-	-
Ивовая щепа [15]	6.9	1.4	0.6	17.63	49.6	6.0	0.3	0.1	44.0	-	-	-

Лесная трава [44]	10.67	5.34	65.65	17.00	50.73	7.08	41.95	0.14	0.10	-	-	-
Кофейный молотый остаток [45]	2.66	1.25	80.44	-	55.98	6.73	31.07	2.0	0.31	-	-	-
Пальмовый жмых [45]	2.88	5.30	75.83		49.04	5.93	34.10	2.46	0.29	-	-	-
Остатки сточных вод г. Красноярск	6.7	62.3	80.3	21.45	54.3	5.8	3.4	0.7	35.8	-	-	-
Остатки сточных вод г. Абакан	35.2	56.8	83.7	22.71	58.8	6.1	6.2	1.6	27.3	-	-	-
Сосновые опилки	2.8	-	80.2	25.77	55.6	5.5	0.3	-	38.6	-	-	-
Гидролизный лигнин	47.5	6.2	65.9	24.45	63.2	5.4	-	0.5	30.9	-	-	-
Подсосенский торф	72.2	13.3	67.4	22.50	58.3	4.9	2.1	1.1	33.6	-	-	-
Картон	2.5	10.5	85.1	17.68	46.4	5.7	-	0.2	47.7	-	-	-
Пивной солод	59.4	5.2	78.7	21.66	52.7	6.6	3.2	0.3	37.2	-	-	-
Сухая хвоя кедра	14.2	3.4	79.5	27.39	56.3	6.7	0.3	0.1	36.6	-	-	-
Сосновые шишки	10.5	1.0	77.1	20.74	52.4	5.7	0.2	-	41.7	-	-	-
Лиственница опилки	9.9	0.2	80.0	19.57	50.4	5.86	0.3	-	43.4	-	-	-
Лиственница кора	1.8	3.1	74.5	20.53	52.9	5.58	-	-	41.5	-	-	-
Пихта опилки	6.5	0.4	77.7	20.53	53.7	5.63	0.3	-	40.4	-	-	-
Пихта кора	4.6	5.5	80.2	22.83	56.4	6.25	0.6	-	36.8	-	-	-

Береза опилки	9.0	0.3	81.1	19.65	51.2	5.78	-	-	43.0	-	-	-
Береза кора	1.6	3.3	79.2	25.06	59.7	6.77	0.8	-	32.7	-	-	-
Кедр опилки	6.4	0.2	80.2	19.19	51.3	5.43	0.3	-	43.0	-	-	-
Кедр кора	1.7	3.0	72.6	20.61	54.2	5.5	-	0.06	40.2	-	-	-
Осина опилки	2.8	0.2	83.0	19.15	50.0	5.8	0.4	-	43.9	-	-	-
Осина кора	6.3	8.3	75.7	23.21	58.1	5.8	0.7	-	35.4	-	-	-
Ель опилки	16.7	0.2	80.5	19.31	50.2	5.8	0.5	0.06	43.4	-	-	-
Ель кора	1.3	22.8	77.1	20.65	53.8	5.7	-	0.07	40.5	-	-	-

Таблица В2. Результаты анализа характеристик жидких горючих нефтепродуктов

Образец	ρ при 293 К, кг/м^3	W^a, %	A^d, %	T_f, К	T_{ign}, К	$Q^a_{s,V}$, МДж/кг	$T_{кипения}$, К	Теплота парообразования, МДж/кг
Моторное масло отработанное Total 9000	871	0.28	0.78	405	491	44	Полусинтетика 650–680 Синтетика 860–880	0.167–0.209
Моторное масло свежее Total 9000	850	–	0.84	478	505	45.64		
Турбинное масло отработанное (марка Тп-22с по ТУ 38.101.821-2001) с механическими примесями и водой	869	–	0.03	490	518	45.1	588	
Турбинное масло отработанное (марка Тп-22с по ТУ 38.101.821-2001)	868	–	0.03	448	466	44.99		
Турбинное масло ГМБ	874	–	0.019	478	513	45.47		
Турбинное масло П1В	870	–	0.016	477	506	45.68		
Турбинное масло свежее	868	–	0	478	503	46.06		
Трансформаторное масло отработанное (марка ТСП по ГОСТ-76)	877	–	–	421	442	44.98	593–603	
Трансформаторное масло (марка ТСП по ГОСТ-76) с мазутом (марка М100 по ГОСТ 105.85-99) и другими примесями	861	<0.03	0,01	356	381	43.08		
Мазут	1000	6.12	4.06	438	513	39.4	690–710	0.17–0.21
Касторовое масло	961	0.08	0.013	558	586	36.73	570–590	0.16–0.22
Тяжелая нефть, Герасимовское месторождение Томской области	869	0.05	–	327	351	43.24	560–580	–
Компрессорное масло	887	–	0.023	458	502	45.2	–	–
Масло отработанное Белаз (разрез «Кедровский»)	880	1.48	0.89	413	459	43.67	–	–
Масло отработанное (Разрез «Черниговец»)	890	1.24	1.04	413	493	43.58	–	–

Таблица В3. Кинетические характеристики компонентов и топлив

Компонент	Диапазон температур, °С	Предэкспонент k, 1/с	Энергия активации E, кДж/моль	Температура зажигания, °С
Фильтр-кек «Д»	210–640	$4.79 \cdot 10^2$	53.24	540
	640–910	$5.05 \cdot 10^2$	70.87	
Фильтр-кек «Г»	202–647	$7.85 \cdot 10^2$	56.91	625
	648–883	$3.53 \cdot 10^2$	67.29	
Фильтр-кек «К»	200–647	$1.03 \cdot 10^3$	59.66	587
	647–897	$8.09 \cdot 10^3$	94.15	
Фильтр-кек «СС»	250–627	$1.02 \cdot 10^4$	73.78	587
	627–847	$1.45 \cdot 10^5$	114.50	
Фильтр-кек «Т»	300–615	$3.6 \cdot 10^4$	82.82	567
	615–947	$2.69 \cdot 10^2$	67.04	
Каменный уголь [1]	100–900	$1.63 \cdot 10^3$	131.8	456.7
Каменный уголь (90%) + металлические добавки (10%) [1]		$3.78 \cdot 10^4$–$7.86 \cdot 10^4$	81.2–105.7	428.6–446.4
Полукокс [2]	1000			511.6
Нефтешлам [2]				257.0
Полукокс (80-20%) + нефтешлам (20-80%) [2]				481.7–266.3
Каменный уголь [3]	25–900	-	87.95	490
Бурый уголь [3]		-	51.90	345
Каменный уголь (90-30%) + пеллеты из биомассы (10-70%) [3]		-	76.36	470
Бурый уголь (90-30%) + пеллеты из биомассы (10-70%) [3]		-	47.07	335
Угольная порода [4]	1000			455.9
Арахисовая скорлупа [4]				282.3
Угольная порода (70%) + арахисовая скорлупа (30%) [4]				283.0
Каменный уголь [5]	100–900	-	205.4	352.1
Осадок сточных вод [5]		-	168.4	228.5

Твердый продукт пиролиза осадка сточных вод [5]		-	181.9	232.9
Каменный уголь (50%) + осадок сточных вод (50%) [5]		-	180.3	208.9
Каменный уголь (50%) + твердый продукт пиролиза осадка сточных вод (50%) [5]		-	192.4	275.1
Каменный уголь (50%) + деионизированная вода (50%) [7]				681.48
Каменный уголь (50%) + техническая вода (50%) [7]				686.35
Каменный уголь (35%) + угольный шлам (15%) + деионизировання вода (50%) [7]				676.65
Угольный шлам [9]				430.8
Осадок сточных вод [9]				250.2
Угольный шлам (90-30%) + Осадок сточных вод (10-70%) [9]				424.2–318.5
Бурый уголь [10]	815–966	$8.47 \cdot 10^4$	74.82	
Бурый уголь + рисовая шелуха (суспензия) [10]	856–931	$2.46 \cdot 10^4$	58.84	

В Табл. В3 представлены результаты определения основных кинетических параметров термического разложения и окисления типичных отходов углепереработки. Теплофизические характеристики (коэффициент теплопроводности, удельная теплоемкость, Дж/(кг·К), коэффициент температуропроводности, см^2/с) определялись для отходов обогащения (фильтр-кеков, шлама, промпродукта), торфа, а также твердых растительных компонентов. Для измерений использовалась система DLA-1200 TA Instruments, принцип действия которой основан на оценке скорости распространения импульса тепла в толще образца. Систематическая погрешность определения коэффициентов температуропроводности составляет ±2,3%, теплоемкости – ±4%, теплопроводности – ±5%.

Располагаемая комплектация системы DLA-1200 TA Instruments позволяла определять теплофизические характеристики только твердых материалов (Рис. В1). По этой причине все компоненты предварительно высушивались. Затем подготавливались навески порошков массой около 0,2 г и при помощи гидравлического пресса навески спрессовывались в образцы цилиндрической формы. Размеры образцов соответствовали требованиям, предъявляемым используемой измерительной системой (диаметр 12,5 мм, высота не более 3 мм). Для максимизации поглощения энергии вспышек лазера на поверхность образцов аэрозольным распылением наносился слой графита.

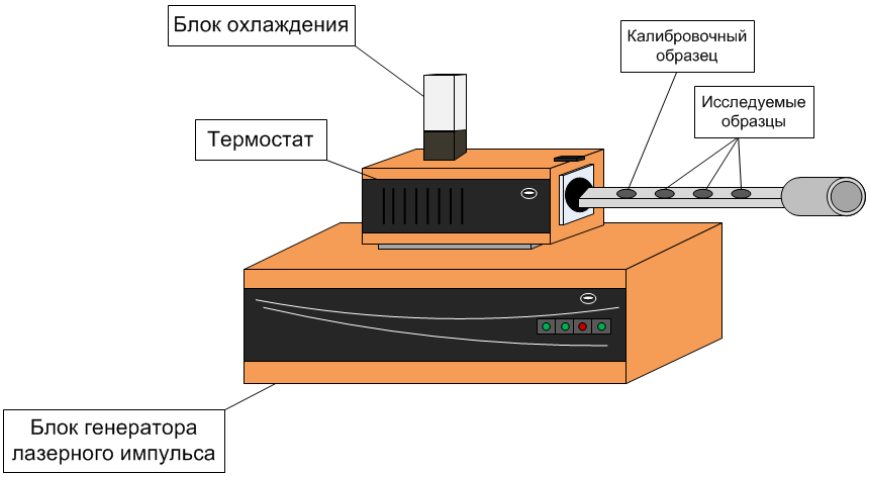


Рисунок В1 – Схема установки для определения теплофизических характеристик компонентов

Система DLA-1200 TA Instruments состоит из двух основных блоков: термостата и блока генерации лазерного импульса. Образцы при помощи держателя и специализированной тележки помещались в термостат. Рабочий объем термостата заполнялся азотом. В качестве калибровочного образца использовался Pyrex7740 с плотностью 2,22 г/см^3, толщиной 1,99 мм и диаметром 12,69 мм. Единовременно в

термостат загружались калибровочный образец и 3 тестируемых образца. Для каждого образца проводилось 5 измерений, результаты которых усреднялись.

