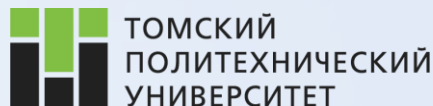


*XI Всероссийская конференция с международным участием
Горение топлива: теория, эксперимент, приложения, 09-12 ноября 2021,
Новосибирск*



t p u . r u

Многофакторный анализ энергетической утилизации угольных, нефтяных и растительных отходов в составе топливных суспензий

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



Heat Mass Transfer
Simulation Lab



Исследование поддержано грантом
Министерства науки и высшего
образования Российской Федерации,
Соглашение №075-15-2020-806 (договор
№13.1902.21.0014)

Актуальность исследования



1. Отходы переработки угля

Прогноз формирования отходов переработки угля [1,2]

Прогноз	Отходы переработки угля, млн т/год
2020	924
2032	1012
2044	1056



[1] Coal Information. International Energy Agency. 2015. <http://www.iea.org>.

[2] International Energy Outlook. 2014. <http://www.eia.gov>.

[3] Kontorovich A.E., et. al. // Russian Geology and Geophysics. 2014. V. 55 (5-6). P. 534–543.

[4] Tripathi A.K., et. al. // Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. 2015. V. 114. P. 281–292.

[5] Lam S.S., et. al. // Applied Catalysis B: Environmental. 2015. V. 176–177 (1). P 601–617.

[6] BP Statistical Review of World Energy. 2015. <http://www.bp.com>.

[7] Chayka O.G., et. al. Proceedings Scientifical Works. 2009. P. 221–224.

[8] Hu G., et. al. // Journal of Hazardous Materials. 2013. V. 261. P. 470–490.

[9] Global Waste Management Outlook, 2015.

2. Отходы нефтяного происхождения



Годовой объем производства отходов нефтепродуктов [3]

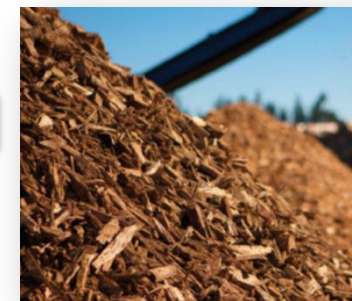
Моторные масла	30–40 млн т [4, 5]
Технические масла	32–35 млн т [6, 7]
Нефтяные шламы	60 млн т *

* уже накоплено более 1 миллиарда тонн [8]



Отрасли промышленности, производящие наибольшие объемы отходов [9]

3. Биомасса



Скорость накопления растительных отходов с учетом калорийности [9-11].

Наименование	Средняя скорость формирования в мире (млн т в год)	Теплота сгорания (МДж/кг)
Древесные отходы (опилки, стружка, спил и т.д.)	не менее 180	8–20
Сельскохозяйственные растительные отходы	не менее 3000	4–16

[10] Junginger M, Goh CS, Faaij A. International Bioenergy Trade: history, status & outlook on securing sustainable bioenergy supply, demand and markets. Springer Science+Business Media Dordrecht; 2014.

[11] Paudel SR, Banjara SP, Choi OK, Park KY, Kim YM, Lee JW. Pretreatment of agricultural biomass for anaerobic digestion: Current state and challenges. Bioresour Technol 2017;245:1194-1205.

Актуальность исследования



Исчерпаемость ресурсов

Антропогенные выбросы при сжигании топлив



Современные проблемы энергетики и экологии



Отходы промышленные и бытовые

Низкий уровень полезного использования отходов – ≈85% отходов подвергается захоронению [1-4]

- Отходы углерепереработки
- Нефтяные отходы
- Растительные отходы, ТБО



Энергетический цикл

Социально-экономическая значимость технологий «отходы в энергию»



Сохранение ресурсов



Сохранение окружающей среды

Композиционные топлива, в том числе топливные суспензии

Цели применения суспензионных топлив

- Улучшение экологических параметров работы топливосжигающих установок (снижение выбросов) [5,6];
- Утилизация большой группы невостребованных компонентов и отходов.

Дополнительные цели:

- Снижение стоимости топлива;
- Возможность трубопроводной транспортировки;
- Замещение традиционных видов топлива;
- Улучшение условий пожаровзрывобезопасности энергетических предприятий;
- Упрощение процедуры подготовки топлива.

[1] Global waste management outlook. United Nations Environment Programme, 2015.

[2] Рынок утилизации отходов. 2018. Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики».

[3] Отходы в графиках и диаграммах – 3.0. 2012. Секретариат Базельской конвенции. International Environment House.

[4] World Energy Resources. World Energy Council, 2016.

[5] Jianzhong L, Ruikun W, Jianfei X, Junhu Z, Kefa C. Pilot-scale investigation on slurring, combustion, and slagging characteristics of coal slurry fuel prepared using industrial wasteliquid. Appl Energy 2014;115:309-319.

[6] Osintsev KV. Studying flame combustion of coal-water slurries in the furnaces of power-generating boilers. Therm Eng 2012;59(6):439-445.

Цель, новизна и практическая значимость исследования *

Объект исследования: высоковлажные смеси (разновидности водоугольных суспензий) на основе отходов разного происхождения.

Цель исследования: комплексная оценка топливных суспензий с помощью методов многофакторного анализа.

Научная новизна. До настоящего времени не публиковались работы с комплексным анализом применимости топливных суспензий при учете таких значимых составляющих, как реология, характеристики распыления и фрагментации, состав дымовых газов, стоимость, характеристики зажигания и горения.

Результаты работы имеют значение для:

- обоснования целесообразности совместного сжигания отходов;
- выявления недостатков и преимуществ разных способов совместного сжигания отходов;
- разработки эффективных технологий сжигания отходов.



* Dorokhov V.V., Kuznetsov G.V., Vershinina K.Y., Strizhak P.A. Relative energy efficiency indicators calculated for high-moisture waste-based fuel blends using multiple-criteria decision-making // **Energy. 2021;234:article number 121257.**

Методы Multiple Criteria Decision Making (MCDM)

Некоторые из существующих методик [1,2]:

Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS)

Analytic Hierarchy Process (AHP)

Network Analysis Method (ANP)

Weighted Sum Method (WSM)

Weighted Product Model (WPM)



Несмотря на разнообразие методик, для большинства методик **основная идея остается общей – ранжирование вариантов по комплексу нормированных (безразмерных) характеристик и последующее сопоставлении с наилучшим вариантом (существующим либо идеальным).**

Ранжирование происходит через **присвоение весовых коэффициентов** на основе **экспертных мнений или иных приоритетов** (например, минимизации затрат времени, ресурсов, улучшении экологических показателей).

MCDM применяется, когда существует более двух противоречащих критерия оценки.



[1] Naeini MA, et al. Analyzing the development of the third-generation biodiesel production from microalgae by a novel hybrid decision-making method: The case of Iran. Energy 2020;195:116895.

[2] Erdoğ an S, et al. The best fuel selection with hybrid multiple-criteria decision making approaches in a CI engine fueled with their blends and pure biodiesels produced from different sources. Renew Energy 2019;134:653–68. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.11.060>.

Компонентный состав исследуемых топлив

Основные компоненты

- вода (40-60% масс.);
- фильтр-кеки разных марок (угольные шламы, т.е. отходы углеобогащения); бурый уголь разной дисперсности (40-60% масс., дисперсность 80-140 мкм);
- каменный длиннопламенный уголь разной дисперсности (40-60% масс., дисперсность 80-140 мкм).

