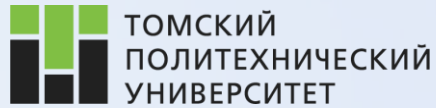


Всероссийская конференция «XXXVII Сибирский теплофизический семинар», 14–16 сентября 2021, Новосибирск



tpu.ru

Характеристики совместной утилизации угольных и растительных отходов при сжигании в виде пеллет, слоя и капель суспензий

Вершинина К.Ю.

Дорохов В.В.,

Романов Д.С.,

Стрижак П.А.



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

Актуальность исследования



Исчерпаемость ресурсов



Антропогенные выбросы при сжигании топлив

Современные проблемы энергетики и экологии



Отходы промышленные и бытовые

Низкий уровень полезного использования отходов – $\approx 85\%$ отходов подвергается захоронению [1-4]

Скорость накопления промышленных отходов с учетом калорийности [5-10].

Наименование	Средняя скорость формирования в мире (млн т в год)	Теплота сгорания (МДж/кг)
Отходы нефтяного происхождения	не менее 400	8–40
Отработанные органические жидкости, отходы нефтехимии	не менее 100	20–35
Отходы производства и обогащения каменных углей	не менее 700	5–22
Древесные отходы (опилки, стружка, спил и т.д.)	не менее 180	8–20
Сельскохозяйственные растительные отходы	не менее 3000	4–16
Шлам очистки водопроводных сетей, колодцев, иловые отложения	не менее 130	4–12
Бумага, картон	не менее 180	14–15

- Key world energy statistics 2017. International Energy Agency.
- World Energy Resources. World Energy Council, 2016.
- 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.
- Global waste management outlook. United Nations Environment Programme, 2015.
- 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.
- Sludge Management Opportunities in growing volumes, disposal restrictions and energy recovery. Global Water Intelligence, 2012.

- Global waste management outlook. United Nations Environment Programme, 2015.
- Рынок утилизации отходов. 2018. Национальный исследовательский университет Высшая школа экономики.
- Отходы в графиках и диаграммах – 3.0. 2012. Секретариат Базельской конвенции. International Environment House.
- World Energy Resources. World Energy Council, 2016.

Актуальность исследования

Низкосортные компоненты и отходы в качестве компонентов топлив



- Прямое раздельное сжигание (моносжигание) [1]
- Совместное сжигание совокупности видов отходов [2,3]
- Сжигание в составе водосодержащей суспензии [4,5]



1. Kang S.B., Oh H.Y., Kim J.J., Choi K.S. Characteristics of spent coffee ground as a fuel and combustion test in a small boiler (6.5 kW) // Renewable Energy. 2017. Vol. 113. Pp. 1208–1214.
2. Петухов В.Н., Свечникова Н.Ю., Юдина С.В., Горохов А.В., Лавриненко А.А., Харченко В.Ф. Использование отходов флотации угля для энергетических целей в условиях ОАО ЦОФ «Беловская». Кокс и химия. 2016. № 5. С. 38–41.
3. Zhou C., Liu G., Fang T., Lam P.K.S. Investigation on thermal and trace element characteristics during co-combustion biomass with coal gangue. Bioresource Technology. 2015. No. 175. Pp. 454–462.
4. Zhao X., Zhu W., Huang J., Li M., Gong M. Emission characteristics of PCDD/Fs, PAHs and PCBs during the combustion of sludge-coal water slurry. Journal of the Energy Institute. 2015. Vol. 88, No. 2. Pp. 105–111.
5. D.O. Glushkov, A.I. Matiushenko, A.E. Nurpeiis, A.V. Zhuikov. An experimental investigation into the fuel oil-free start-up of a coal-fired boiler by the main solid fossil fuel with additives of brown coal, biomass and charcoal for ignition enhancement. Fuel Processing Technology. 2021. V. 223. Article number 106986. DOI: 10.1016/j.fuproc.2021.106986

Цель, новизна и практическая значимость исследования

Настоящая работа фокусируется на **экспериментальном исследовании проблем утилизации угольного шлама в комбинации с биомассой и маслами** (растительными и индустриальными) при сжигании в виде **пеллета, монослоя, капель суспензии**.

Научная новизна исследований состоит в комплексном анализе всех основных характеристик процессов воспламенения и горения одних и тех же компонентов, но сжигаемых в разных формах, а именно в виде пеллета, слоя и капель суспензий.

Результаты работы имеют значение для:

- обоснования целесообразности совместного сжигания отходов;
- выявления недостатков и преимуществ разных способов совместного сжигания отходов;
- проектирования котлов и печей, выбора способа подачи и распределения воздуха для горения, систем подачи топлива и удаления шлака и золы.

Компоненты топливных смесей

Базовый компонент: угольный шлам

(отход флотационного углеобогащения, фабрика «Северная» Кузнецкого угольного бассейна).



Добавки:

- сосновые опилки;
- отработанное турбинное масло;
- рапсовое масло.

Табл. 1. Свойства твердых компонентов топлив [1,2]

Компонент	W^a , %	A^d , %	V^{daf} , %	Q , МДж/кг	C^{daf} , %	H^{daf} , %	N^{daf} , %	S_t^d , %	O^{daf} , %
Угольный шлам	–	24.46	23.08	24.83	87.20	5.09	2.05	1.02	4.46
Опилки сосновые	6.05	1.5	72.35	18.25	49.56	5.91	0.19	0.64	42.54

Табл. 2. Свойства масел [1,2]

Масло	Плотность при 20 °С	Зольность, %	Температура вспышки, °С	Температура зажигания, °С	Теплота сгорания, МДж/кг
Турбинное	868	0.03	175	193	44.9
Рапсовое	911	0.03	242	-	39.5

Подготовка компонентов и образцов смесевых топлив

- Угольный шлам просушивался в муфельной печи при температуре 105 °С в течение 2.5 часов.
- Угольный шлам просеивался для выделения фракции с размером частиц 100–140 мк
- Древесные опилки измельчались в роторной мельнице Pulverisette-14.
- Полученный древесный порошок просеивался для выделения фракции с размером частиц 100–140 мкм.



Табл. 3. Состав топливных смесей с указанием способа сжигания

Базовые топлива		
100% угольный шлам (пеллет)	100% угольный шлам (слой)	50% угольный шлам, 50% вода (суспензия)
Топливные смеси с добавкой турбинного масла		
95% угольный шлам, 5% турбинное масло (пеллет)	95% угольный шлам, 5% турбинное масло (слой)	45% угольный шлам, 50% вода, 5% турбинное масло (суспензия)
Топливные смеси с добавкой рапсового масла		
95% угольный шлам, 5% рапсовое масло (пеллет)	95% угольный шлам, 5% рапсовое масло (слой)	45% угольный шлам, 50% вода, 5% рапсовое масло (суспензия)
Топливные смеси с добавкой опилок		
95% угольный шлам, 5% опилки (пеллет)	95% угольный шлам, 5% опилки (слой)	45% угольный шлам, 50% вода, 5% опилки (суспензия)

Подготовка компонентов и образцов смесевых топлив

Под **слоем топлива** понималась сухая смесь компонентов, полученная простым смешиванием.

Под **суспензией** понималась гомогенная текучая смесь жидких и твердых компонентов. Для ее приготовления использовалась магнитная мешалка AIBOTE ZNCLBS-2500.

Изготовление **пеллет** проводилась с помощью пресс-формы и гидравлического пресса.