Определение термокинетических параметров (предэкспоненциальный множитель, энергия активации) разложения органической массы фильтр-кеков осуществлялось поэтапно: 1 этап – проведение термогравиметрии навески фильтр-кека в инертной атмосфере; 2 расчет термокинетических параметров по данным термогравиметрии.

Термический анализ проводился на синхронном термоанализаторе STA 449F3 фирмы NETZSCH в следующих условиях: образец помещался в корундовый тигель, масса образца 25 мг, нагрев до 1000 °С со скоростью 10 °С/мин в среде аргона с расходом газа 100 мл/мин, и смеси аргона (10 мл в мин) с воздухом (50 мл в мин).

Кинетические параметры разложения (энергия активации и предэкспоненциальный множитель) вычислялись по следующей методике. Предполагалось, что исходное вещество *A* последовательно разлагается, образуя промежуточный твердый продукт *B* и летучий продукт P_1. Затем продукт *B* переходит в следующий промежуточный продукт *C* и выделяет летучий продукт P_2 и т.д.:

$$A \xrightarrow{k_1} B + P_1 \uparrow \xrightarrow{k_2} C + P_2 \uparrow \xrightarrow{k_3} \ldots$$

Скорость выделения летучих веществ на каждой стадии, как правило, можно описать уравнением реакции первого порядка с последующим определением констант скорости соответствующих стадий. Процесс термической деструкции в целом будет отвечать схеме последовательных реакций первого порядка. За скоростью процесса следят по общему накоплению летучих веществ, т.е. измеряют их массу за определенный промежуток времени, а число стадий деструкции равно двум. Масса выделившихся летучих веществ равна потере массы твердого образца.

Характеристики термического разложения, такие как скорость потери массы образца в процессе горения, температуры зажигания и прогорания, а также тепловой поток в процессе термического разложения, регистрировались при помощи термогравиметрического анализатора. Схема экспериментальной установки представлена на Рис. В2. Для изучения стадий и характеристик горения компонентов и приготовленных топливных суспензий использовался TGA анализатор METTLER-TOLEDO TGA/DSC 3+. Образец топлива массой 40 мг помещался в тигель и нагревался от 25 до 1100 °С со скоростью нагрева 20 °С/мин. В качестве рабочей среды использовался воздух при постоянном расходе 60 мл/мин. Систематическая погрешность измерения температуры составляла ±0,5 °С, систематическая погрешность измерения массы равнялась 5 мкг. Анализатор подключался к персональному компьютеру и управлялся при помощи ПО

STAR^{e}. В ходе эксперимента регистрировались потеря массы образца при термической конверсии и величина теплового потока.

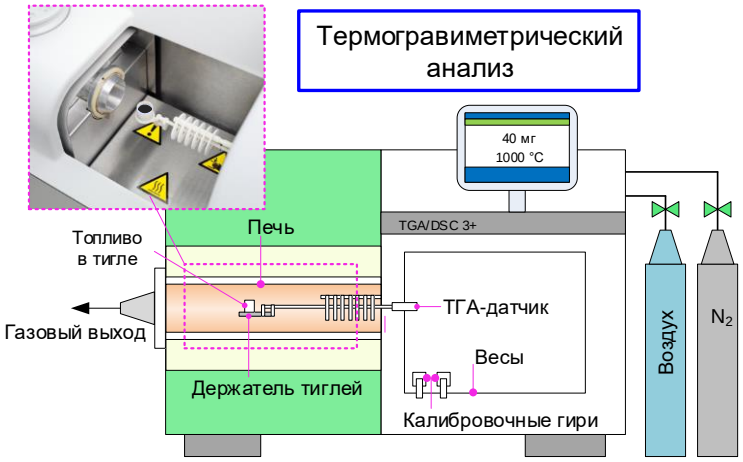


Рисунок В2 – Схема установки для определения теплофизических характеристик компонентов

В Табл. В4 представлены характеристики термического разложения исследуемых компонентов композиционных топлив. Установлено, что минимальными температурами зажигания обладают различные образцы биомассы. Их температуры зажигания оказались ниже на 50–100 °C по сравнению с угольными топливами. Причиной этого служит высокая доля летучих в составе биомассы, интенсивный выход которых способствует интенсификации зажигания топлива. Также высокая доля летучих в составе биомассы обуславливает максимальные, среди исследуемых образцов, скорости выгорания. Так, при сжигании осиновых опилок максимальная скорость выгорания составила 44,9 %/мин, что в два и более раза превышает аналогичные значения для угольных топлив. Помимо этого, в составе биомассы находится значительное содержание щелочных и щелочноземельных металлов, что приводит к более низким температурам полного выгорания, поскольку они оказывают каталитический эффект на деструкцию топливных смесей, способствуя ускоренному выгоранию топливных частиц [46].

На основе анализа свойств, характеристик, объемов формирования и доступности был выбран ряд перспективных компонентов для подготовки суспензионных топлив. Так, уголь марки Д и соответствующий ему флотационный отход являются наиболее массовыми компонентами угольной отрасли. Отработанное турбинное масло является традиционным отходом энергетического сектора. Опилки являются традиционным отходом лесозаготовительной и мебельной индустрии, а рисовая шелуха выбрана в качестве одного из традиционных отходов сельского хозяйства.

Таблица В4. Характеристики процесса термического разложения топлив

Топливо	$T_{заж}$, °С	$T_{выг}$, °С	ДТГ$_{макс}$, %/мин	$T_{ДТГ}$, °С
Бородинский бурый уголь	355	535	26.0	408
Балахтинский бурый уголь	358	676	22.2	415
Каа-хемский каменный уголь	444	723	19.3	473
Чаданский каменный уголь	435	704	15.6	552
Изыхский каменный уголь	455	542	21.3	520
Майрыхский каменный уголь	366	549	12.7	422
Аршановский каменный уголь	433	559	13.7	511
Черногорский каменный уголь	422	541	20.2	492
Полукокс из каа-хемского угля	524	724	10.0	612
Полукокс из чаданского угля	526	727	11.1	591
Полукокс из балахтинского угля	507	698	21.1	553
Полукокс из березовского угля	481	688	15.8	563
Полукокс из бородинского угля	434	673	21.6	476
Полукокс из черногорского угля	435	636	10.4	498
Остатки сточных вод г. Красноярск	263	601	4.5	328
Остатки сточных вод г. Абакан	256	611	3.8	327
Сосновые опилки	308	490	38.9	343
Гидролизный лигнин	299	477	18.6	327
Подсосенский торф	269	685	7.9	451
Картон	300	691	39.1	339
Пивной солод	232	567	8.7	282
Сухая хвоя кедра	273	650	15.4	450
Сосновые шишки	306	489	25.8	338
Лиственница опилки	293	479	24.3	344
Лиственница кора	279	528	13.7	326
Пихта опилки	281	441	35.0	424
Пихта кора	262	459	23.4	448
Береза опилки	299	464	31.3	342
Береза кора	289	505	24.7	442
Кедр опилки	310	469	42.9	346
Кедр кора	289	450	29.3	436
Осина опилки	302	459	44.9	344
Осина кора	265	658	11.0	407
Ель опилки	310	478	37.5	350
Ель кора	292	664	22.2	443

$T_{заж}$ – температура зажигания коксового остатка;

$T_{выг}$ – температура выгорания;

$T_{ДТГ}$ – температура, соответствующая $ДТГ_{макс}$;

ДСК$_{макс}$ – максимальная интенсивность теплового потока.

Ниже приведены результаты анализа интегральных показателей эффективности топливных суспензий, выполненного на основе результатов экспериментальных

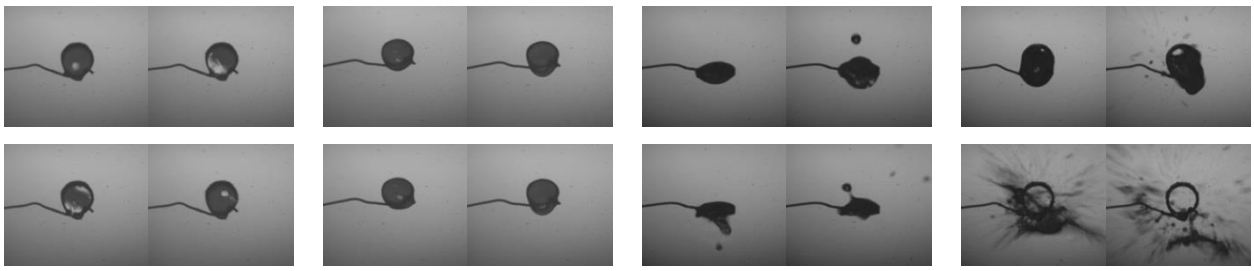
исследований. Оценка проводилась с использованием подходов многофакторного анализа [47], в основе которого лежит приведение к безразмерному виду величин, характеризующих разные аспекты применения топлив и имеющих различные единицы измерения. Применялся метод взвешенных сумм (Weight Sum Method) [48], предполагающий сложение безразмерных величин с разными весовыми коэффициентами. Значения рассчитанных показателей не превышают единицы. Чем выше значение, тем более эффективно топливо. Рис. В3 иллюстрирует факторы, учитываемые в анализе.

Рисунок В3 – Факторы, влияющие на эффективность использования топлива

Фрагментация капель топливных композиций

В Табл. В5 приведены количественные результаты экспериментального исследования дробления капель суспензионных топлив разного состава, а также результаты вычисления относительных показателей дробления. В качестве параметров, характеризующих эффективность фрагментации, рассмотрено время дробления и отношение площадей поверхности капель после разрушения к площади поверхности исходной капли (S_1/S_0) [49]. Рис. В4 иллюстрирует типичные кадры видеограмм, получаемых при экспериментальном исследовании дробления капель многокомпонентных смесей.