Дополнительные компоненты

- опилки древесные (2-5% масс.);
- шелуха арахиса (2-5% масс.);
- отработанное турбинное масло (2.5-10% масс.);
- неонол (0.25% масс);
- крахмал картофельный (0.75-1.6% масс.);
- гуаровая и ксантановая камеди (0.1% масс.).

Комплекс работ по подготовке компонентов и приготовлению смесевых топлив выполнялось с помощью следующего оборудования:

- а. быстроходной роторной мельницы (Pulverisette-14);
- б. лабораторного отсева и комплекта сит для измельчения твердых компонентов и достижения разной дисперсности;
- в. высокоточных весов (Vibra AF 225DRCE, Pioneer PA114) для взвешивания и дозирования компонентов в смеси;
- г. магнитной мешалки (AIBOTE ZNCLBS-2500) для гомогенизации компонентов топлива.



Методика расчета показателей эффективности

Метод взвешенных сумм (Weight Sum Method (WSM)) [1] являлся основой расчета показателей эффективности в данной работе.

Алгоритм метода включал следующие этапы: **(а)** выбор параметров, характеризующих эффективность топлива; **(б)** нормирование абсолютных значений параметров. Данный шаг проводился отдельно по каждой категории параметров. Нормирование выполнялось относительно значения, которое считалось наилучшим среди полученных значений для всех топливных смесей; **(в)** вычисление показателя эффективности в каждой группе параметров по формуле:

$$A_n = \sum w_j \cdot x_{ij},$$
 где w_j – весовой коэффициент для каждого критерия; x_{ij} – нормированное значение критерия.

$0 < A_n \leq 1$. Чем выше значение, тем более эффективно топливо по совокупности каких-либо показателей.

Критерии для оценки суспензионных топлив

В данном исследовании рассматривалось 6 групп критериев, включающих совокупно 18 характеристик:

Стоимость

Энергетические критерии:

- Теплота сгорания;
- Зольность;
- Задержка зажигания;
- Температура зажигания;
- Температура горения.

Распыление:

- Числа Вебера и Рейнольдса;
- Давление распыления;
- Угол раскрытия факела.



Экологические критерии:

- NO_x;
- SO₂;
- CO₂;
- CO;
- H₂O.

Реологические критерии:

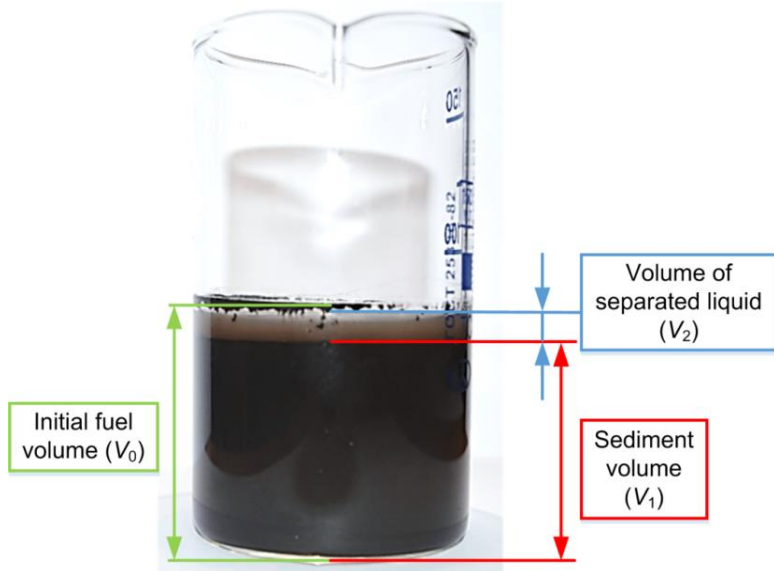
- Вязкость;
- Стабильность.

Фрагментация:

- Времена задержки начала распада капель;
- Удельная площадь поверхности капель при фрагментации.

Экспериментальные методики

1. Вязкость и стабильность [1]



Показатель стабильности (m/m_0) - отношение массы жидкости, отделившейся в течение четырех суток хранения топлива, к исходной массе всей смеси

Реометр Brookfield DV3T

2. Распыление [2]