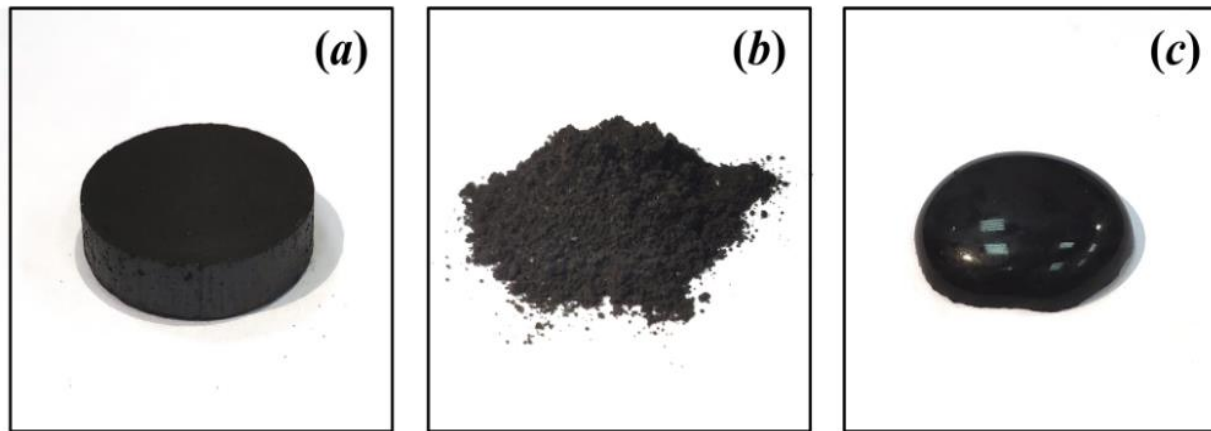


Рис. 1. Образцы топлива на основе угольного шлама: *a* – пеллет; *b* – слой; *c* – суспензия

Экспериментальный стенд

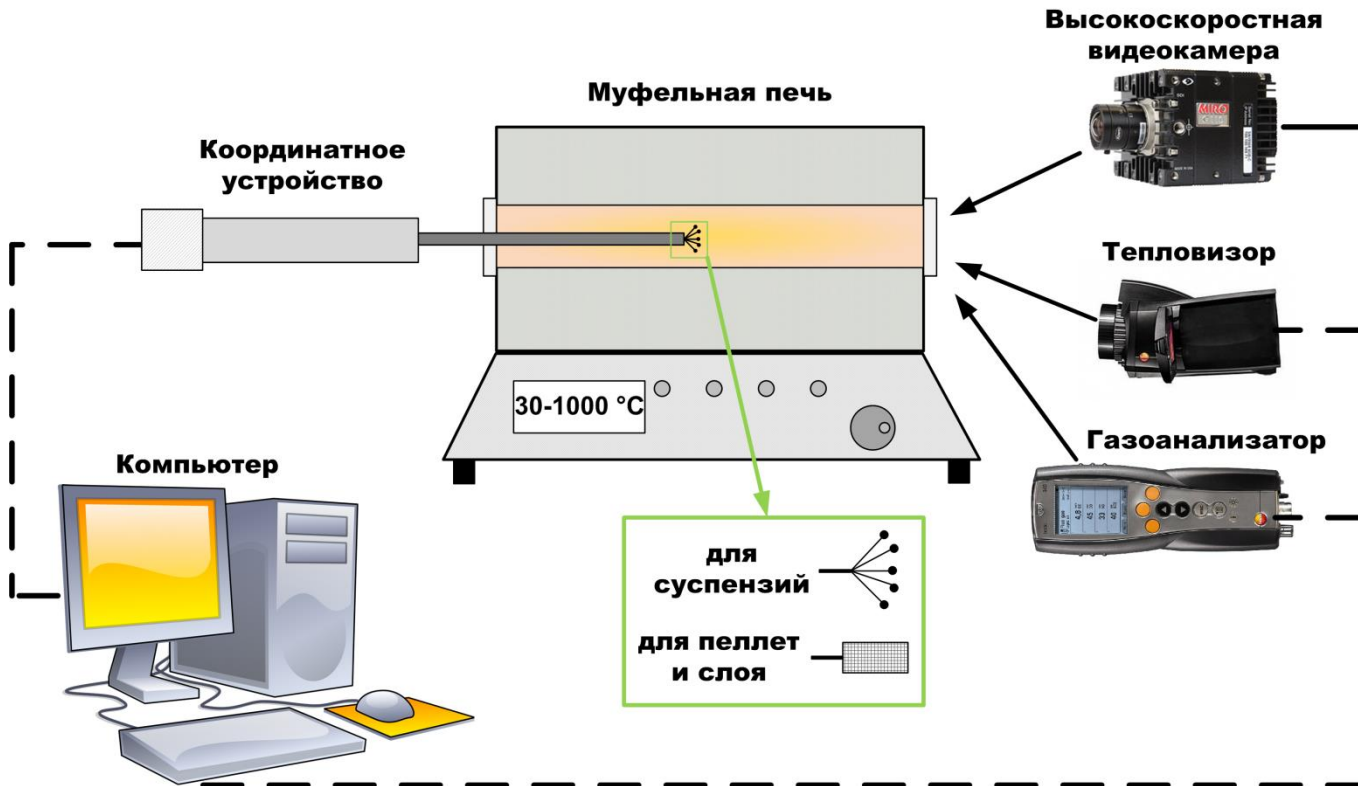


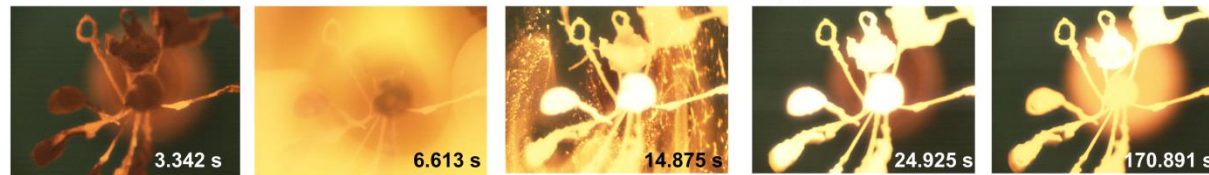
Рис. 2. Схема экспериментального стенда [1,2]

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); 0...+650 °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. D.O. Glushkov, R.I. Egorov, D.M. Klepikov. High-speed contactless measurements of temperature evolution during ignition and combustion of coal-based fuel pellets. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2021. V. 175. Article number 121359. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121359
2. G.V. Kuznetsov, G.S. Nyashina, P.A. Strizhak, T.R. Valiullin. Experimental research into the ignition and combustion characteristics of slurry fuels based on dry and wet coal processing waste. Journal of the Energy Institute. 2021. V. 97. Pp. 213–224. DOI: 10.1016/j.joei.2021.05.001

Стадийность зажигания и горения топлив

45% угольный шлам, 5% опилки, 50% вода (суспензия)



95% угольный шлам, 5% опилки (пеллет)



95% угольный шлам, 5% опилки (слой)

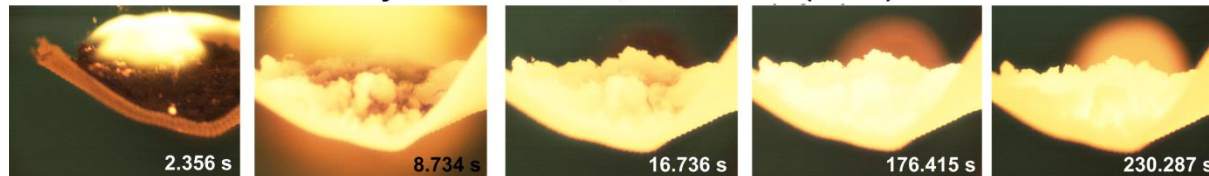
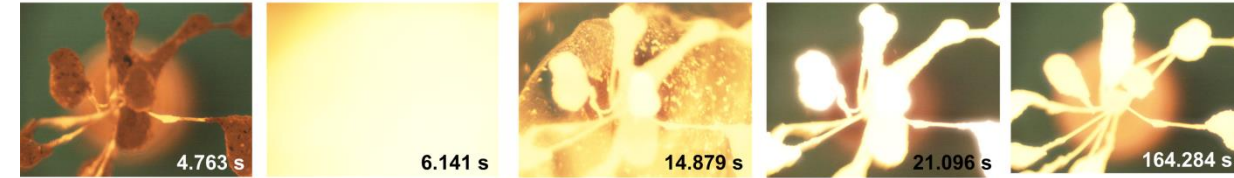
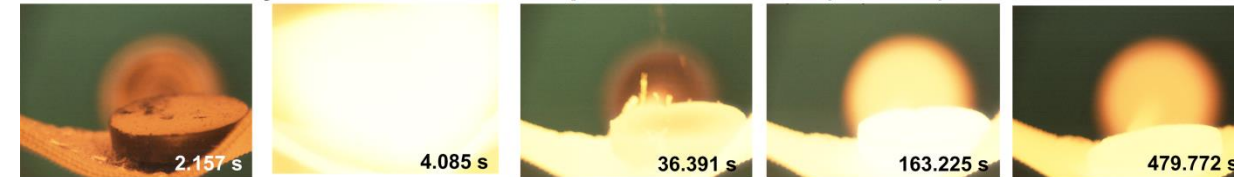