Среди всех рассмотренных условий (схема и механизм нагрева, температура и др.) и вариаций компонентного состава топлива наименьшим временем дробления (4,67 с) характеризовалась суспензия «50% уголь марки Д, 45% вода. 5% опилки» при нагреве в муфельной печи в условиях температуры 700 °С. Наибольшее время дробления (45 с) имел состав «50% уголь марки Д, 45% вода, 5% ореховая шелуха» при нагреве на подложке с температурой 300 °С.



Монотонное испарение Кипение Паффинг Микро-взрыв

Рисунок В4 – Типичные кадры видеограмм, иллюстрирующие четыре механизма протекания физико-химических процессов при нагревании капель многокомпонентных составов

Таблица В5. Абсолютные и относительные характеристики эффективности фрагментации капель суспензионных топлив

Схема нагрева	Состав	Время дробления, с	S1/S0	Относитель-ный показатель по времени дробления	Относитель-ный показатель по S1/S0	Общий показа-тель
В потоке газов	50 масс.% кек Д, 50 масс.% вода	19.000	1.000	0.246	0.025	0.135
		15.667	1.000	0.298	0.025	0.161
		14.000	1.000	0.333	0.025	0.179
	50 масс.% кек Д, 45 масс.% вода, 5 масс.% турбинно е масло	21.333	1.000	0.219	0.025	0.122
		15.667	1.000	0.298	0.025	0.161
		15.000	1.000	0.311	0.025	0.168
	50 масс.% уголь Д, 50 масс.% вода	16.000	5.568	0.292	0.139	0.215
		15.600	6.374	0.299	0.159	0.229
		11.800	5.980	0.395	0.149	0.272
		16.600	3.428	0.281	0.086	0.183
		16.400	5.045	0.285	0.126	0.205
	50 масс.% уголь Д, 45 масс.% вода, 5 масс.% турбинно е масло	19.600	8.568	0.238	0.214	0.226
		16.200	6.272	0.288	0.156	0.222
		13.000	6.299	0.359	0.157	0.258
		18.800	7.131	0.248	0.178	0.213
		17.000	5.736	0.275	0.143	0.209
	40 масс.% кек Д, 60 масс.% вода	17.800	13.703	0.262	0.342	0.302
		13.800	15.231	0.338	0.380	0.359
		12.000	16.218	0.389	0.405	0.397
	60 масс.% кек Д, 40 масс.% вода	19.400	17.629	0.241	0.440	0.340
		16.200	16.964	0.288	0.423	0.356
		14.600	17.754	0.320	0.443	0.381
	50 масс.%	18.000	16.140	0.259	0.403	0.331

	уголь Д, 40 масс.% вода, 10 масс.% турбинное масло	14.667	15.485	0.318	0.386	0.352
		10.250	16.079	0.455	0.401	0.428
	38 масс.% уголь Д, 60 масс.% вода, 2 масс.% древесные опилки	21.333	16.591	0.219	0.414	0.316
		15.000	17.805	0.311	0.444	0.378
		12.000	20.069	0.389	0.501	0.445
	36 масс.% уголь Д, 60 масс.% вода, 4 масс.% древесные опилки	22.667	18.286	0.206	0.456	0.331
		15.667	17.167	0.298	0.428	0.363
		12.667	16.781	0.368	0.419	0.394
	50 масс.% бурый уголь, 50 масс.% вода	17.000	20.536	0.275	0.512	0.393
		13.667	21.043	0.341	0.525	0.433
		12.000	21.414	0.389	0.534	0.462
	50 масс.% бурый уголь, 50 масс.% вода	15.333	13.825	0.304	0.345	0.325
		13.667	16.747	0.341	0.418	0.380
		12.000	16.085	0.389	0.401	0.395
	50 масс.% бурый уголь, 50 масс.% вода	18.000	13.751	0.259	0.343	0.301
		14.333	14.898	0.326	0.372	0.349
		11.000	16.077	0.424	0.401	0.413
	50 масс.% уголь Д, 49 масс.% вода, 1 масс.% неонол	15.000	12.535	0.311	0.313	0.312
		12.250	13.444	0.381	0.335	0.358
		9.000	14.948	0.519	0.373	0.446
	50 масс.% уголь Д, 49,75 масс.% вода, 0.25 масс.% неонол	15.333	11.463	0.304	0.286	0.295
		11.500	12.866	0.406	0.321	0.363
		9.333	13.950	0.500	0.348	0.424
	50 масс.% уголь Д, 49.75 масс.% вода, 0.25 масс.% TWEEN 80	14.333	9.369	0.326	0.234	0.280
		11.333	11.624	0.412	0.290	0.351
		10.667	14.308	0.438	0.357	0.397
	50 масс.% уголь Д, 48,4 масс.% вода, 1,6 масс.%	18.000	14.093	0.259	0.352	0.305
		13.667	16.056	0.341	0.401	0.371
		11.000	17.067	0.424	0.426	0.425

	крахмал					
	50 масс.% кек Д, 45 масс.% вода, 5 масс.% опилки	22.500	27.804	0.207	0.694	0.451
		11.750	33.169	0.397	0.828	0.612
		10.750	37.880	0.434	0.945	0.690
	50 масс.% кек Д, 45 масс.% вода, 5 масс.% ореховая шелуха	20.000	27.355	0.233	0.683	0.458
		15.500	37.378	0.301	0.933	0.617
		8.750	40.078	0.533	1.000	0.767
В муфельной печи	50 масс.% уголь Д, 50 масс.% вода	22.333	8.604	0.209	0.215	0.212
		14.333	8.840	0.326	0.221	0.273
		10.667	9.106	0.438	0.227	0.332
		7.333	9.165	0.636	0.229	0.433
		6.000	9.301	0.778	0.232	0.505
	50 масс.% КЕК Д, 50 масс.% вода	25.000	1.000	0.187	0.025	0.106
		15.333	1.000	0.304	0.025	0.165
		10.667	1.000	0.438	0.025	0.231
		6.000	1.000	0.778	0.025	0.401
		6.333	1.000	0.737	0.025	0.381
	50 масс.% уголь Д, 45 масс.% вода, 5 масс.% турбинное масло	16.667	11.391	0.280	0.284	0.282
		11.750	8.328	0.397	0.208	0.302
		12.000	8.178	0.389	0.204	0.296
	50 масс.% уголь Д, 45 масс.% вода, 5 масс.% опилки	11.667	9.548	0.400	0.238	0.319
		9.000	11.084	0.519	0.277	0.398
		4.667	13.571	1.000	0.339	0.669
	50 масс.% уголь Д, 45 масс.% вода, 5 масс.% шелуха	26.667	9.320	0.175	0.233	0.204
		20.333	13.388	0.230	0.334	0.282
		10.667	18.140	0.438	0.453	0.445
	50 масс.% кек Д, 45 масс.% вода, 5 масс.% турбинное масло	7.500	1.000	0.622	0.025	0.324
	50 масс.% КЕК Д, 45 масс.% вода, 5 масс.% опилки	12.500	1.000	0.373	0.025	0.199

	50 масс.% КЕК Д, 45 масс.% вода, 5 масс.% шелуха	15.500	1.000	0.301	0.025	0.163
	49.9 масс.% уголь Д, 0.1 масс.% полимер гуар и 50 масс.% вода	25.333	11.885	0.184	0.297	0.240
		13.667	8.746	0.341	0.218	0.280
		8.667	17.751	0.538	0.443	0.491
		7.000	19.615	0.667	0.489	0.578
	49.9 масс.% уголь Д, 0.1 масс.% полимер ксантан и 50 масс.% вода	21.750	9.031	0.215	0.225	0.220
		10.333	6.120	0.452	0.153	0.302
		8.667	24.664	0.538	0.615	0.577
		7.000	31.250	0.667	0.780	0.723
На разогретой подложке	50 масс.% уголь Д, 45 масс.% вода, 5 масс.% турбинное масло	44.000	1.000	0.106	0.025	0.066
		23.000	1.000	0.203	0.025	0.114
		17.000	1.000	0.275	0.025	0.150
		13.500	1.000	0.346	0.025	0.185
	50 масс.% уголь Д, 45 масс.% вода, 5 масс.% опилки	28.000	1.000	0.167	0.025	0.096
		24.000	1.000	0.194	0.025	0.110
	50 масс.% уголь Д, 45 масс.% вода, 5 масс.% шелуха	45.000	1.000	0.104	0.025	0.064
		30.000	1.000	0.156	0.025	0.090
		26.000	1.000	0.179	0.025	0.102

Наибольшее соотношение S_1/S_0=40,08 достигнуто при нагреве состава «50% кек Д, 45% вода. 5% ореховая шелуха» в потоке воздуха с температурой 550 °С и скоростью движения 2 м/с. Дробление капель топлив на основе фильтр-кеков не регистрировалось в случае нагрева в муфельной печи и на подложке вне зависимости от условий и компонентного состава смеси.

Интегральный показатель эффективности дробления рассчитывался как сумма двух безразмерных показателей (по минимизации времени задержки дробления и по максимизации соотношения S_1/S_0) с весовыми коэффициентами 0,5. При рассмотрении всех составов и условий эксперимента установлено. что наибольшей эффективностью дробления (0,766) характеризовался состав «50% кек угля марки Д, 45% вода, 5% ореховая

шелуха» при нагреве в потоке газов с температурой 550 °С и скоростью 2 м/с. Наименьшая эффективность дробления характерна для смеси «50% кек угля марки Д, 45% вода, 5% ореховая шелуха» при нагреве на подложке температурой 300 °С.