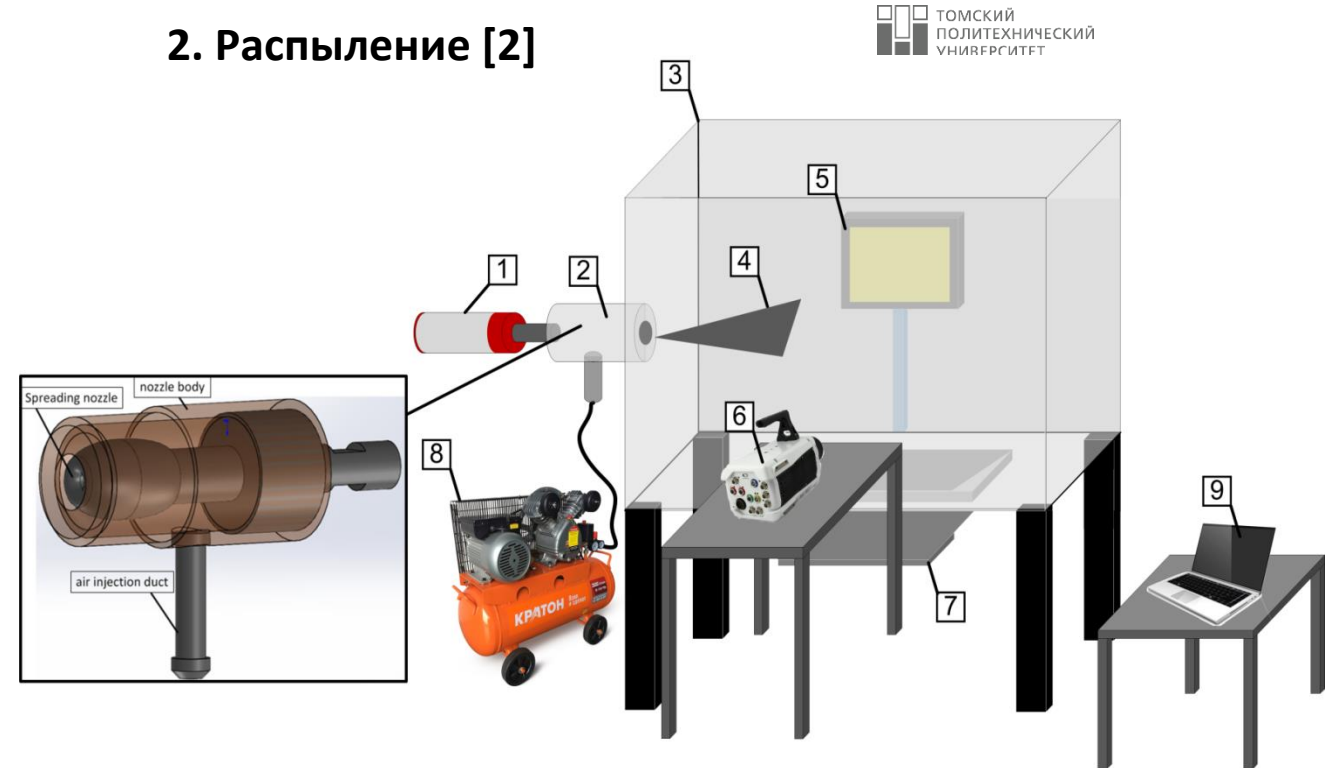


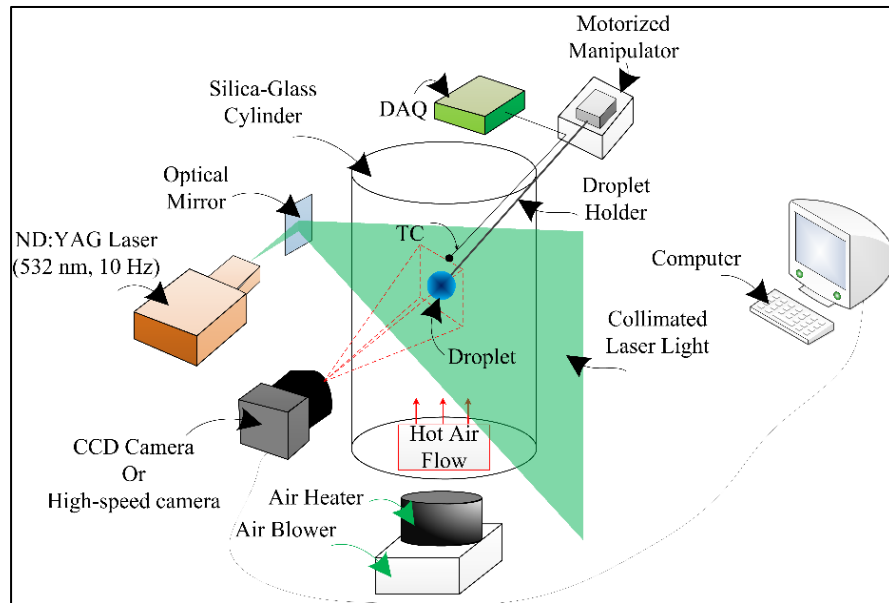
Схема стенда для изучения распыления суспензий: 1 – шток для выдавливания исследуемого топлива; 2 – форсунки; 3 – прозрачная камера для распыления исследуемого топлива; 4 – факел распыления; 5 – система прожекторов; 6 – высокоскоростная видеокамера; 7 – емкость для сбора капель распыленного топлива; 8 – воздушный компрессор; 9 – персональный компьютер; 10 – объектив; 11 – шланг подачи воздуха на форсунку

[1] Kuznetsov GV, et al. *Fuel*. 2021;302:121203.

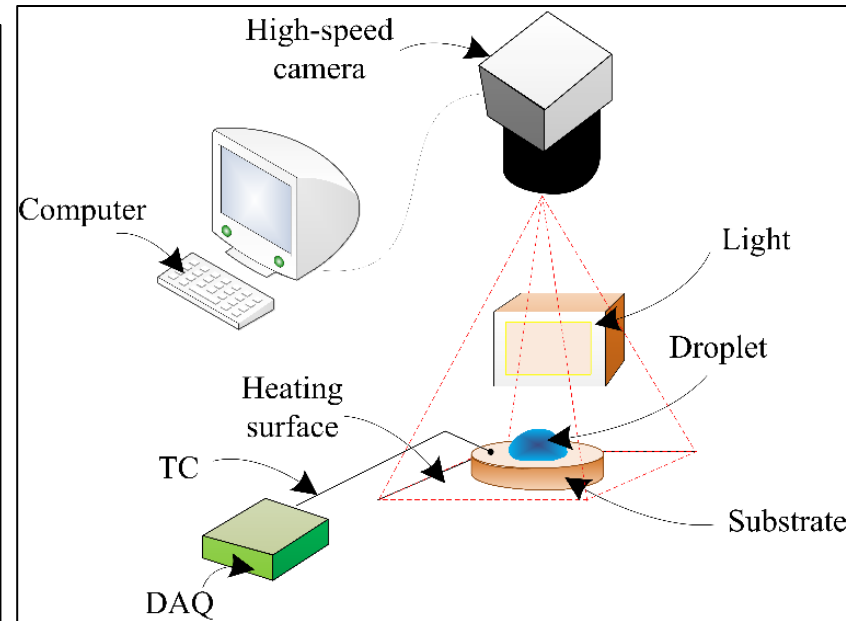
[2] Kuznetsov GV, et al. *Int J Therm Sci* 2016;108:218–34.

Экспериментальные методики

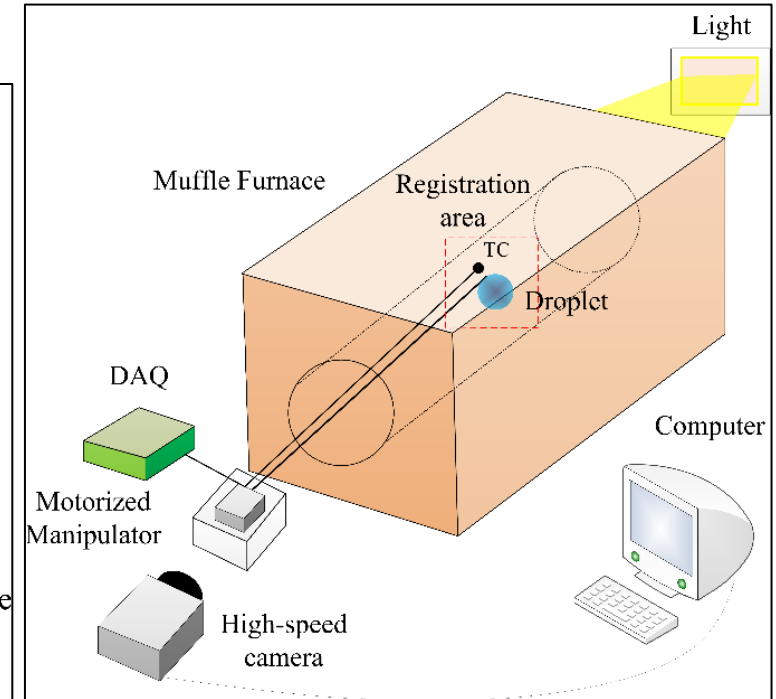
3. Фрагментация [1]



(a)



(b)



(c)

Схемы стан­дов для изу­чения фраг­мен­тации суспен­зий: а – на­грев в по­токе воз­ду­ха; б – на на­гретой под­лож­ке; с – на­грев в му­фель­ной пе­чи

Экспериментальные методики

4. Зажигание, горение, выбросы [1,2]