Рис. 3. Кадры горения угольного шлама с добавкой опилок, сжигаемого в виде капель суспензии, пеллета и слоя при 900 °С

45% угольный шлам, 5% рапсовое масло, 50% вода (суспензия)



95% угольный шлам, 5% рапсовое масло (пеллет)



95% угольный шлам, 5% рапсовое масло (слой)

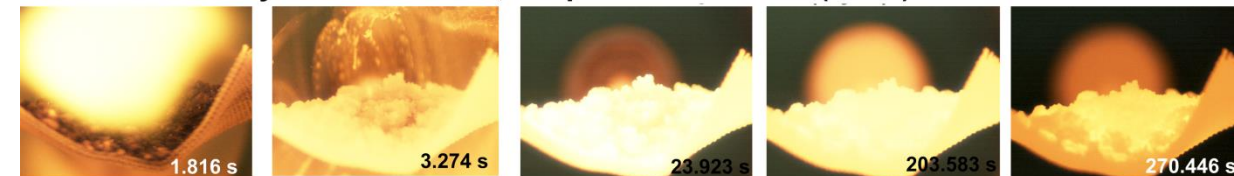
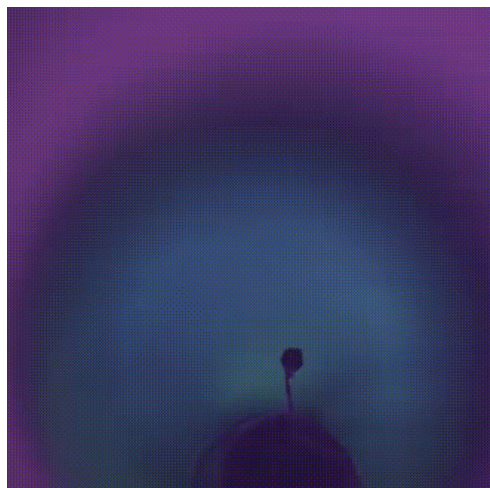
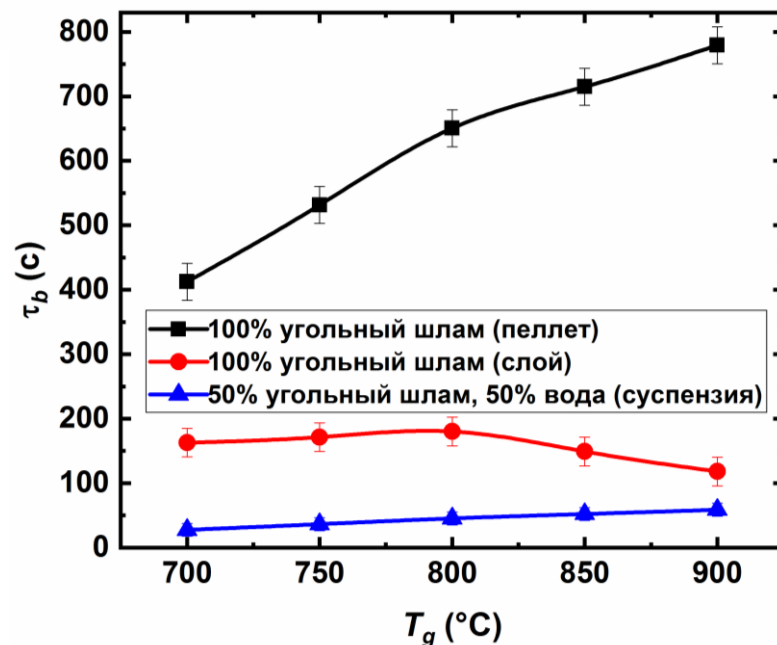
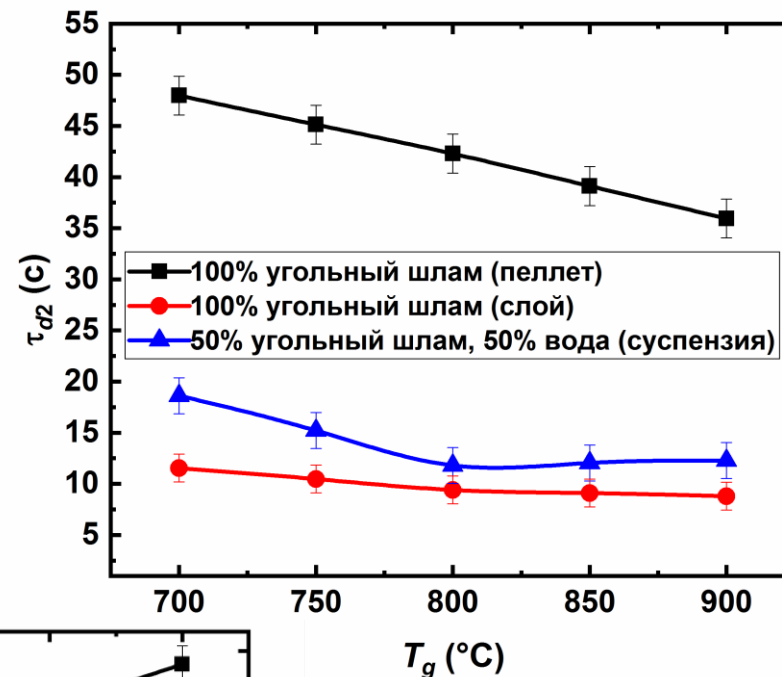
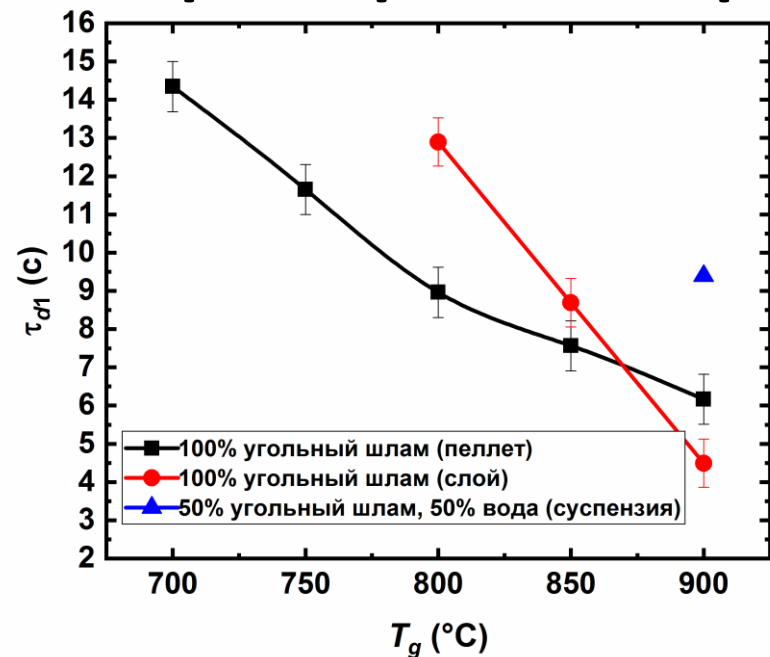