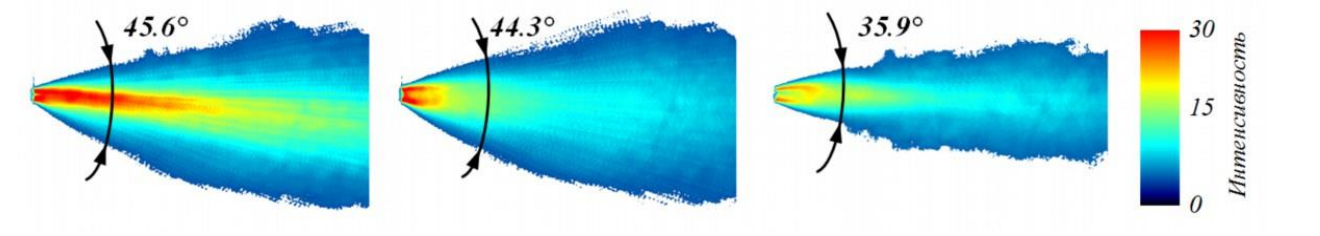
При радиационном нагреве в муфеле максимальной эффективностью дробления (0,723) обладал состав «49,9% уголь марки Д, 0,1% полимер ксантан. 50% вода» при 800 °С. При нагреве на подложке наиболее эффективное дробление (0,185) характерно суспензии «50% уголь Д, 45% вода. 5% турбинное масло» при 600 °С.

Распыление топливных композиций

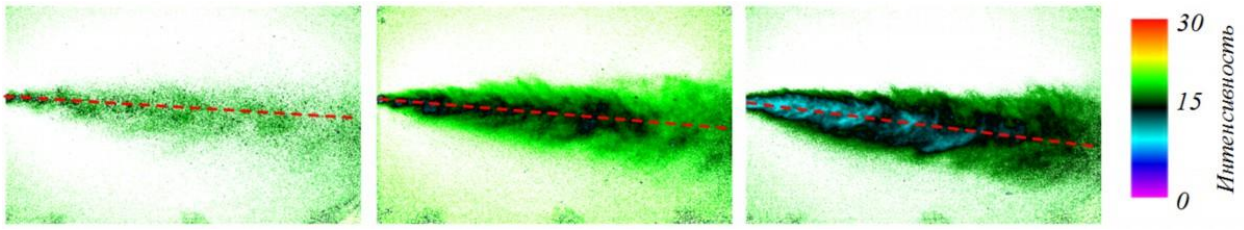
В Табл. В6 приведены результаты оценки эффективности распыления топливных композиций. Интегральный показатель, учитывающий минимизацию давления при распылении и максимизацию угла раскрытия факела форсунки, имеет наименьшее значение (0,468) для состава «40% фильтр-кек угля марки Д, 5% опилки, 55% вода». Наибольшее значение (0,688) характерно смеси «50% уголь марки Д (140 мкм). 50% вода». Типичные видеокадры экспериментов и результаты исследований распыления суспензионных топлив представлены на Рис. В5. Результаты вычисления интегрального показателя эффективности распыления суспензионных топлив представлены на Рис. В6.

Таблица В6. Абсолютные и относительные характеристики распыления суспензионных топлив

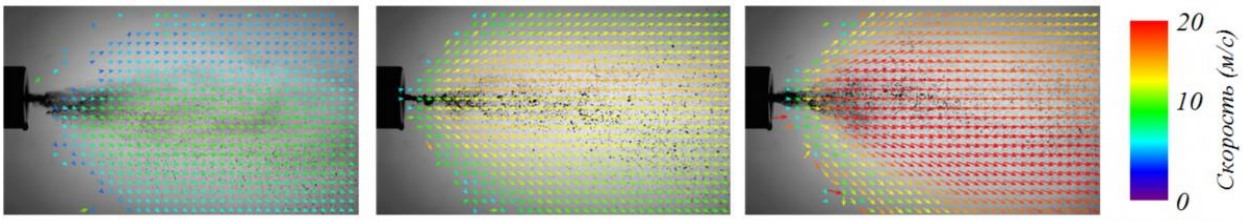
Состав	Оптимальные параметры распыла		Среднее значение произведения относительных критериев
	Давление	Угол поворота форсунки	
Вода	8	0.25	0.450090495
40% кек Д, 5% опилки, 55% вода	8	0.75	0.46841504
50% кек Д, 5% турбинное масло, 45% вода	4	0.25	0.6581077
40% кек Д, 60% вода	6	0.25	0.544961449
50% кек Д, 50% вода	6	0.25	0.605376318
60% кек Д, 40% вода	8	0.25	0.50801343
50% уголь Д (80 мкм), 50% вода	6	0.25	0.553046839
50% уголь Д (120 мкм), 50% вода	8	0.25	0.649076005
50% уголь Д (140 мкм), 50% вода	8	0.25	0.688958716



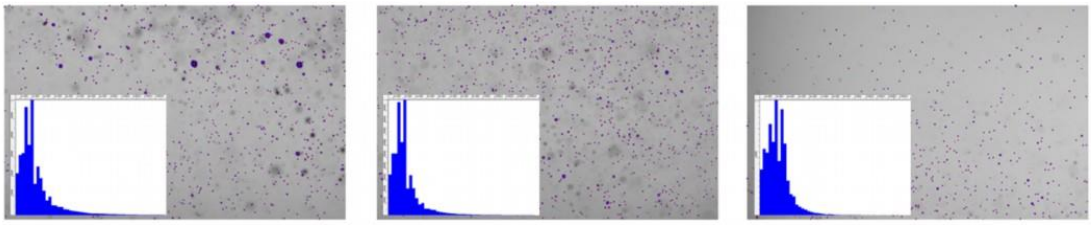
а)



б)



в)



г)

Рисунок В5 – Типичные видеокадры экспериментов и результаты исследований: (*а*) угол раскрытия факела; (*б*) траектории движения капель и форма факела; (*в*) скорости движения капель; (*г*) распределение капель по размерам

С использованием полученных экспериментальных данных рассчитывались критические (достаточные для дробления) значения числа Вебера и Рейнольдса для каждого из топлив. Затем выбирались смеси, имеющие минимальные значения безразмерных критериев. Все остальные топлива сопоставлялись с эталонными. Рассчитывались относительные показатели, характеризующие число Рейнольдса/Вебера суспензий относительно «эталонного» значения (т.е. минимального). По критерию минимизации числа Вебера наилучшим оказался состав «50% фильтр-кек угля марки Д, 50% вода», по критерию минимизации числа Рейнольдса – «50% фильтр-кек угля марки Д, 40% вода, 10% турбинное масло». Интегральный показатель, учитывающий минимизацию этих двух критериев подобия, рассчитывался как сумма двух относительных показателей по числу Вебера и Рейнольдса с весовыми коэффициентами 0,5. Наилучшее топливо по данному интегральному показателю имело состав «50% фильтр-кек угля марки Д, 40% вода, 10% турбинное масло».

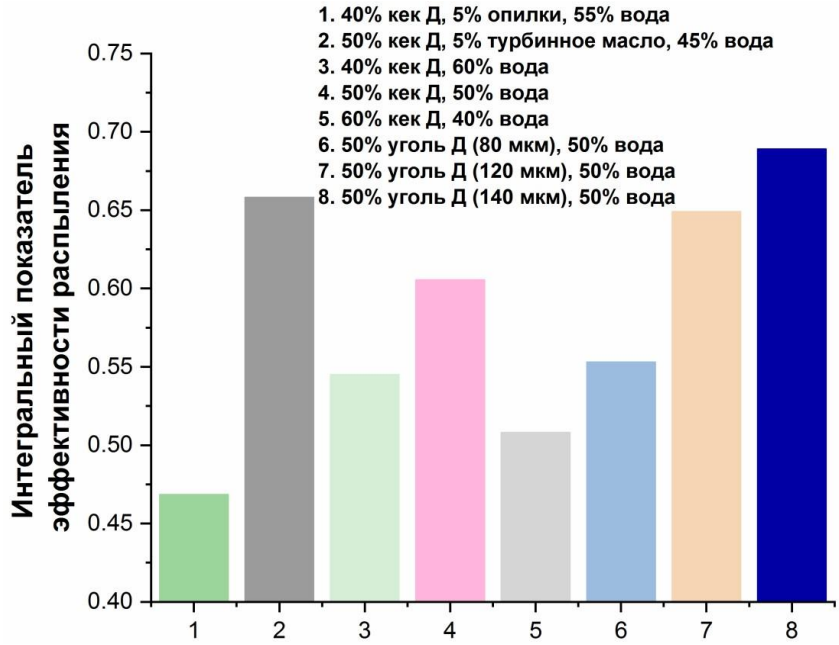


Рисунок В6 – Интегральный показатель эффективности распыления суспензий

Вязкость и стабильность топливных композиций

В Табл. В7 приведены количественные результаты экспериментальной оценки стабильности и вязкости различных топливных смесей. Показатель стабильности (m/m_0) показывает отношение массы жидкости, отделившейся в течение суток хранения топлива, к исходной массе топлива.

Наименьшей вязкостью (106,9 мПа·с) при скорости сдвига слоя 100 $с^{-1}$ характеризовался состав «40% фильтр-кек угля марки К, 60% вода». Наибольшая вязкость характерна топливу «45% фильтр-кек угля марки К. 47,5% вода. 5% опилки. 2,5% турбинное масло». Наиболее стабильными смесями стали смеси с добавкой турбинного масла и опилок. Смесь «50% уголь марки Д, 49% вода, 1% неонол» наименее стабильна. Интегральный показатель рассчитывался как сумма двух безразмерных составляющих (по минимальной вязкости и максимальной стабильности) с весовыми коэффициентами 0,5. Наиболее высокий показатель (0,87) имеет топливо «40% фильтр-кек угля марки К, 60% вода». наименьшее значение (0,440) у состава «50% уголь марки Д, 49% вода, 1% неонол».