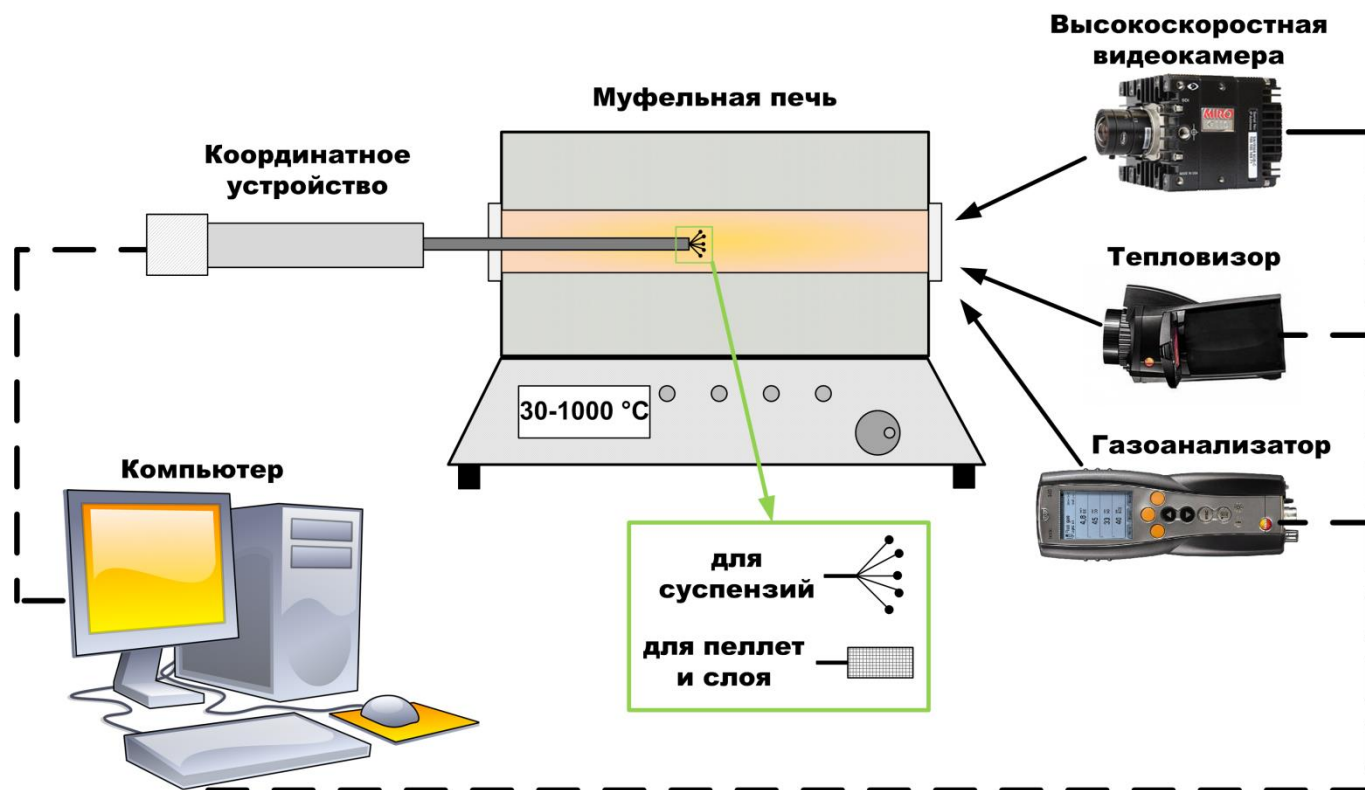


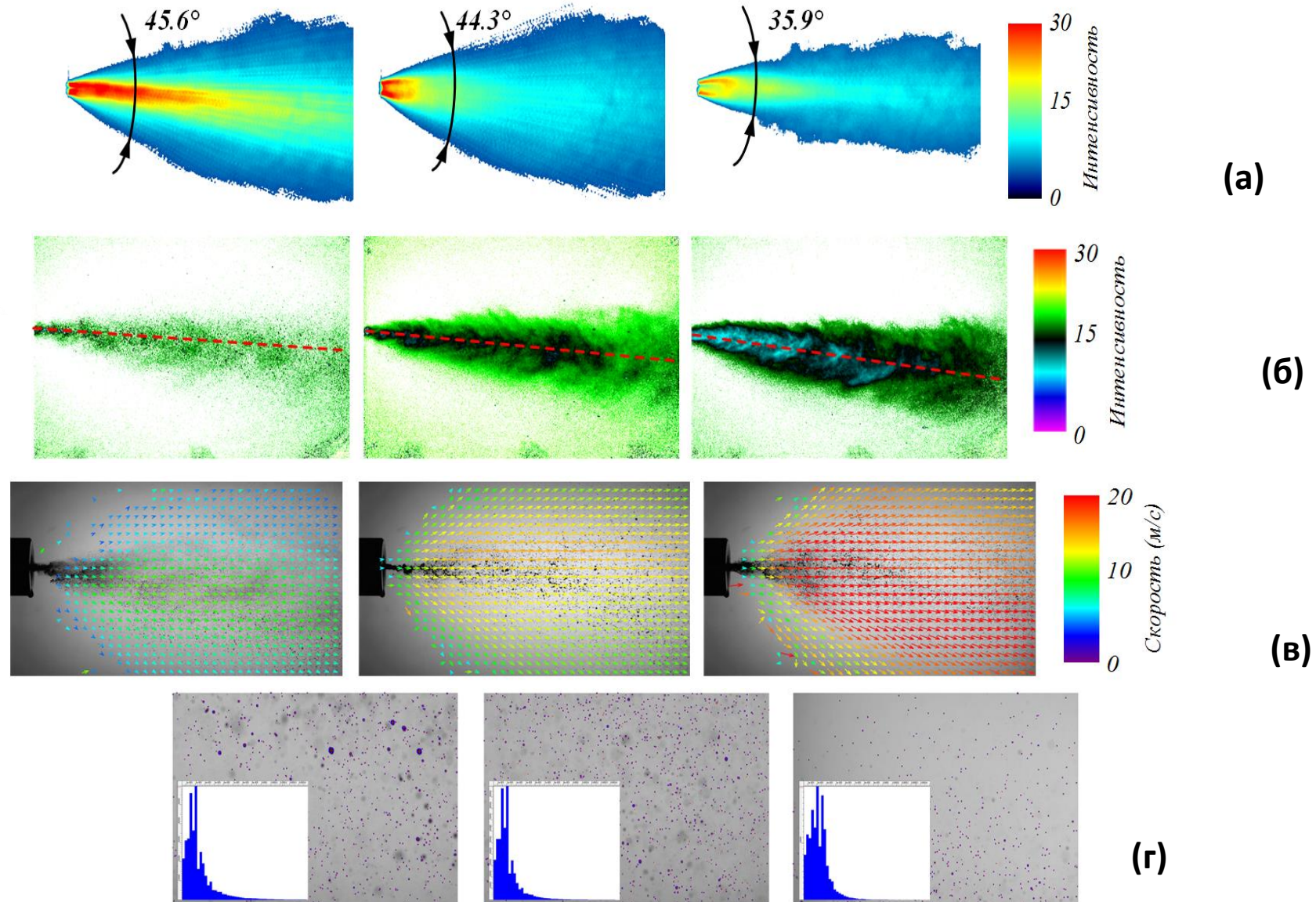
Схема стенда для изучения характеристик зажигания и горения суспензий

Оборудование	Характеристики
Видеокамера Phantom Miro C110 (совместно с ПО Phantom Camera Control)	Макс. скорость съемки при полном разрешении 1280x1024 - 915 кадр/с. Минимальная скорость съемки - 50 кадр/с. Разрешение: 1280x1024 пикс. Размер пикселя: 5.6 мкм. Размер сенсора: 9.18 мм (диагональ).
Тепловизор Testo 885-2	инфракрасное разрешение 320x240 пикселей; рабочие диапазоны: -30...+100 °C (переключаемый); 0...+350 °C (переключаемый); +350...+1200 °C (переключаемый)), погрешность измерения температуры ±2 °C
Газоанализатор Testo-340 Газоанализатор Test-1	CO ₂ – ±2% (приведенная погрешность); CO – ±5% (приведенная погрешность); NO, SO ₂ , CH ₄ – ±5% (относительная ошибка)
Весы аналитические Vibra AF 225 DRCE	дискретность 0.0001 г
Трубчатая муфельная печь (R50/250/13 Nabertherm GmbH)	Рабочая труба из керамики С 530, включая две волоконные заглушки в качестве стандартного оборудования. Температурный диапазон 30-1200 °C. Труба: 50 × 250 мм/

[1] Glushkov DO, et al. **Energy & Fuels** 2016;30:3441–50.