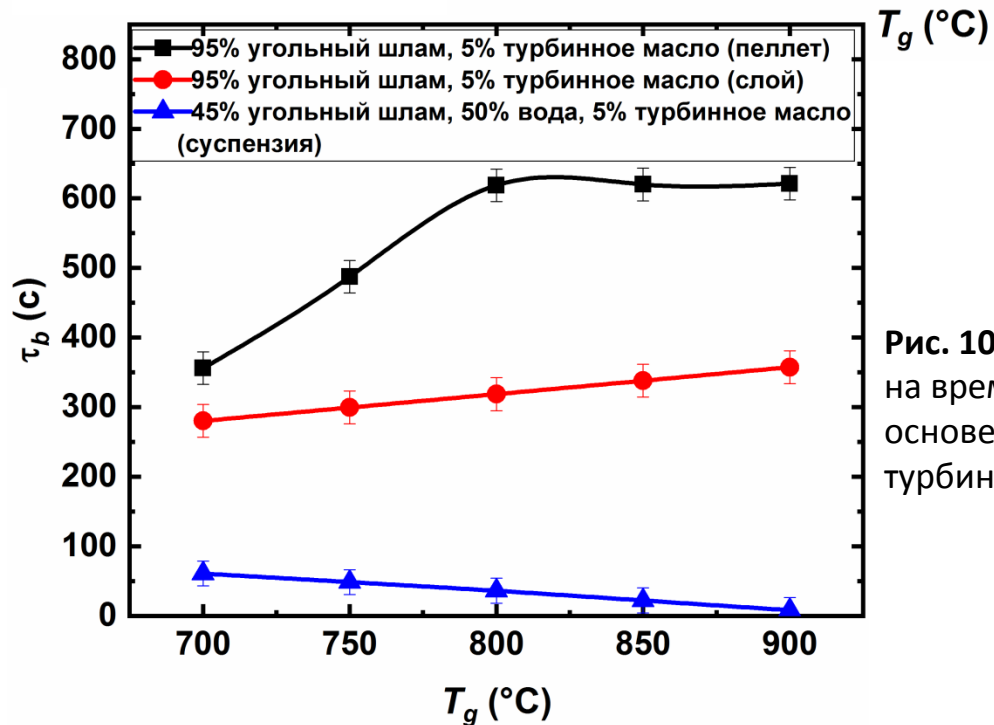
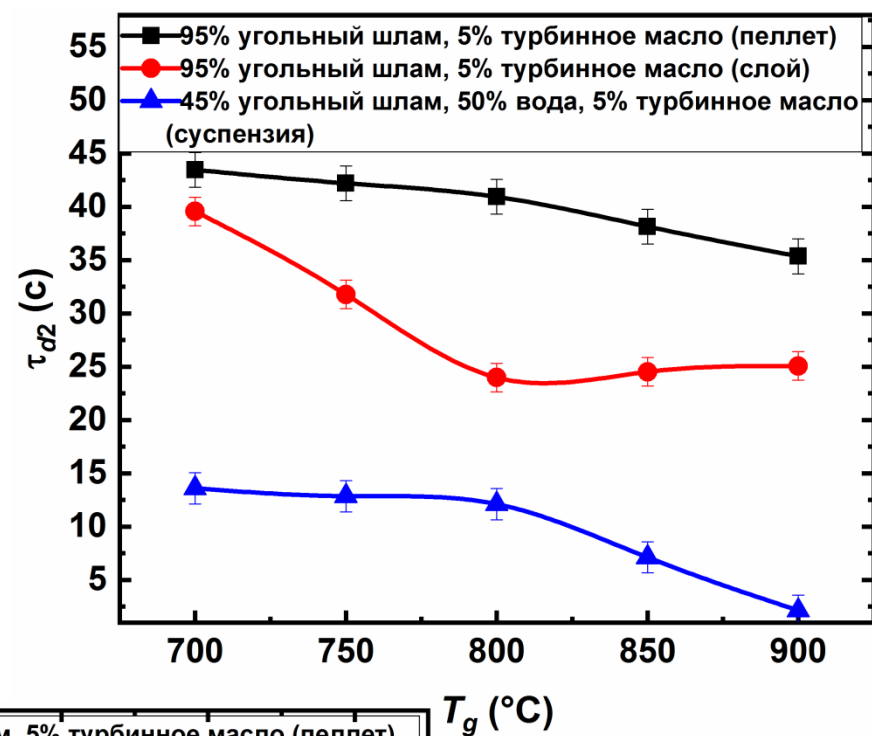
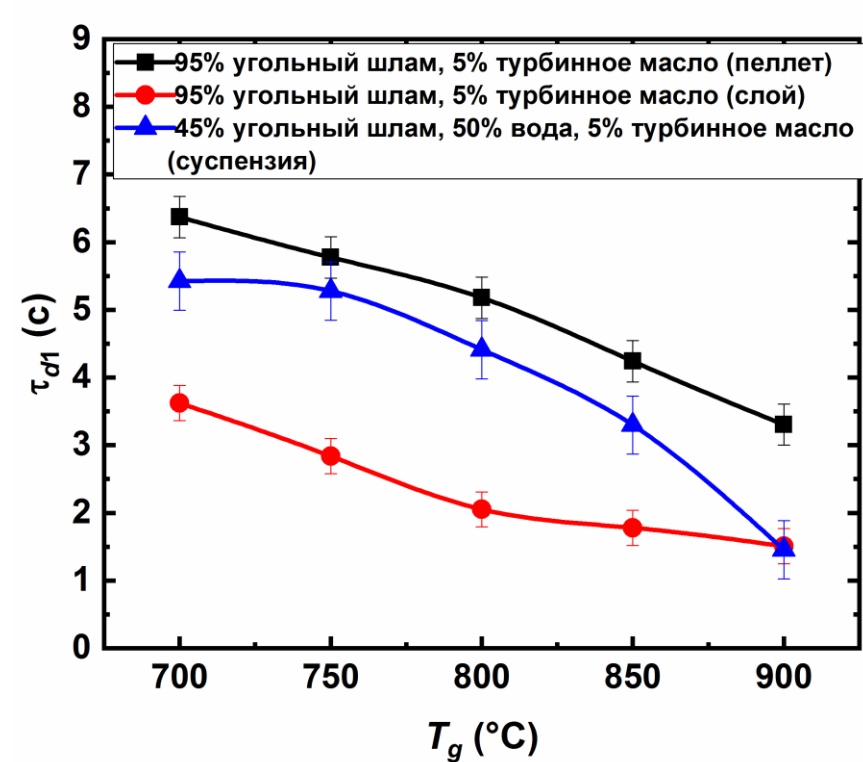
Рис. 4. Кадры горения угольного шлама с добавкой рапсового масла, сжигаемого в виде капель суспензии, пеллета и слоя при 900 °С

1. G.V. Kuznetsov, R.S. Volkov, P.A. Strizhak. Determining water content in a liquid fuel by the luminosity of its droplet. Chemical Engineering Science. 2021. V. 233. Article number 116415. DOI: 10.1016/j.ces.2020.116415
2. O.S. Gaydukova, S.Y. Misyura, P.A. Strizhak. Investigating regularities of gas hydrate ignition on a heated surface: Experiments and modelling. Combustion and Flame. 2021. V. 228. Pp. 78–88. DOI: 10.1016/j.combustflame.2021.01.028

Характеристики процессов зажигания и горения



Горение одиночной капли суспензионного топлива с добавкой турбинного масла [1]