Таблица В7. Абсолютные и относительные характеристики стабильности и вязкости суспензионных топлив

Состав	Вязкость при скорости сдвига100 мПа·с	m/m_0	Относительный показатель по вязкости	Относительный показатель по стабильности	Интегральный относительный показатель по вязкости и стабильности
50% фильтр-кек Д, 50% вода	157.067	0.988	0.681	0.988	0.834
50% фильтр-кек Т, 50% вода	337.776	0.843	0.316	0.843	0.580
50% фильтр-кек К, 50% вода	336.112	0.923	0.318	0.923	0.620
50% фильтр-кек СС, 50% вода	201.741	0.865	0.530	0.865	0.697
50% фильтр-кек Г, 50% вода	453.221	0.967	0.236	0.967	0.601
50% фильтр-кек Ж, 50% вода	631.657	0.938	0.169	0.938	0.554
40% фильтр-кек К, 60% вода	106.891	0.776	1.000	0.776	0.888
60% фильтр-кек К, 40% вода	1423.731	0.949	0.075	0.949	0.512
50% фильтр-кек Д, 45% вода, 5% турбинное масло	492.521	0.856	0.491	0.856	0.674
50% фильтр-кек Д, 40% вода, 10%турбинное масло	2030.171	0.863	0.391	0.863	0.627
50% фильтр-кек Д, 35% вода, 15% турбинное масло	1684.62	0.845	0.593	0.845	0.719
50% уголь Б2 (140 мкм), 50% вода	217.573	1.000	0.217	1.000	0.609
50% уголь Б2 (100 мкм), 50% вода	273.55	1.000	0.053	1.000	0.526
50% уголь Б2 (80 мкм), 50% вода	180.112	1.000	0.063	1.000	0.532
35% уголь Д (140 мкм), 15% уголь Д (100 мкм), 50% вода	215.621	0.907	0.496	0.907	0.701
25% уголь Д (140 мкм), 25% уголь Д (100 мкм), вода 50%	209.201	0.934	0.511	0.934	0.722
15% уголь Д (140 мкм), 35% уголь Д (100 мкм), 50% вода	201.731	0.853	0.530	0.853	0.692
50% уголь Д (140 мкм), 50% вода	180.828	0.910	0.591	0.910	0.750
47.5% фильтр-кек К, 50% вода, 2.5% опилки	372.953	0.853	0.287	0.853	0.570
45% фильтр-кек К, 50% вода, 5% опилки	361.161	0.881	0.296	0.881	0.589

40% фильтр-кек К, 50% вода, 10% опилки	396.120	0.936	0.270	0.936	0.603
45% фильтр-кек Д, 5% опилки, 47.5% вода, 2.5% масло	1650.631	1.000	0.065	1.000	0.532
47.5% фильтр-кек Д, опилки 2.5%, вода 47.5%, масло 2.5,%	1131.83	1.000	0.094	1.000	0.547
фильтр-кек Д 47.5%, 2.5% опилки, 45% вода, 5% масло	2601.911	1.000	0.041	1.000	0.521
45% фильтр-кек Д, 5% ореховая шелуха, 50% вода	341.171	1.000	0.313	1.000	0.657
45% фильтр-кек Д, 5% опилки, 50% вода	1371.672	1.000	0.078	1.000	0.539
50% уголь Д, 49.75% вода, 0.25% неонол	285.19	0.694	0.375	0.694	0.534
50% уголь Д, 49% вода, 1% неонол	520.21	0.675	0.205	0.675	0.440
50% уголь Д, 48.5% вода, 1.5% крахмал	208.97	0.723	0.512	0.723	0.617
50% уголь Д, 49.25% вода, 0.75% крахмал	162.11	0.789	0.659	0.789	0.724
50% уголь Д, 0.1% гуаровая камедь, 49.9% вода	697.78	0.891	0.153	0.891	0.522
50% уголь Д, 0.1% ксантановая камедь, 49.9% вода	1596.65	0.987	0.067	0.987	0.527

Зажигание и горение топливных композиций

В Табл. В8 приведены количественные результаты экспериментального исследования зажигания и горения различных топливных смесей, а также рассчитанные относительные показатели по каждому критерию. На Рис. В7 показаны типичные кадры горения капель суспензионных топлив, полученных экспериментально.

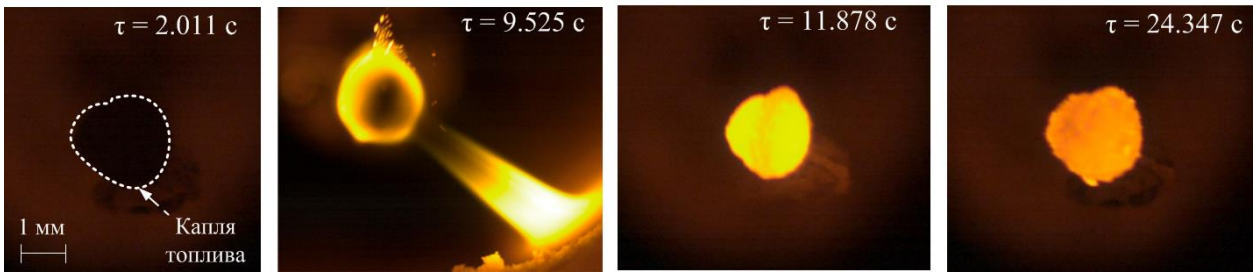


Рисунок В7 – Видеокадры горения капли суспензионного топлива (45% фильтр-кек Д, 5% ореховая шелуха, 50% вода) при 700 °С

Таблица В8. Абсолютные и относительные характеристики зажигания и горения суспензионных топлив

Состав	Зольность, %	Теплота сгорания, МДж/кг	Время гетерогенного зажигания при 700 °С,с	Температура зажигания, °С	Температура горения при 700, °С	Относительный показа-тель по зольности	Относительный показа-тель по теплоте сгорания	Относительный показа-тель по времени зажигания	Относительный показатель по температуре зажигания	Относительный показатель по температуре горения	Интегральный относительный показатель по зажиганию и горению
50% фильтр-кек Д, 50% вода	18.495	9.62	19.4	490	920	0.111381	0.58514	0.247423	0.77551	0.842491	0.512389
50% фильтр-кек Т, 50% вода	10.6	13.46	14.5	447	938	0.19434	0.81871	0.331034	0.850112	0.858974	0.610634
50% фильтр-кек К, 50% вода	13.23	12.4	15.3	430	950	0.155707	0.755147	0.313725	0.883721	0.869963	0.595653
50% фильтр-кек СС, 50% вода	25.445	7.61	16.1	505	910	0.080959	0.463185	0.298137	0.752475	0.833333	0.485618
50% фильтр-кек Г, 50% вода	16.91	11.08	13	420	937	0.121821	0.673945	0.369231	0.904762	0.858059	0.585564
50% фильтр-кек Ж, 50% вода	28.835	10.45	21.4	510	904	0.071441	0.635625	0.224299	0.745098	0.827839	0.50086
40% фильтр-кек К, 60% вода	10.584	9.932	14	425	936	0.194633	0.604118	0.342857	0.894118	0.857143	0.578574
60% фильтр-кек К, 40% вода	15.876	14.898	12.5	448	1020	0.129756	0.906177	0.384	0.848214	0.934066	0.640443
50% фильтр-кек Д, 45% вода, 5% турбинное масло	2.06	11.455	6.0	380	926	1	0.696755	0.803078	1	0.847985	0.869564
50% фильтр-кек Д, 40% вода, 10%турбинное масло	2.06	11.455	5.09	380	926	1	0.696755	0.943026	1	0.847985	0.897553
50% фильтр-кек Д, 35% вода, 15% турбинное масло	2.06	11.455	4.8	380	926	1	0.696755	1	1	0.847985	0.908948
50% уголь Б2 (140 мкм), 50% вода	18.49	11.89	9.78	450	1004	0.111376	0.723427	0.490798	0.844444	0.919414	0.617892
50% уголь Б2 (100 мкм), 50% вода	18.49	14.177	8.9	425	1078	0.11137	0.861713	0.539326	0.894118	0.987179	0.678741
50% уголь Б2 (80 мкм), 50% вода	18.49	16.4405	8.3	405	1092	0.111364	1	0.578313	0.938272	1	0.72559
35% уголь Д (140 мкм), 15% уголь Д (100 мкм), 50% вода	4.26	12.41	11.1	490	1001.5	0.483568	0.754843	0.431194	0.77551	0.917125	0.672448
25% уголь Д (140 мкм), 25% уголь Д (100 мкм), вода 50%	4.26	12.41	15.2	490	1001.5	0.483568	0.754843	0.316284	0.77551	0.917125	0.649466

15% уголь Д (140 мкм), 35% уголь Д (100 мкм), 50% вода	4.26	12.41	12.05	490	1001.5	0.483568	0.754843	0.398506	0.77551	0.917125	0.66591
50% уголь Д (140 мкм), 50% вода	4.26	12.41	14.87	490	1001.5	0.483568	0.754843	0.322798	0.77551	0.917125	0.650769
47.5% фильтр-кек К, 50% вода, 2.5% опилки	12.608	12.24	9.2	460	997	0.163382	0.744913	0.521739	0.826087	0.913004	0.633825
45% фильтр-кек К, 50% вода, 5% опилки	11.987	12.08	9.4	453	990	0.171853	0.73468	0.510638	0.838852	0.906593	0.632523
40% фильтр-кек К, 50% вода, 10% опилки	10.744	11.748	10.24	445	987	0.191735	0.714212	0.46875	0.853933	0.903846	0.626495
45% фильтр-кек Д, 5% опилки, 47.5% вода, 2.5% масло	17.61	10.73	11.6	390	981.5	0.116974	0.65255	0.414217	0.974359	0.89881	0.611382
47.5% фильтр-кек Д, опилки 2.5%, вода 47.5%, масло 2.5,%	17.61	11.87	10.8	390	1019.9	0.116971	0.721693	0.442498	0.974359	0.933974	0.637899
фильтр-кек Д 47.5%, 2.5% опилки, 45% вода, 5% масло	16.72598	10.70	12.3	400	1048.3	0.123162	0.650817	0.391171	0.95	0.959982	0.615026
45% фильтр-кек Д, 5% ореховая шелуха, 50% вода	16.72	9.6	10.21	462	1000	0.123165	0.581673	0.470127	0.822511	0.915751	0.582646
45% фильтр-кек Д, 5% опилки, 50% вода	16.8	9.71	11.8	410	1012.3	0.122615	0.590493	0.406285	0.926829	0.927015	0.594647
50% уголь Д, 49.75% вода, 0.25% неонол	4.26	12.51	14.9	410	953.3	0.483568	0.760926	0.320999	0.926829	0.872985	0.673061
50% уголь Д, 49% вода, 1% неонол	4.26	12.81	9.6	400	933.5	0.483568	0.779173	0.498216	0.95	0.854853	0.713162
50% уголь Д, 48.5% вода, 1.5% крахмал	4.263	12.67	15	400	1010.5	0.483228	0.770837	0.320013	0.95	0.925366	0.689889
50% уголь Д, 49.25% вода, 0.75% крахмал	4.2615	12.54	13.3	430	1004.35	0.483398	0.76284	0.360851	0.883721	0.919734	0.682109
50% уголь Д, 0.1% гуаровая камедь, 49.9% вода	4.261	12.41	9.9	500	974.7	0.483455	0.754843	0.485216	0.76	0.892582	0.675219
50%уголь Д, 0.1% ксантановая камедь, 49.9% вода	4.26932	12.41	9.5	500	1000.1	0.482512	0.754843	0.505884	0.76	0.915842	0.683817

Минимальная зольность (2,06%) типична для топлива «50% бурый уголь, 50% вода». Максимальную теплоту сгорания (16.44 МДж/кг) и температуру горения (около 1092 °С) имеет состав «50% фильтр-кек Д, 35% вода, 15% турбинное масло». Наименьшие температура (≈380 °С) и время задержки зажигания (около 4,8 с при 700 °С) характерны смеси «50% уголь Б2 (80 мкм), 50% вода». Расчет безразмерных показателей по каждой из вышеперечисленных характеристик проводился относительно топлив с максимальными показателями эффективности. Затем для каждой суспензии рассчитывался интегральный показатель зажигания и горения. представляющий сумму пяти безразмерных показателей с весовыми коэффициентами 0,2. Смесь «50% уголь Б2 (80 мкм), 50% вода» имеет наилучший (0,908) интегральный показатель зажигания и горения. Меньшее значение (0,500) имеет состав «60% кек угля марки Ж, 40% вода».