[2] Nyashina GS, Kurgankina MA, Strizhak PA. **Energy Convers Manag** 2018;174:175–87.

Распыление топливных композиций

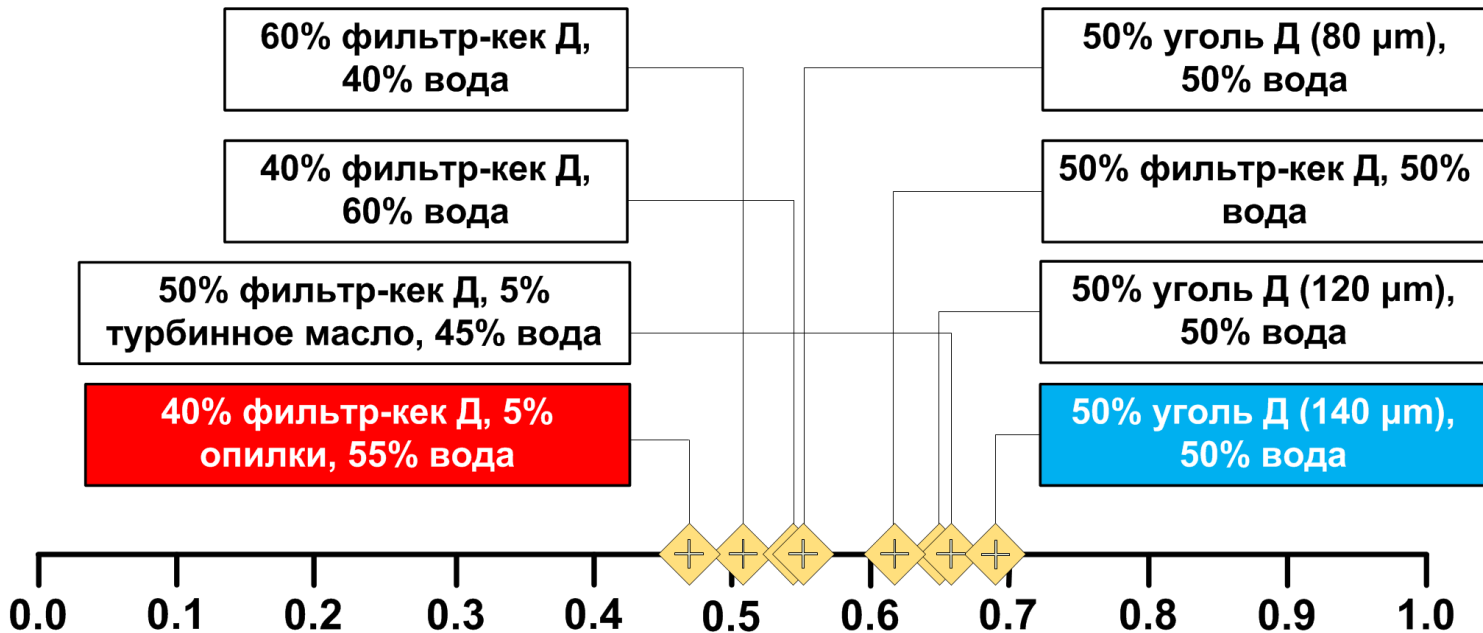


Типичные видеок cadры экспериментов и результаты исследований: а – угол раскрытия струи; б – траектории движения капель и форма струи; в – скорости движения капель; г – распределения капель по размерам

Распыление топливных композиций

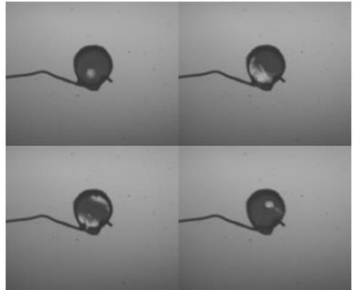
Параметры распыления суспензионных топлив

Состав	Расход воздуха (кг/ч)	Угол поворота устройства (рад)
Вода	70	1.57
40% кек Д, 5% опилки, 55% вода	70	4.71
50% кек Д, 5% турбинное масло, 45% вода	35	1.57
40% кек Д, 60% вода	50	1.57
50% кек Д, 50% вода	50	1.57
60% кек Д, 40% вода	70	1.57
50% уголь Д (80 мкм), 50% вода	50	1.57
50% уголь Д (120 мкм), 50% вода	70	1.57
50% уголь Д (140 мкм), 50% вода	70	1.57

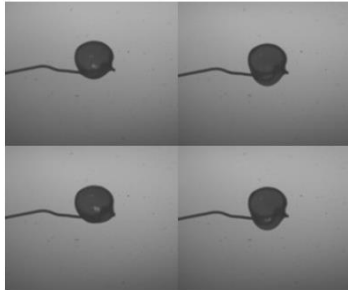


Значения интегрального показателя эффективности распыления суспензий (каждая составляющая имеет одинаковый весовой коэффициент)

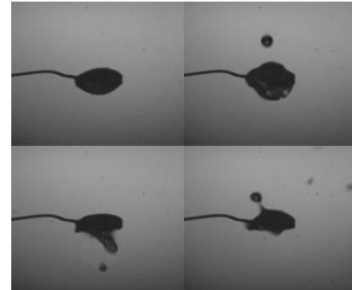
Фрагментация капель топливных суспензий



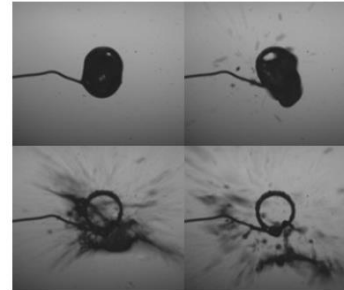
Монотонное испарение



Кипение



Паффинг



Микро-взрыв

Распыление считалось тем эффективнее, чем меньше времени занимало дробление и чем больше было соотношение S_1/S_0

Типичные кадры видеogramм, иллюстрирующие четыре механизма протекания физико-химических процессов при нагревании капель многокомпонентных составов

Среди всех рассмотренных условий (схема и механизм нагрева, температура и др.) и вариаций компонентного состава топлива наименьшим временем дробления капель (4.67 с) характеризовалась суспензия «**50% уголь Д, 45% вода. 5% опилки**» при нагреве в муфельной печи при температуре 700 °С.

Наибольшее соотношение $S_1/S_0=31.25$ достигнуто при нагреве состава «**49.9% уголь Д, 0.1% ксантановая камедь, 50% вода**» в муфельной печи при температуре 800 °С.