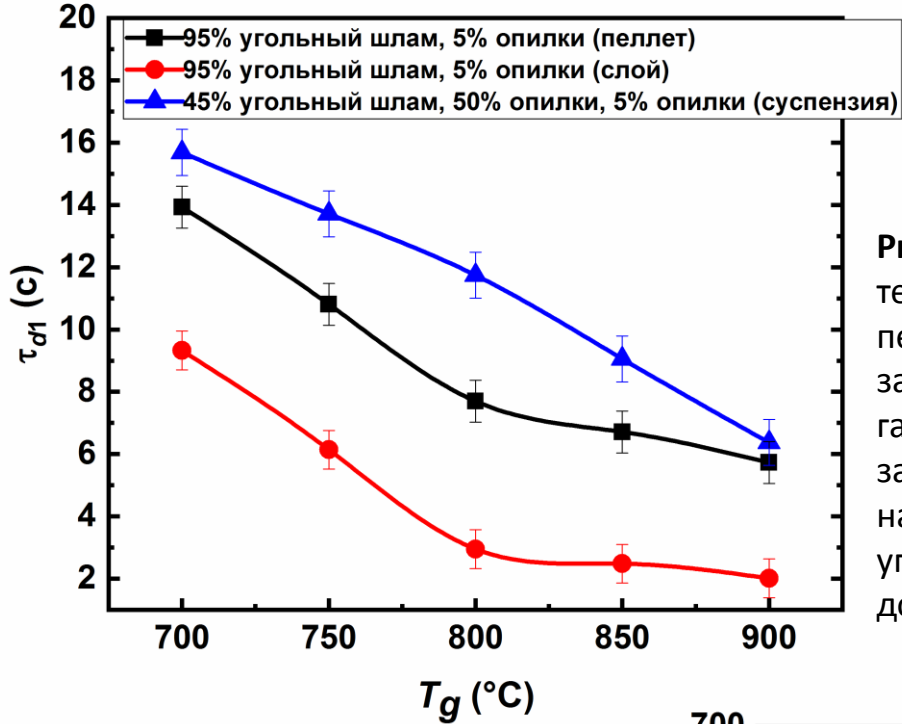


Рис. 11. Влияние температуры в печи на время задержки газофазного зажигания топлив на основе угольного шлама с добавкой опилок

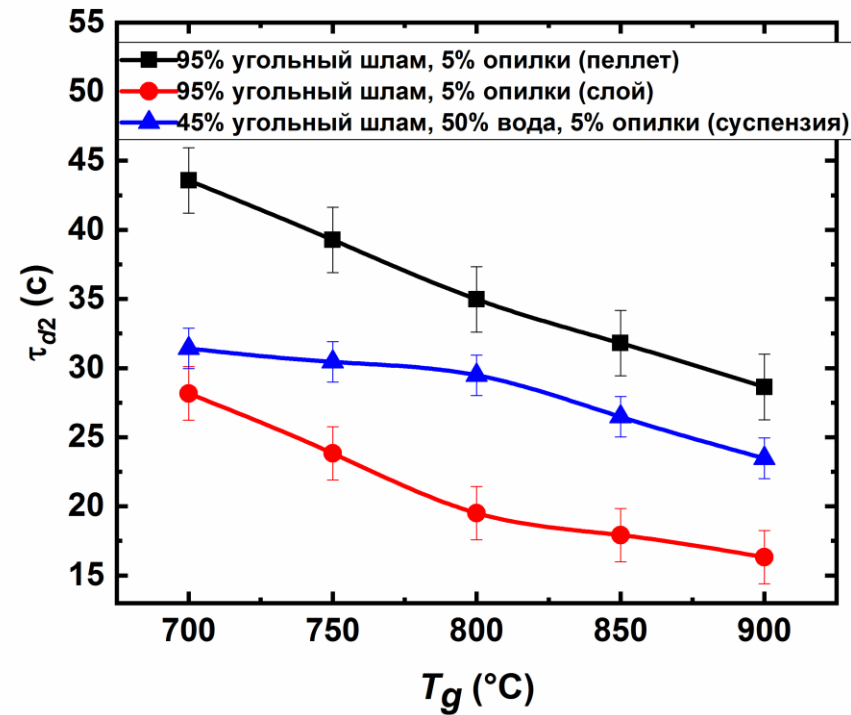


Рис. 12. Влияние температуры в печи на время задержки гетерогенного зажигания топлив на основе угольного шлама с добавкой опилок

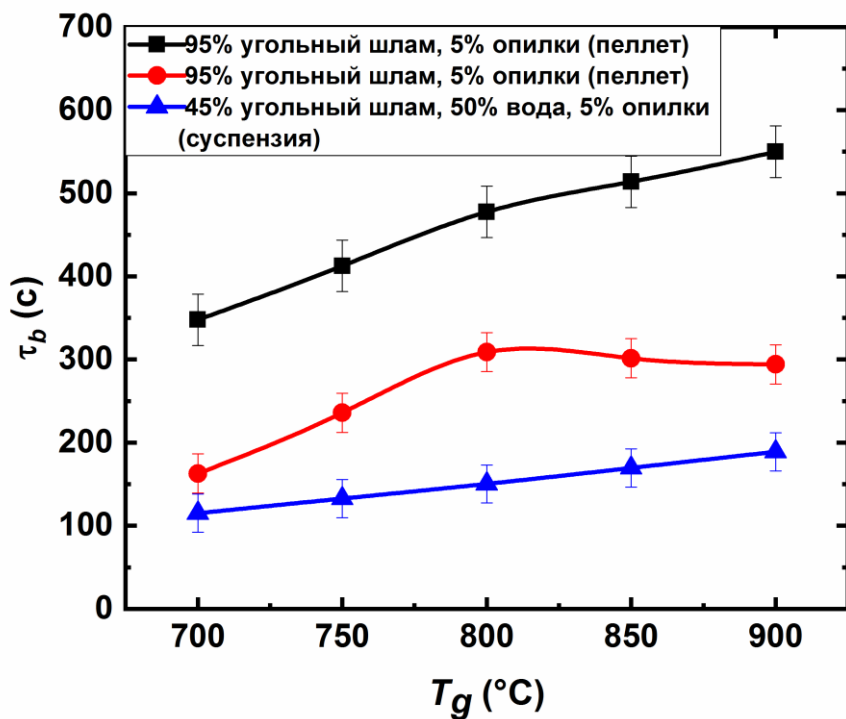


Рис. 13. Влияние температуры в печи на время выгорания топлив на основе угольного шлама с добавкой опилок

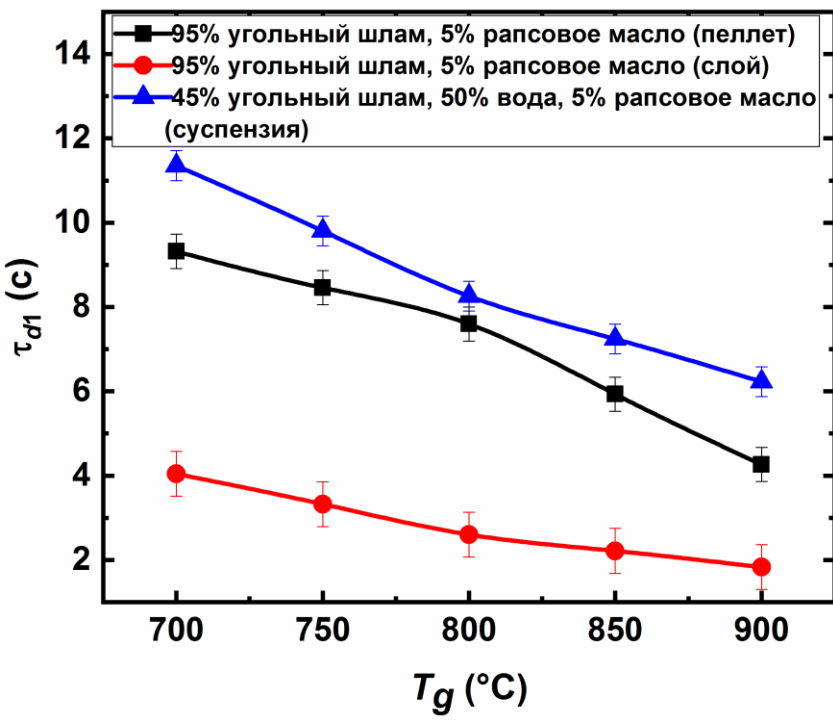


Рис. 14. Влияние температуры в печи на время задержки газофазного зажигания топлив на основе угольного шлака с добавкой рапсового масла