Вредные выбросы

В Табл. В9 приведены количественные результаты экспериментального определения концентраций вредных газов (при 900 °С), содержащихся в продуктах сгорания различных топливных смесей, а также рассчитанные относительные показатели по каждому критерию. На Рис. В8 представлены типичные тренды, получаемые экспериментально при газовом анализе продуктов сгорания суспензионных топлив.

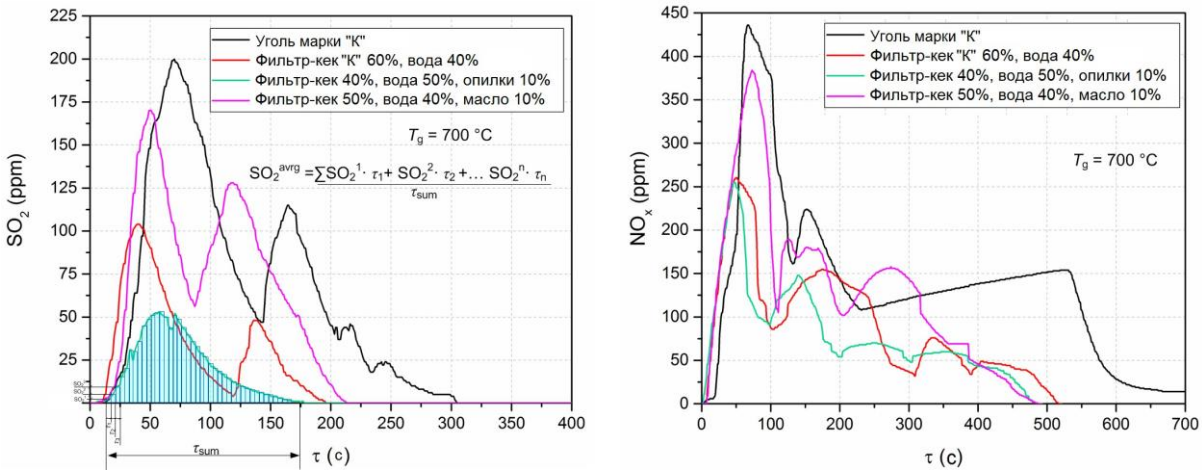


Рисунок В8 – Изменение концентраций SO_2 и NO_x при горении топлив

Таблица В9. Абсолютные и относительные характеристики загрязнения продуктов сгорания суспензионных топлив

	Состав	CO_2, %	CO, ppm	H_2, ppm	SO_2, ppm	NO_x, ppm	Относительный CO_2	Относительный CO	Относительный H_2	Относительный SO_2	Относительный NO_x	Интегральный показатель
1	50% фильтр-кек Д, 50% вода	4.81	2652.71	4961.89	121	243.83	0.656	0.629	0.710	0.727	0.694	0.683
2	50% фильтр-кек Т, 50% вода	3.94	2583.595	5810.01	111	267.1575	0.801	0.646	0.606	0.793	0.634	0.696
3	50% фильтр-кек К, 50% вода	3.29	1968.51	5831.69	125.80	232.00	0.959	0.848	0.604	0.700	0.730	0.768
4	50% фильтр-кек СС, 50% вода	3.92	2428.10	4444.80	118.00	246	0.806	0.688	0.792	0.746	0.688	0.744
5	50% фильтр-кек Г, 50% вода	3.16	1669.41	5322.91	102.25	197.00	1.000	1.000	0.662	0.861	0.860	0.876
6	50% фильтр-кек Ж, 50% вода	3.45	3188.2	5281.56	134	295	0.915	0.524	0.667	0.657	0.574	0.667
7	60% фильтр-кек К, 40% вода	4.42	2040.93	3521.51	134	262	0.714	0.818	1.000	0.657	0.646	0.767
8	50% фильтр-кек Д, 45% вода, 5% турбинное масло	5.41	3331.13	4563.02	112	264	0.584	0.501	0.772	0.786	0.641	0.657
9	50% фильтр-кек Д, 40% вода, 10% турбинное масло	5.41	3331.13	4563.02	112	264	0.584	0.501	0.772	0.786	0.641	0.657
10	50% фильтр-кек Д, 35% вода, 15% турбинное масло	5.80	3203.88	5213.67	94	320	0.544	0.521	0.675	0.936	0.529	0.641
11	50% уголь Б2 (140 мкм), 50% вода	4.79	2923.81	7023.87	139.66	256.5	0.659	0.571	0.501	0.630	0.660	0.604
12	50% уголь Б2 (100 мкм), 50% вода	4.47	3185.77	4367.41	158	245	0.706	0.524	0.806	0.557	0.691	0.657
13	35% уголь Д (140 мкм), 15% уголь Д (100 мкм), 50% вода	4.20	2565.00	4072.07	125	230.72	0.752	0.651	0.865	0.704	0.734	0.741
14	25% уголь Д (140 мкм), 25% уголь Д (100 мкм), вода 50%	4.20	2565.00	4072.07	125	230.72	0.752	0.651	0.865	0.704	0.734	0.741

15	15% уголь Д (140 мкм), 35% уголь Д (100 мкм), 50% вода	4.20	2565.00	4072.07	125	230.72	0.752	0.651	0.865	0.704	0.734	0.741
16	50% уголь Д (140 мкм), 50% вода	4.20	2565.00	4072.07	125	230.72	0.752	0.651	0.865	0.704	0.734	0.741
17	45% фильтр-кек К, 50% вода, 5% опилки	4.52	3004.15	5396.47	88	209.64	0.698	0.556	0.653	1.000	0.808	0.743
18	40% фильтр-кек К, 50% вода, 10% опилки	3.54	4176.07	3995.18	93.77	194.40	0.892	0.400	0.881	0.938	0.871	0.796
19	45% фильтр-кек Д, 5% ореховая шелуха, 50% вода	4.52	3004.15	5396.47	88	209.64	0.698	0.556	0.653	1.000	0.808	0.743
20	45% фильтр-кек Д, 5% опилки, 50% вода	4.42	2822.02	3733.69	98	169.33	0.714	0.592	0.943	0.898	1.000	0.829

Наименьшие концентрации CO_2 (3,16%) и CO (1669,4 ppm) регистрировались при сжигании состава «50% фильтр-кек угля марки Г, 50% вода»; H_2 (3521,5 ppm) – «60% фильтр-кек угля марки К, 40% вода»; SO_2 (88 ppm) – «45% фильтр-кек угля марки К, 50% вода, 5% опилки»; NO_x (169,33 ppm) – «45% фильтр-кек угля марки Д, 50% вода. 5% ореховая шелуха». Эти значения получены при температуре 900 °С.

Расчет безразмерных показателей для всех топлив по пяти вышеперечисленным загрязнителям проводился относительно топлив с наименьшими выбросами. Интегральный показатель экологической эффективности представлял сумму полученных относительных показателей по каждому химическому соединению с весовыми коэффициентами 0,2. Смесь «50% фильтр-кек угля марки Г, 50% вода» имеет наиболее высокий интегральный показатель (равен 0,876). Самое малое значение (0,604) имеет состав «50% фильтр-кек угля марки Д, 45% вода, 5% турбинное масло».

Иллюстрация результатов вычислений относительных показателей по каждому из выбросов и интегрального показателя представлена на Рис. В9.

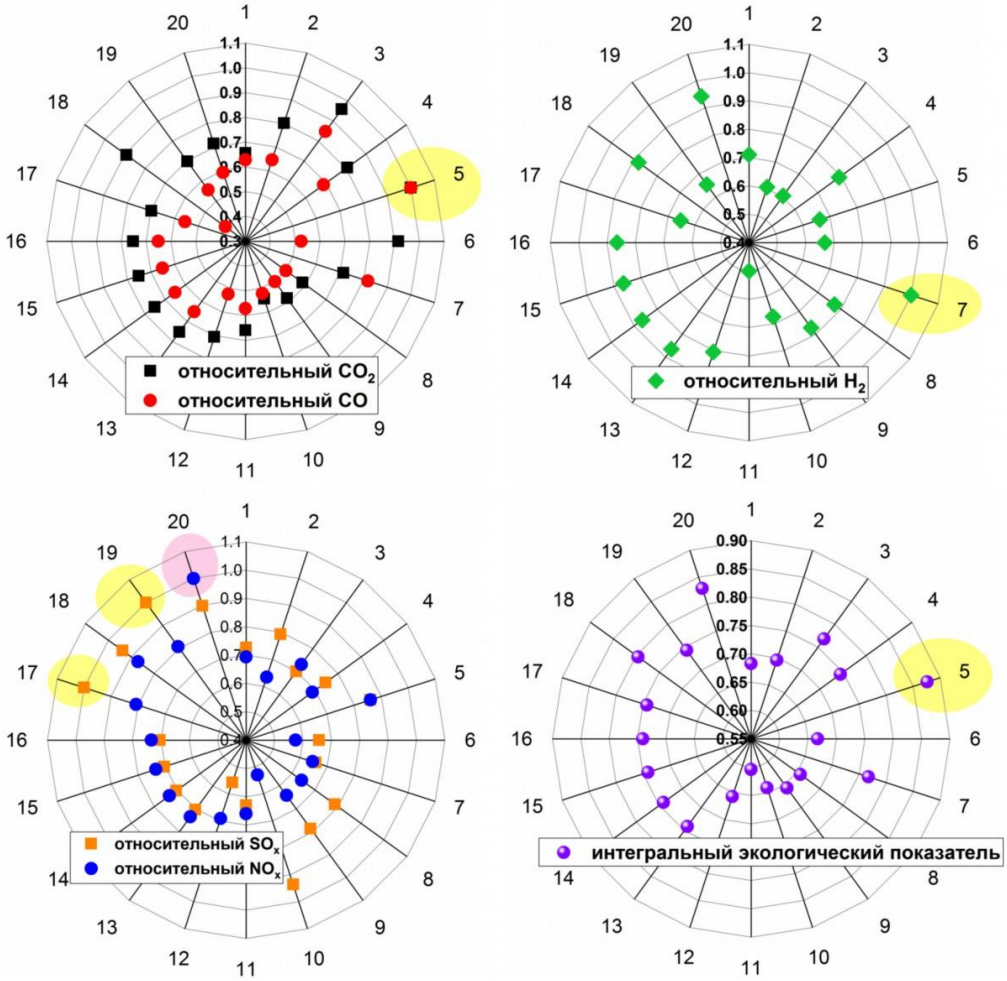


Рисунок В9 – Относительные и интегральный экологические показатели сжигания суспензий, номера лучей радиальных диаграмм соответствуют номерам топлив в Табл. В9