*Наибольшей эффективностью дробления (0.723) характеризовался состав «**49.9% уголь Д, 0.1% ксантановая камедь, 50% вода**» при нагреве в муфельной печи при 800 °С*

Вязкость и стабильность топливных композиций [1]

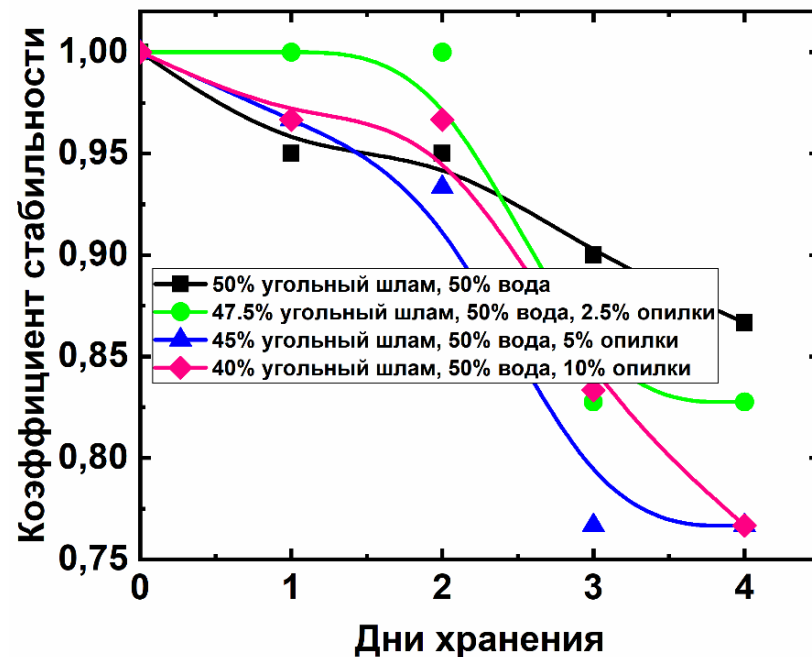


(а)

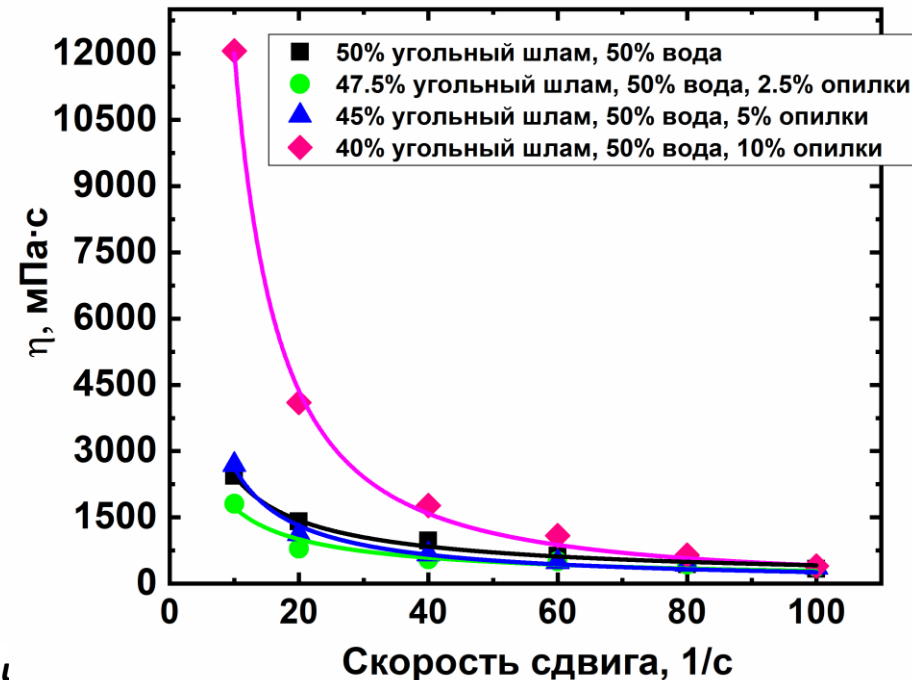


(б)

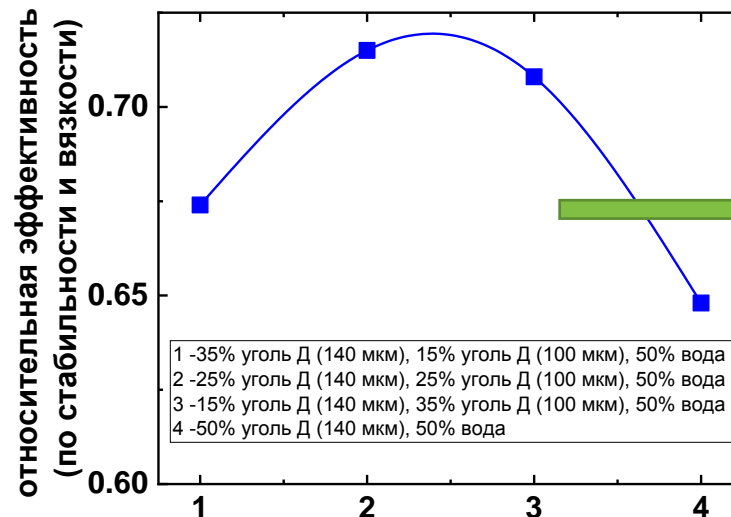
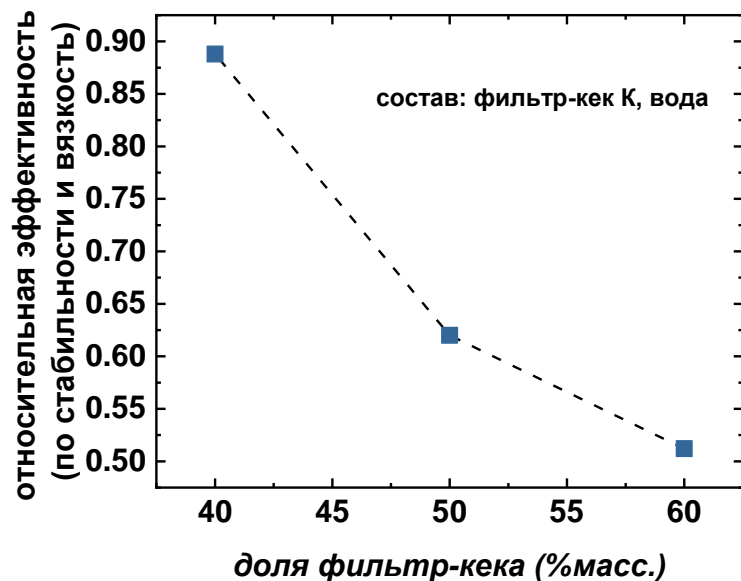
Внешний вид топливных суспензий на основе отхода углеобогащения (а) и угольной пыли (б)



Зависимость вязкости суспензии от скорости сдвига при варьировании доли биомассы



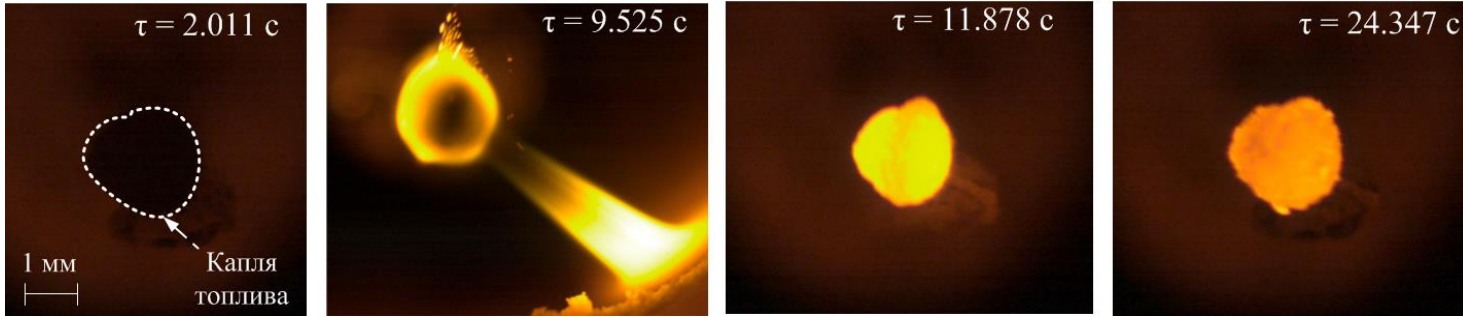
Зависимость вязкости от скорости сдвига для суспензий с добавкой биомассы



Полидисперсность увеличивает относительную эффективность

[1] Kuznetsov G.V., Romanov D.S., Vershinina K.Y., Strizhak P.A. Fuel. 2021. V. 302. Article number 121203.