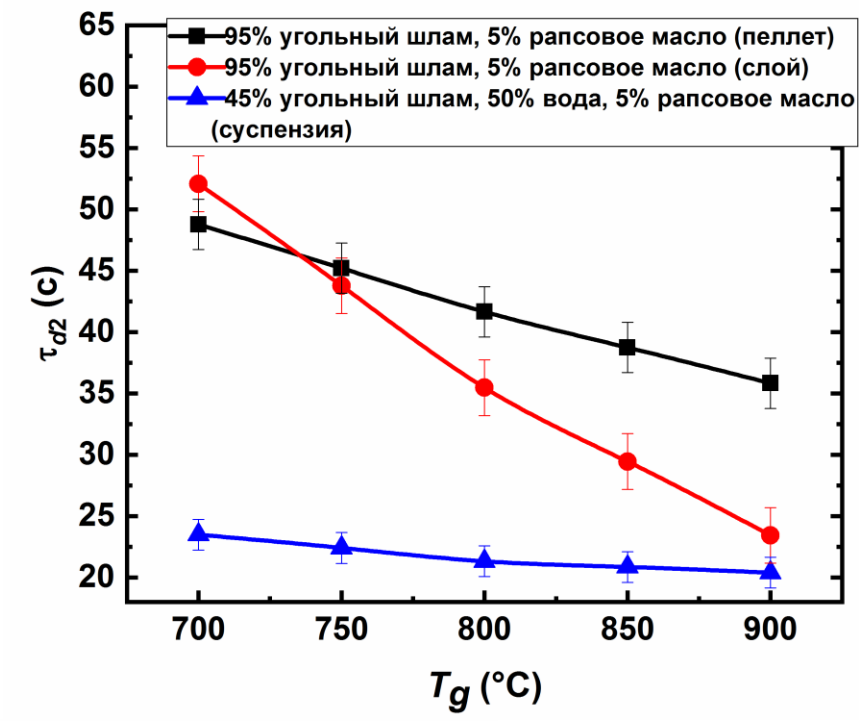


Рис. 15. Влияние температуры в печи на время задержки гетерогенного зажигания топлив на основе угольного шлака с добавкой рапсового масла

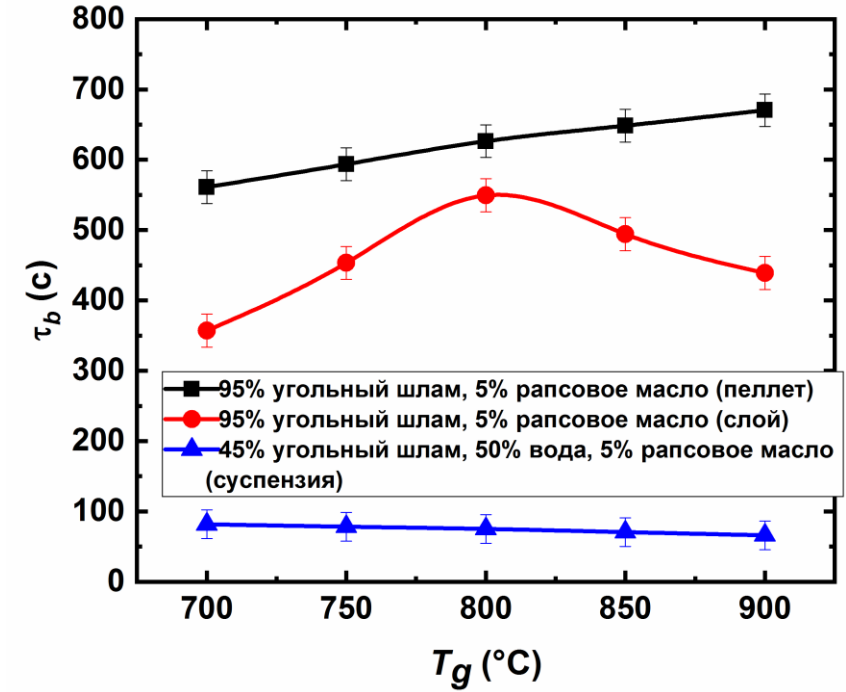


Рис. 16. Влияние температуры в печи на время выгорания топлив на основе угольного шлака с добавкой рапсового масла

Состав дымовых газов

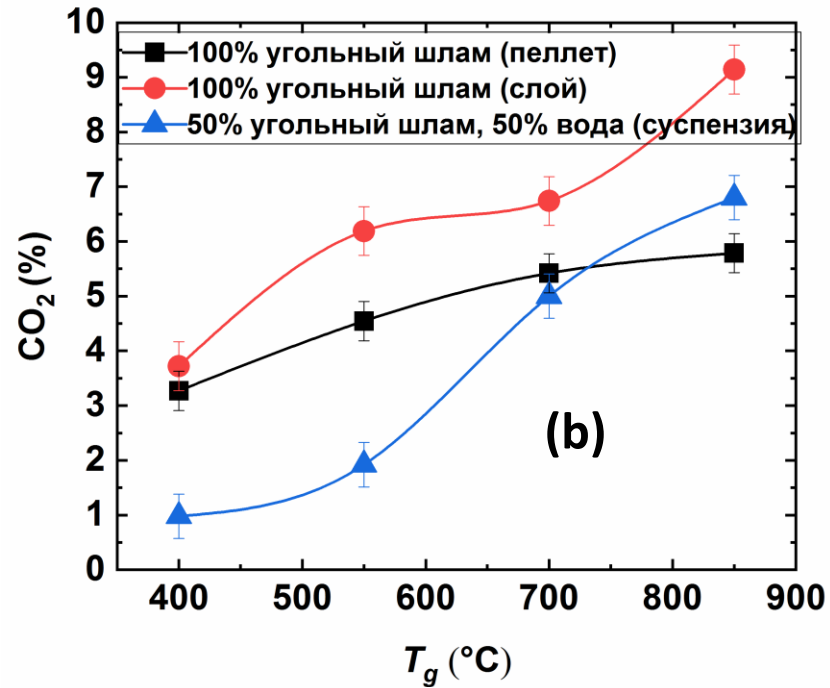
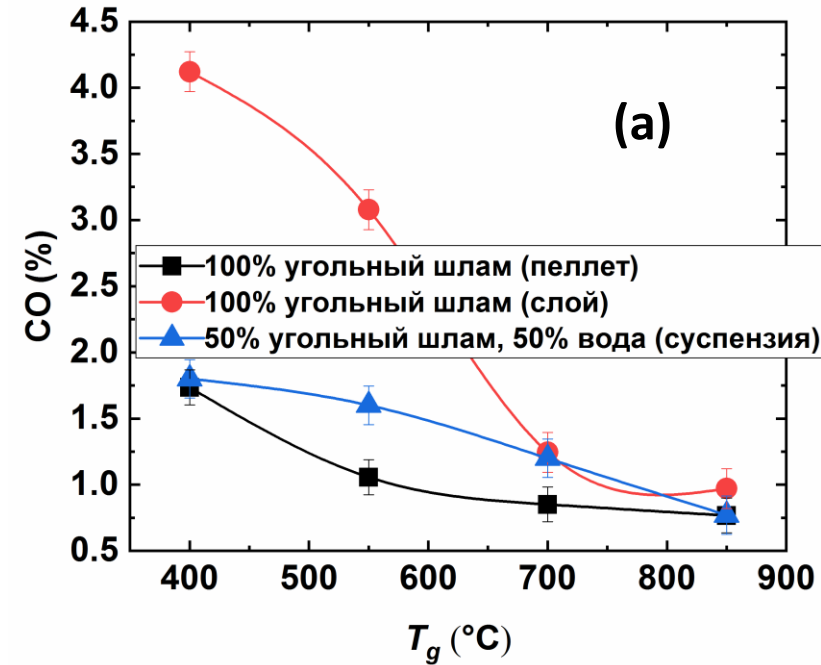


Рис. 17. Влияние температуры в печи на концентрацию CO (a) и CO₂ (b) в продуктах сгорания топлив на основе угольного шлама