Обобщенный показатель эффективности топлив

При вычислении значений итогового показателя эффективности топлив использованы следующие группы критериев (в скобках указаны пояснения относительно того, что является желательным для улучшения эффективности):

1. Стоимость (приоритет – минимальное значение);

2. Энергетические характеристики: удельная теплота сгорания (приоритет – высокое значение); зольность (приоритет – минимальное значение); время задержки зажигания (приоритет – минимальное значение); температура зажигания (приоритет – минимальное значение); температура горения (приоритет – высокое значение).

3. Экологические характеристики: концентрация NO_x в дымовых газах (приоритет – минимальное значение); концентрация SO_2 в дымовых газах (приоритет – минимальное значение); концентрация CO_2 в дымовых газах (приоритет – минимальное значение); концентрация CO в дымовых газах (приоритет – минимальное значение); концентрация H_2O в дымовых газах (приоритет – минимальное значение).

4. Реологические характеристики: вязкость (приоритет – минимальное значение); стабильность (приоритет – максимальное значение).

5. Распыление: числа Вебера и Рейнольдса (приоритет – минимальное значение); давление распыления (приоритет – минимальное значение); угол раскрытия факела (приоритет – максимальное значение).

6. Дробление и фрагментация: время до реализации условий дробления (приоритет – минимальное значение); соотношение площадей поверхности топлива S_1/S_0 (приоритет – максимальное значение).

На основе интегральных показателей, рассчитанных в каждой из вышеперечисленных категорий. вычислялся итоговый показатель, объединяющий их все. При расчете рассмотрены два основных сценария:

1. Все категории параметров имеют одинаковый приоритет. В данном случае проводилось суммирование всех интегральных показателей эффективности (x_1, x_2, $x_3 \ldots x_6$) с равными весовыми коэффициентами (a_1, a_2, $a_3 \ldots a_6$):

$$D = a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4 + a_5x_5 + a_6x_6 .$$

2. Приоритет распределяется неравномерно. В этом случае приоритет с соответствующим весовым коэффициентом 0,5 отдавался одному из шести интегральных показателей. Остальные пять составляющих получали равномерно распределенный весовой коэффициент (по 0,1).

В случае равного приоритета всех групп характеристик наибольшей эффективностью (0,621) характеризуется состав «50% фильтр-кек угля марки Г, 50% вода».

Наибольшая эффективность (0,708) при приоритете низкой стоимости – состав «50% фильтр-кек угля марки Г, 50% вода».

Наибольшая эффективность (0,708) при приоритете характеристик зажигания и горения – состав «50% уголь Б2 (80 мкм), 50% вода».

Наибольшая эффективность (0,723) при приоритете экологических характеристик зажигания и горения – состав «50% фильтр-кек угля марки Г, 50% вода».

Наибольшая эффективность (0,703) при приоритете стабильности и снижения вязкости – состав «50% фильтр-кек угля марки Д, 50% вода».

Наибольшая эффективность (0,461) при приоритете эффективности дробления капель – состав «50% фильтр-кек Д, 50% вода».

Наибольшая эффективность (0,610) при приоритете экологических характеристик зажигания и горения – состав «50% фильтр-кек угля марки Г, 50% вода».

Заключение

(i) Среди изученных топлив, основными компонентами которых являлись угольные шламы и угли разной степени метаморфизма, наиболее перспективными стали смеси из угольных флотационных отходов. Это обусловлено их низкой стоимостью, хорошими показателями стабильности и вязкости, а также приемлемыми энергетическими и экологическими характеристиками. С учетом большой социальной значимости утилизации низкосортного сырья можно сделать вывод о приоритете использования угольных шламов в качестве основы для приготовления топливных суспензий.

(ii) Самая большая вариация интегрального показателя (0,440–0,887) наблюдалась в категории «Вязкость и стабильность». В остальных категориях (энергетика, экология, распыление, дробление) значения интегрального показателя изменялись, в среднем, в диапазоне 0,5–0,8.

(iii) Использование растительной биомассы и отработанного масла в составе суспензий на основе угольных шламов приближает полученное топливо к суспензиям на основе каменного угля по характеристикам ignition and combustion performance.

(iv) Тонкодисперсное измельчение твердого компонента (менее 80 мкм) не целесообразно для повышения интегральной энергетической эффективности суспензии.

(v) Перспективным, с точки зрения улучшения интегрального показателя вязкости и стабильности, является сочетание в топливе частиц разной крупности (т.е. создание полидисперсной смеси).

(vi) Добавление небольшого количества растительной биомассы (2–5%) может считаться наиболее эффективным способом улучшить экологическую эффективность суспензии на основе угольных шламов. Как показали эксперименты и расчеты, замещение фильтр-кека на растительную биомассу (5%) увеличивало интегральный показатель экологической эффективности в 1,18 раз.

(vii) Итоговый показатель эффективности, учитывающий 17 отдельных составляющих из шести категорий, имел максимальное значение (0,591) для топлива «50% фильтр-кек Г, 50% вода» в случае, когда максимальный приоритет отдается минимизации выбросов при сжигании топлива.

(viii) Полученная база данных по абсолютным, относительным и интегральным показателям для суспензий различного состава может быть использована для технико-экономического обоснования применения низкосортных топлив в энергетике, проектирования или модернизации участков подготовки, подачи, сжигания топлива, очистки дымовых газов и др.

Список литература к Приложению В

1 Zhang H., Dou B., Li J., Zhao L., Wu K. Thermogravimetric kinetics on catalytic combustion of bituminous coal // Journal of the Energy Institute. – 2020. – Vol. 93. – P. 2526-2535. DOI: 10.1016/J.JOEI.2020.08.012

2 Zhao R., Qin J., Chen T., Wang L., Wu J. Experimental study on co-combustion of low rank coal semicoke and oil sludge by TG-FTIR // Waste Management. – 2020. – Vol. 116. – P. 91-99. DOI: 10.1016/J.WASMAN.2020.08.007

3 Guo F., He Y., Hassanpour A., Gardy J., Zhong Z. Thermogravimetric analysis on the co-combustion of biomass pellets with lignite and bituminous coal // Energy. – 2020. – Vol. 197. – Article No. 117147. DOI: 10.1016/j.energy.2020.117147

4 Bi H., Wang C., Lin Q., Jiang X., Jiang C., Bao L. Combustion behavior, kinetics, gas emission characteristics and artificial neural network modeling of coal gangue and biomass via TG-FTIR // Energy. – 2020. – Vol. 213. – Article No. 118790. DOI: 10.1016/j.energy.2020.118790

5 He C., Tang C., Liu W., Dai L., Qiu R. Co-pyrolysis of sewage sludge and hydrochar with coals: Pyrolytic behaviors and kinetics analysis using TG-FTIR and a discrete distributed activation energy model // Energy Conversion and Managemant. – 2020. – Vol. 203. – Article

No. 112226. DOI: 10.1016/j.enconman.2019.112226

6 Jiang L., Liang J., Yuan X., Li H., Li C., Xiao Z., et al. Co-pelletization of sewage sludge and biomass: The density and hardness of pellet // Bioresource Technology. –2014. – Vol. 166. – P. 435-443. DOI: 10.1016/j.biortech.2014.05.077

7 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 slurrying, combustion, and pollutant emission // Energy. – 2019. – Vol. 168. – P. 609-618. DOI: 10.1016/J.ENERGY.2018.11.141

8 Pinchuk V.A., Kuzmin A.V. The effect of the addition of TiO2 nanoparticles to coal-water fuel on its thermophysical properties and combustion parameters // Fuel. – 2020. – Vol. 267. – Article No. 117220. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.117220

9 Fu B., Liu G., Mian M.M., Zhou C., Sun M., Wu D., et al. Co-combustion of industrial coal slurry and sewage sludge: Thermochemical and emission behavior of heavy metals // Chemosphere. – 2019. – Vol. 233. – P. 440-451. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2019.05.256

10 Feng P., Li J., Wang J., Wang H., Xu Z. Effect of bio-oil species on rheological behaviors and gasification characteristics of coal bio-oil slurry fuels // Processes. – 2020. – Vol. 8. – Article No. 1045. DOI: 10.3390/pr8091045

11 Wang R., Liu J., Gao F., Zhou J., Cen K. The slurrying properties of slurry fuels made of petroleum coke and petrochemical sludge // Fuel Processing Technology. – 2012. – Vol. 104. – P. 57-66. DOI: 10.1016/j.fuproc.2012.07.006

12 Xu R., He Q., Cai J., Pan Y., Shen J., Hu B. Effects of chemicals and blending petroleum coke on the properties of low-rank Indonesian coal water mixtures // Fuel Processing Technology. – 2008. – Vol. 89. – P. 249-253. DOI: 10.1016/j.fuproc.2007.11.026

13 Zhang Y., Xu Z., Tu Y., Wang J., Li J. Study on properties of coal-sludge-slurry prepared by sludge from coal chemical industry // Powder Technology. – 2020. – Vol. 366. – P. 552-559. DOI: 10.1016/j.powtec.2020.03.005

14 Yuchi W., Li B., Li W., Chen H. Effects of coal characteristics on the properties of coal water slurry // International Journal of Coal Preparation and Utilization. – 2005. – Vol. 25. – P. 239-249. DOI: 10.1080/07349340500444489