Зажигание и горение топливных композиций



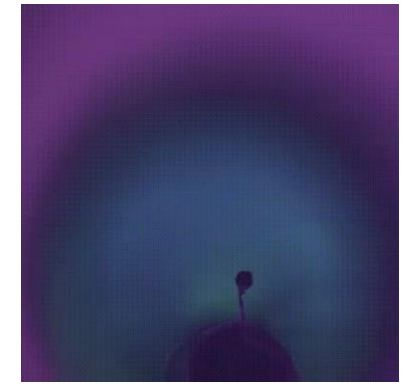
Видеокадры горения капли суспензионного топлива (45% фильтр-кек Д, 5% ореховая шелуха, 50% вода) при 700 °С

Среди смесей на основе фильтр-кеков наибольшим значением интегрального показателя характеризуется смесь «**50% фильтр-кек Д, 35% вода, 15% турбинное масло**» (**0.726**).

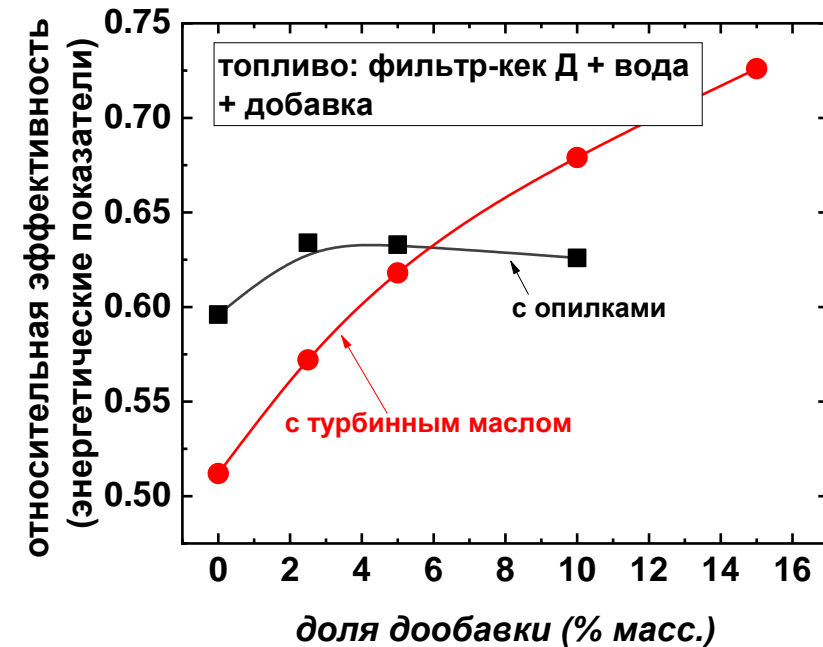
Топливо с составом «**50% уголь Д, 49% вода, 1% неонол**» стало наилучшим (**0.713**) по комплексу энергетических характеристик среди смесей на основе каменного угля.



Горение одиночной капли суспензионного топлива с добавкой рапсового масла (1% масс.)



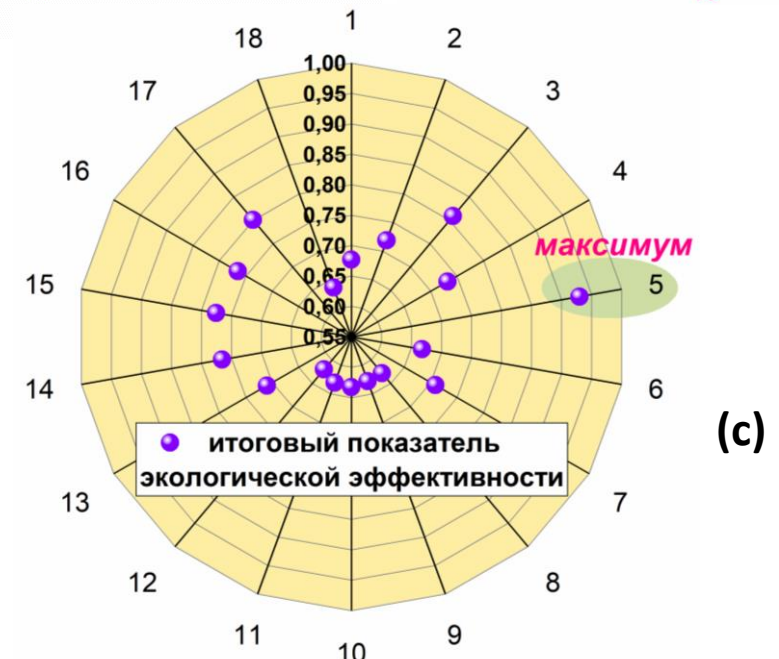
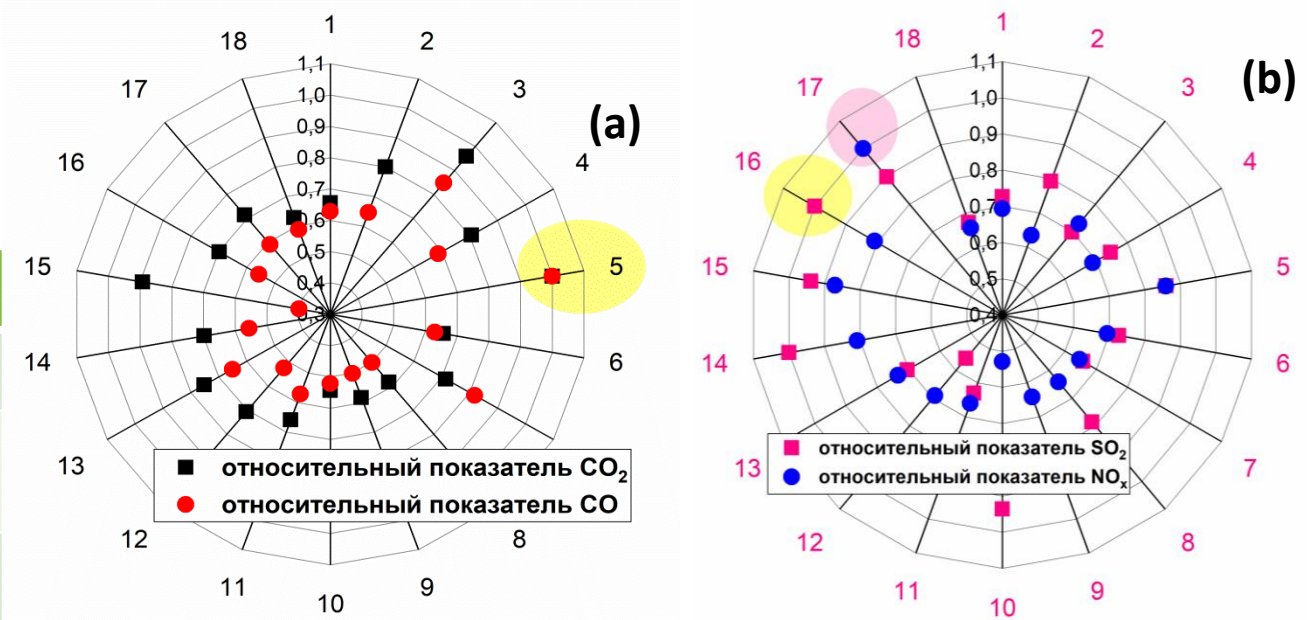
Горение одиночной капли суспензионного топлива с добавкой турбинного масла (5% масс.) [1]