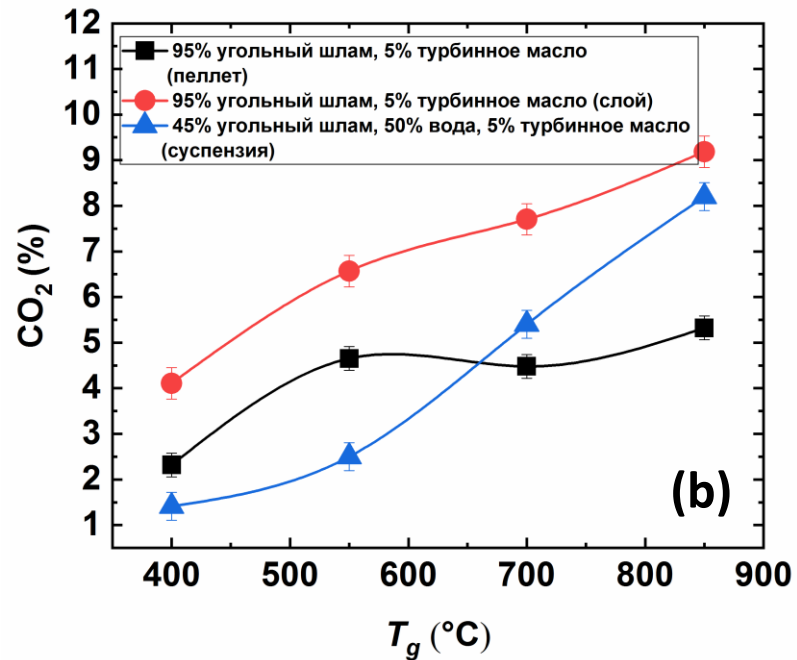
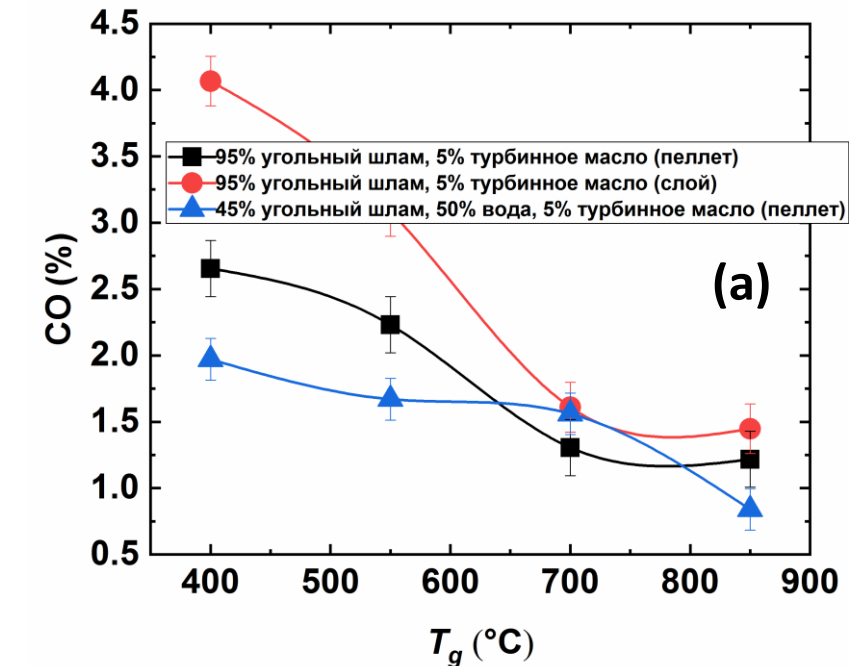


Рис. 18. Влияние температуры в печи на концентрацию CO (a) и CO₂ (b) в продуктах сгорания топлив на основе угольного шлама с добавкой турбинного масла

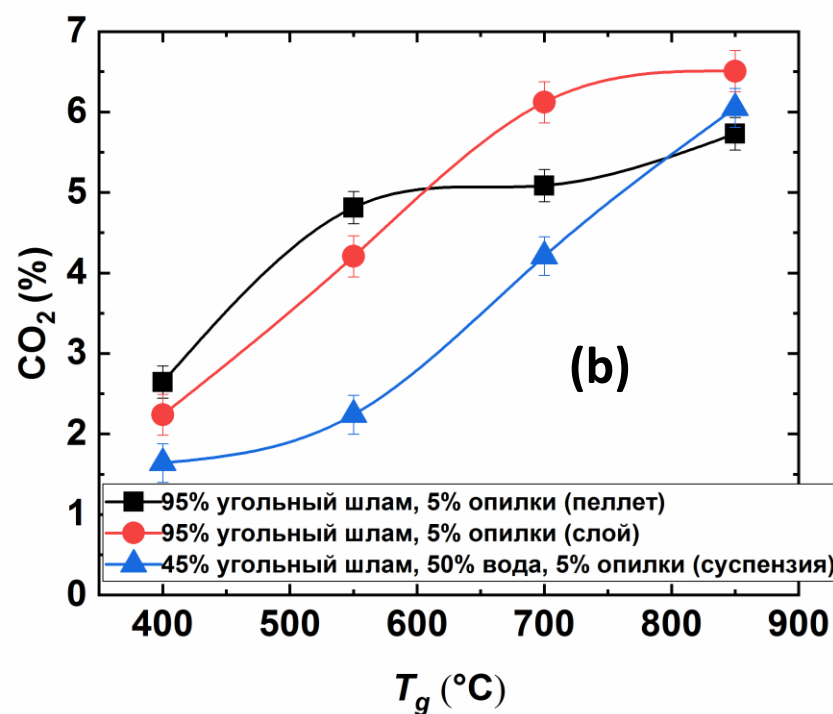
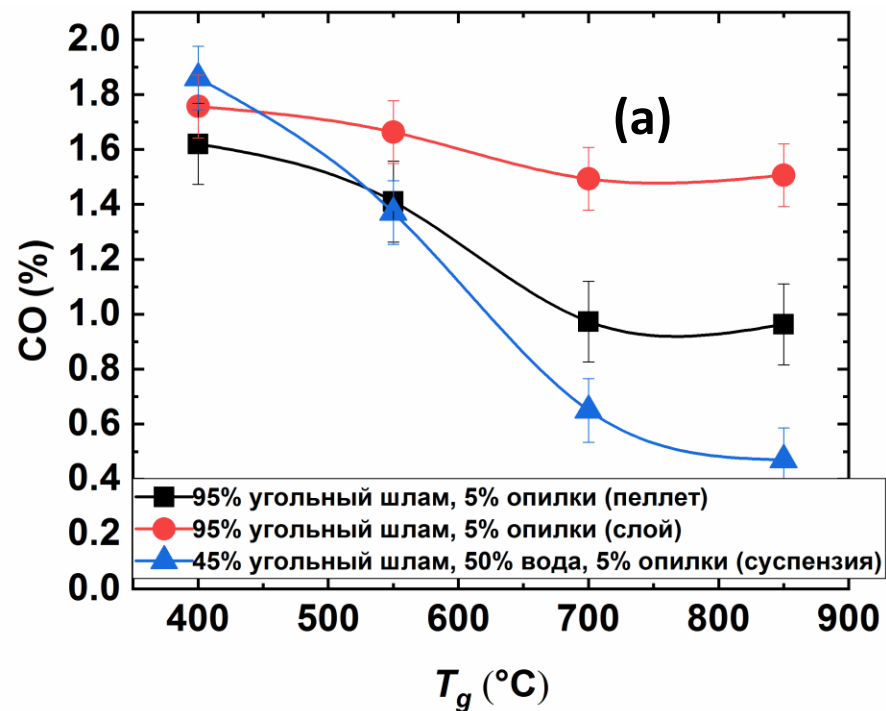


Рис. 19. Влияние температуры в печи на концентрацию CO (a) и CO₂ (b) в продуктах сгорания топлив на основе угольного шлама с добавкой опилок