15 Kijo-Kleczkowska A., Środa K., Kosowska-Golachowska M., Musiał T., Wolski K. Combustion of pelleted sewage sludge with reference to coal and biomass // Fuel. – 2016. –Vol. 170. – P. 141-160. DOI: 10.1016/j.fuel.2015.12.026

16 Meng Z., Yang Z., Yin Z., Li Y., Song X., Zhao J., et al. Effects of coal slime on the slurry ability of a semi-coke water slurry // Powder Technology. – 2020. – Vol. 359. – P. 261-267. DOI: 10.1016/j.powtec.2019.09.053

17 Zhang Y., Shen Z., Zhang B., Sun J., Zhang L., Zhang T., et al. Emission reduction

effect on PM2.5, SO2 and NOx by using red mud as additive in clean coal briquetting // Atmospheric Environment. – 2020. – Vol. 223. – Article No. 117203. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2019.117203

18 Yao X., Zhou H., Xu K., Chen S., Ge J., Xu Q. Systematic study on ash transformation behaviour and thermal kinetic characteristics during co-firing of biomass with high ratios of bituminous coal // Renew Energy. – 2020. – Vol. 147. – P. 1453-1468. DOI: 10.1016/j.renene.2019.09.103

19 Li H., Chi H., Han H., Hu S., Song G., Wang Y., et al. Comprehensive study on co-combustion behavior of pelletized coal-biomass mixtures in a concentrating photothermal reactor // Fuel Processing Technology. – 2021. – Vol. 211. – Article No. 106596. DOI: 10.1016/j.fuproc.2020.106596

20 Wang C., Bi H., Jiang X., Jiang C., Lin Q. Experimental study on ignition and combustion of coal-rice husk blends pellets in air and oxy-fuel conditions // Journal of the Energy Institute. – 2020. – Vol. 93. – P. 1544-1558. DOI: 10.1016/j.joei.2020.01.017

21 Zhang Z., Zeng Q., Hao R., He H., Yang F., Mao X., et al. Combustion behavior, emission characteristics of SO2 , SO3 and NO, and in situ control of SO2 and NO during the co-combustion of anthracite and dried sawdust sludge// Science of the Total Environment. – 2019. – Vol. 646. – P. 716-726. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.07.286

22 Fan Y., Wang R., Li X., Xiang J., Shao Q., Meng S., et al. A high-efficiency utilization of coke-oven plant coke ash for the preparation of coke ash emulsion slurry // Fuel. – 2019. – Vol. 245. – P. 139-147. DOI: 10.1016/j.fuel.2019.02.068

23 Si T., Cheng J., Zhou F., Zhou J., Cen K. Control of pollutants in the combustion of biomass pellets prepared with coal tar residue as a binder // Fuel. – 2017. – Vol. 208. – P. 439-446. DOI: 10.1016/j.fuel.2017.07.051

24 Zhao Z., Wang R., Wu J., Yin Q., Wang C. Bottom ash characteristics and pollutant emission during the co-combustion of pulverized coal with high mass-percentage sewage sludge // Energy. – 2019. – Vol. 171. – P. 809-818. DOI: 10.1016/j.energy.2019.01.082

25 Wielgosiński G., Łechtańska P., Namiecińska O. Emission of some pollutants from biomass combustion in comparison to hard coal combustion // Journal of the Energy Institute. – 2017. – Vol. 90. – P. 787-796. DOI: 10.1016/j.joei.2016.06.005

26 Kułażyński M., Jabłoński S., Kaczmarczyk J., Świątek Ł., Pstrowska K., Łukaszewicz M. Technological aspects of sunflower biomass and brown coal co-firing // Journal of the Energy Institute. – 2018. – Vol. 91. – P. 668-675. DOI: 10.1016/J.JOEI.2017.06.003

27 Гинзбург А.С., Громов М.А., Красовская Г.И. Теплофизические характеристики пищевых продуктов. Справочник. – М.: Пищевая промышленность; 1980.

28 Borel L.D.M.S, Lira T.S., Ribeiro J.A., Ataíde C.H., Barrozo M.A.S. Pyrolysis of brewer's spent grain: Kinetic study and products identification // Industrial Crops and Products. – 2018. – Vol. 121. – P. 388-395. DOI: 10.1016/j.indcrop.2018.05.051

29 Чубик, И.А., Маслов, А.М. Справочник по теплофизическим характеристикам пищевых продуктов и полуфабрикатов. – М.: Пищевая промышленность, 1970.

30 Zhou C., Yang W., Blasiak W. Characteristics of waste printing paper and cardboard in a reactor pyrolyzed by preheated agents // Fuel Processing Technology. – 2013. – Vol. 116. – P. 63-71. DOI: 10.1016/j.fuproc.2013.04.023

31 Leyssens G., Trouvé G., Caplain I., Schönnenbeck C., Cazier F. Energetic performances and environmental impact of the combustion of cardboard/sawdust in a domestic boiler // Fuel. – 2014. – Vol. 122. – P. 21-27. DOI: 10.1016/j.fuel.2014.01.034

32 Lela B., Barišić M., Nižetić S. Cardboard/sawdust briquettes as biomass fuel: Physical-mechanical and thermal characteristics // Waste Management. – 2016. – Vol. 47. – P. 236-245. DOI: 10.1016/j.wasman.2015.10.035

33 Asdrubali, F., Pisello A.L., D'Alessandro F., Bianchi F., Fabiani C., Cornicchia M., et al. Experimental and numerical characterization of innovative cardboard based panels: Thermal and acoustic performance analysis and life cycle assessment // Building and Environment. – 2016. – Vol. 95. – P. 145-159. DOI: 10.1016/j.buildenv.2015.09.003

34 Франчук А.У. Таблицы теплотехнических показателей строительных материалов. – М.: НИИ строительной физики, 1969.

35. Liu P., Zhu M., Zhang Z., Leong Y.K., Zhang Y., Zhang D. Rheological behaviour and stability characteristics of biochar-water slurry fuels: Effect of biochar particle size and size distribution // Fuel Processing Technology. – 2017. – Vol. 156. – P. 27-32. DOI: 10.1016/j.fuproc.2016.09.030

36 Liu P., Zhu M., Leong Y.K., Zhang Y., Zhang Z., Zhang D. An experimental study of the rheological properties and stability characteristics of biochar-algae-water slurry fuels. // Energy Procedia. – 2017. – Vol. 105. – P. 125-130. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.03.290

37 Liu P., Zhu M., Zhang Z., Kwong Leong, Y., Zhang Y., Zhang D. An experimental study of rheological properties and stability characteristics of biochar-glycerol-water slurry fuels // Fuel Processing Technology. – 2016. – Vol. 153. – P. 37-42. DOI: 10.1016/j.fuproc.2016.07.026

38 Gao W., Zhang M., Wu H. Ignition temperatures of various bio-oil based fuel blends and slurry fuels // Fuel. – 2017. – Vol. 207. – P. 240-243. DOI: 10.1016/j.fuel.2017.06.090

39 Zhu M., Zhang Z., Zhang Y., Setyawan H., Liu P., Zhang D. An experimental study of the ignition and combustion characteristics of single droplets of biochar-glycerol-water slurry fuels // Proceedings of the Combustion Institute. – 2017. – Vol. 36. – P. 2475-2482. DOI:

10.1016/J.PROCI.2016.07.070

40 Loureiro L.M.E.F., Gil P.B.F., Vieira de Campos F.V., Nunes L.J.R., Ferreira J.M.F. Dispersion and flow properties of charcoal oil slurries (ChOS) as potential renewable industrial liquid fuels // Journal of the Energy Institute. – 2018. – Vol. 91. – P. 978-983. DOI: 10.1016/j.joei.2017.08.001

41 Soria-Verdugo A., Kauppinen J., Soini T., García-Gutiérrez L.M., Pikkarainen T. Pollutant emissions released during sewage sludge combustion in a bubbling fluidized bed reactor // Waste Management. – 2020. – Vol. 105. – P. 27-38. DOI: 10.1016/j.wasman.2020.01.036

42 Yang R., Ma C., Chen G., Cheng Z., Yan B., Mansour M. Study on NOx emission during corn straw/sewage sludge co-combustion: Experiments and modelling // Fuel. – 2021. – Vol. 285. – Article No. 119208. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.119208

43 Wang Y., Liu Y., Yang W., Zhao Q., Dai Y. Evaluation of combustion properties and pollutant emission characteristics of blends of sewage sludge and biomass // Science of the Total Environment. – 2020. – Vol. 720. – Article No. 137365. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.137365

44 Tian H., Jiao H., Cai J., Wang J., Yang Y., Bridgwater A.V. Co-pyrolysis of Miscanthus Sacchariflorus and coals: A systematic study on the synergies in thermal decomposition, kinetics and vapour phase products // Fuel. – 2020. – Vol. 262. – Article No. 116603. DOI: 10.1016/j.fuel.2019.116603

45 Liu X., Luo Z., Yu C., Xie G. Conversion mechanism of fuel-N during pyrolysis of biomass wastes // Fuel. – 2019. – Vol. 246. – P. 42-50. DOI: 10.1016/j.fuel.2019.02.042

46 Xinjie L., Shihong Z., Xincheng W., Jinai S., Xiong Z., Xianhua W., et al. Co-combustion of wheat straw and camphor wood with coal slime: Thermal behaviour, kinetics, and gaseous pollutant emission characteristics // Energy – 2021. – Vol. 234. – Article No. 121292. DOI: 10.1016/J.ENERGY.2021.121292

47 Kumar A., Sah B., Singh A.R., Deng Y., He X., Kumar P., et al. A review of multi criteria decision making (MCDM) towards sustainable renewable energy development // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2017. – Vol. 69. – P. 596-609. DOI: 10.1016/j.rser.2016.11.191

48 Wimmler C., Hejazi G., Fernandes E. de O, Moreira C., Connors S. Multi-criteria decision support methods for renewable energy systems on Islands // Journal of Clean Energy Technologies. – 2015. – Vol. 3. – P. 185-895. DOI: 10.7763/jocet.2015.v3.193

49 Antonov D.V., Fedorenko R.M., Strizhak P.A. Micro-explosion and puffing of a group of two-component droplets // Applied Thermal Engineering. – 2020. – Vol. 181. – Article No. 116023. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2020.116023