Выбросы при сжигании суспензий

Табл. 1. Интегральный показатель экологической эффективности сжигания суспензий

№	Состав	Значение показателя	№	Состав	Значение показателя
1	50% фильтр-кек Д, 50% вода	0.677	10	50% бурый уголь (80 мкм), 50% вода	0.633
2	50% фильтр-кек Т, 50% вода	0.719	11	50% фильтр-кек Д, 45% вода, 5% турбинное масло	0.63
3	50% фильтр-кек К, 50% вода	0.809	12	50% фильтр-кек Д, 40% вода, 10% турбинное масло	0.62
4	50% фильтр-кек СС, 50% вода	0.732	13	50% уголь Д, 50% вода	0.71
5	50% фильтр-кек Г, 50% вода	0.93	14	45% фильтр-кек К, 50% вода, 5% опилки	0.765
6	50% фильтр-кек Ж, 50% вода	0.667	15	40% фильтр-кек К, 50% вода, 10% опилки	0.775
7	60% фильтр-кек К, 40% вода	0.709	16	45% фильтр-кек Д, 50% вода, 5% опилки	0.765
8	50% бурый уголь (140 мкм), 50% вода	0.628	17	45% фильтр-кек Д, 50% вода, 5% арахисовая шелуха	0.801
9	50% бурый уголь (100 мкм), 50% вода	0.628	18	50% фильтр-кек Д, 47.5% вода, 2.5% турбинное масло	0.636



Относительные (a, b) и интегральный (c) экологические показатели сжигания суспензий (номера лучей радиальных диаграмм соответствуют номерам топлив из табл. 1)

Итоговый показатель эффективности топлив

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 ($A_1, A_2, A_3...A_6$) с равными весовыми коэффициентами ($a_1, a_2, a_3...a_6$):

$$D = \sum A_n \cdot a_i$$

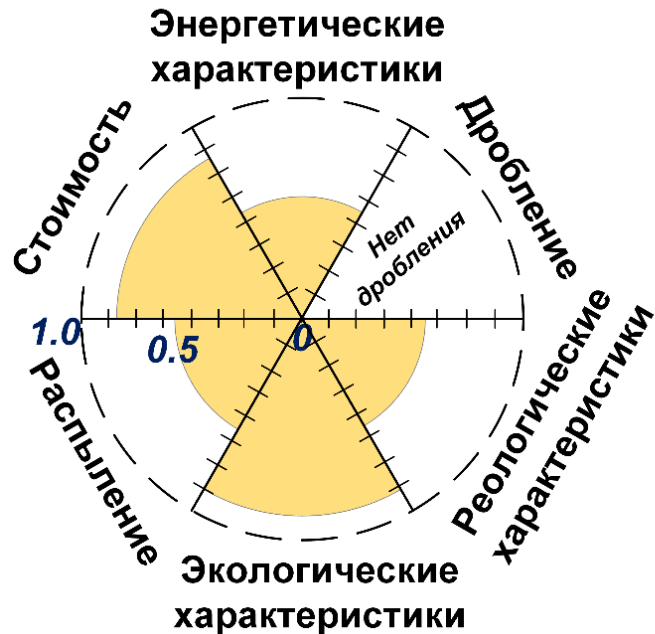
2. Приоритет распределяется неравномерно. В этом случае приоритет с соответствующим весовым коэффициентом 0.5 отдавался одному из шести интегральных показателей. Остальные пять составляющих получали равномерно распределенный весовой коэффициент (по 0.1).

Топлива с наибольшими и наименьшими значениями итоговой эффективности

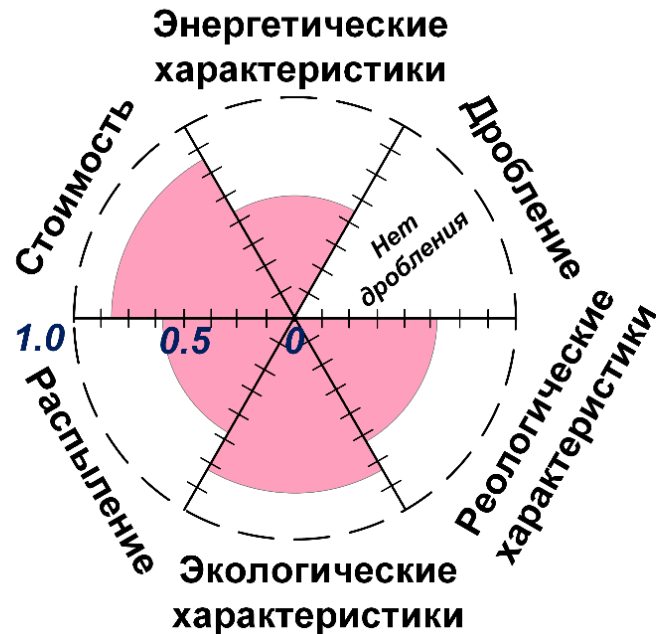
Приоритет	Наилучшее топливо	Наихудшее топливо
Равный для всех категории параметров	50% фильтр-кек Г, 50% вода (0.592)	50% фильтр-кек Д, 40% вода, 10% турбинное масло (0.399)
Стоимость	50% фильтр-кек Г, 50% вода (0.690)	50% фильтр-кек Д, 40% вода, 10% турбинное масло (0.252)
Энергетические характеристики	50% бурый уголь (80 мкм), 50% вода (0.677)	45% фильтр-кек Д, 50% вода, 5% арахисовая шелуха (0.479)
Экологические характеристики	50% фильтр-кек Г, 50% вода (0.727)	50% фильтр-кек Д, 40% вода, 10% турбинное масло (0.487)
Реологические характеристики	50% фильтр-кек Д, 50% вода (0.679)	50% фильтр-кек Д, 40% вода, 10% турбинное масло (0.450)
Дробление и фрагментация	50% бурый уголь (80 мкм), 50% вода (0.447)	50% фильтр-кек Д, 40% вода, 10% турбинное масло (0.239)
Распыление	50% фильтр-кек Г, 50% вода (0.593)	50% уголь Д (140 мкм), 50% вода (0.364)

Итоговый показатель эффективности топлив [1]

50% фильтр-кек Г,
50% вода
Общий показатель
эффективности = 0.591



50% фильтр-кек К,
50% вода
Общий показатель
эффективности = 0.577



50% фильтр-кек Д,
50% вода
Общий показатель
эффективности = 0.576



Составляющие итогового показателя эффективности для трех наилучших суспензий

[1] Dorokhov V.V., Kuznetsov G.V., Vershinina K.Y., Strizhak P.A. Relative energy efficiency indicators calculated for high-moisture waste-based fuel blends using multiple-criteria decision-making // *Energy*. 2021;234:article number 121257.

Основные результаты и выводы

- 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.
- 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.
- 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.
- 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.

Спасибо за внимание



Стрижак Павел Александрович
доктор физико-математических наук, профессор

Томский политехнический университет
<http://tpu.ru>, <http://hmtslab.tpu.ru>,
e-mail: pavelspa@tpu.ru