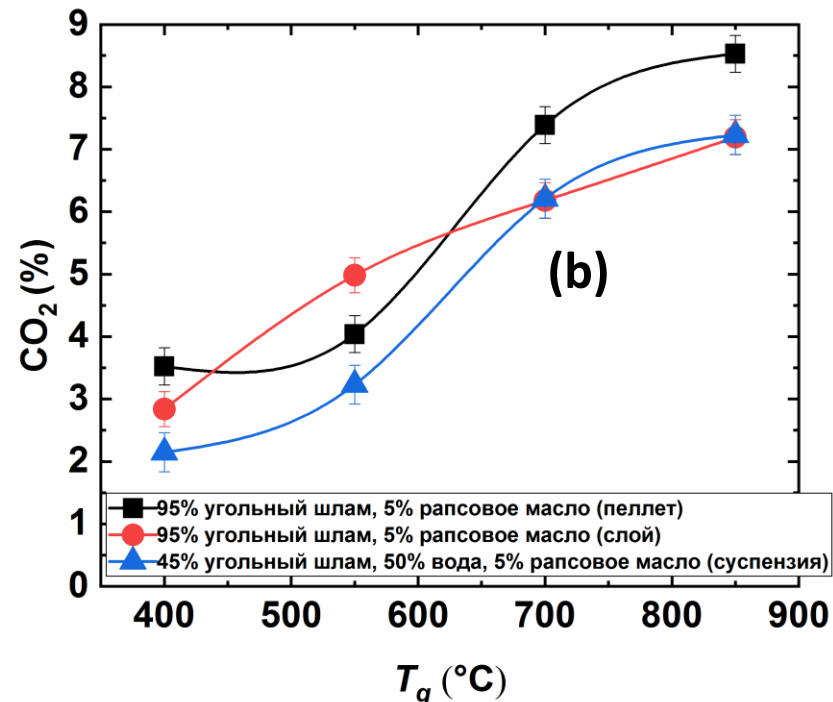
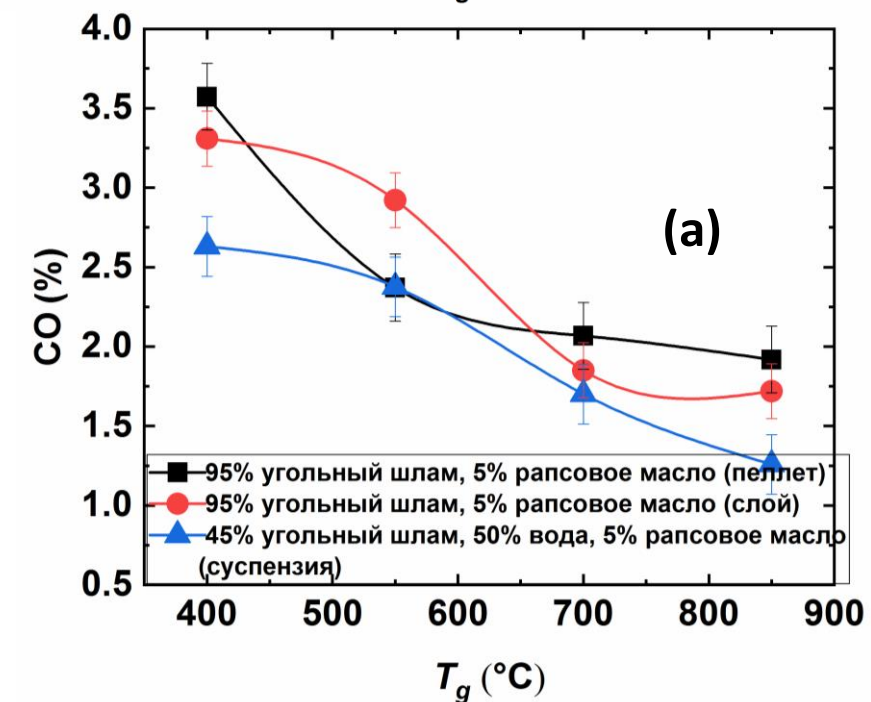


Рис. 20. Влияние температуры в печи на концентрацию CO (a) и CO₂ (b) в продуктах сгорания топлив на основе угольного шлама с добавкой рапсового масла

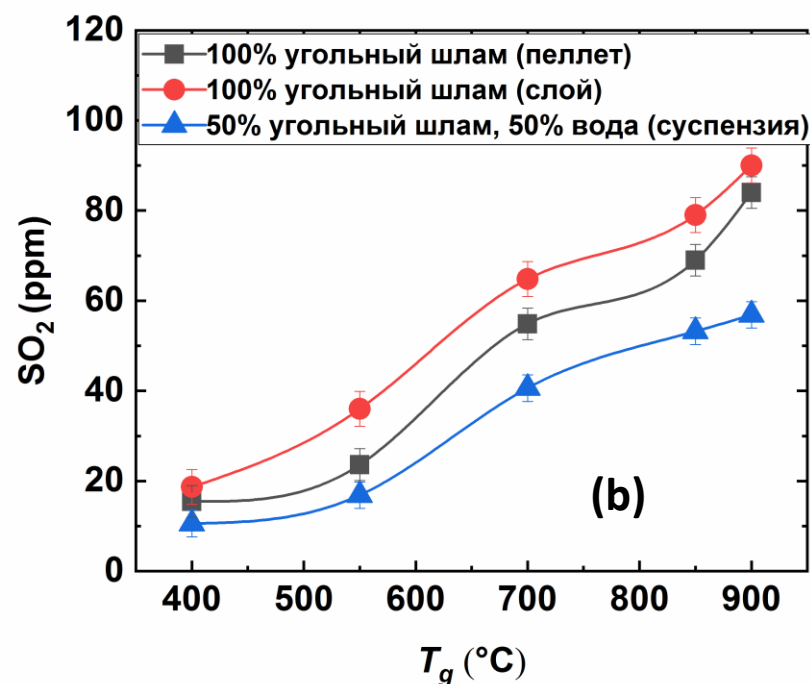
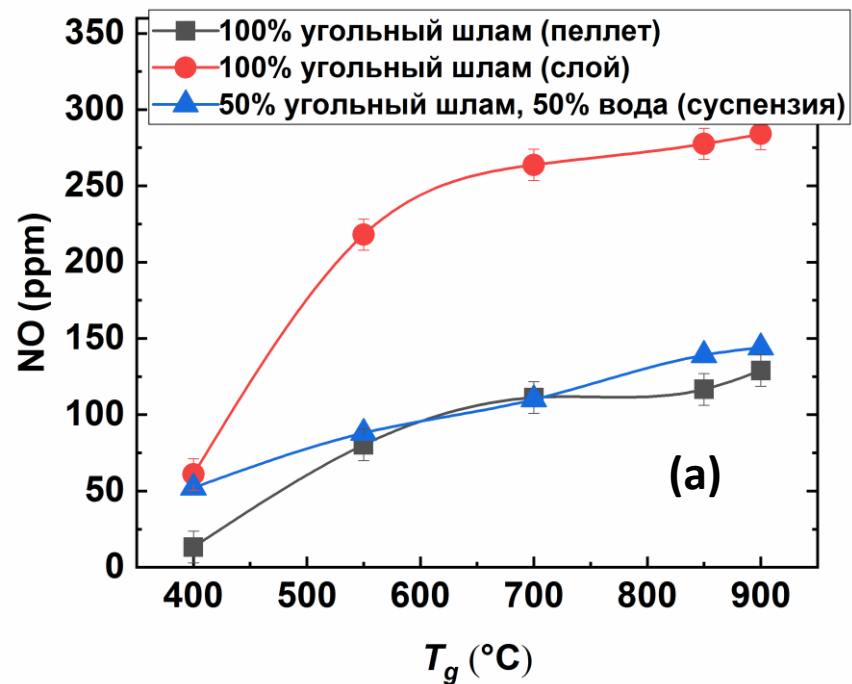


Рис. 21. Влияние температуры в печи на концентрацию NO (a) и SO₂ (b) в продуктах сгорания топлив на основе угольного шлама

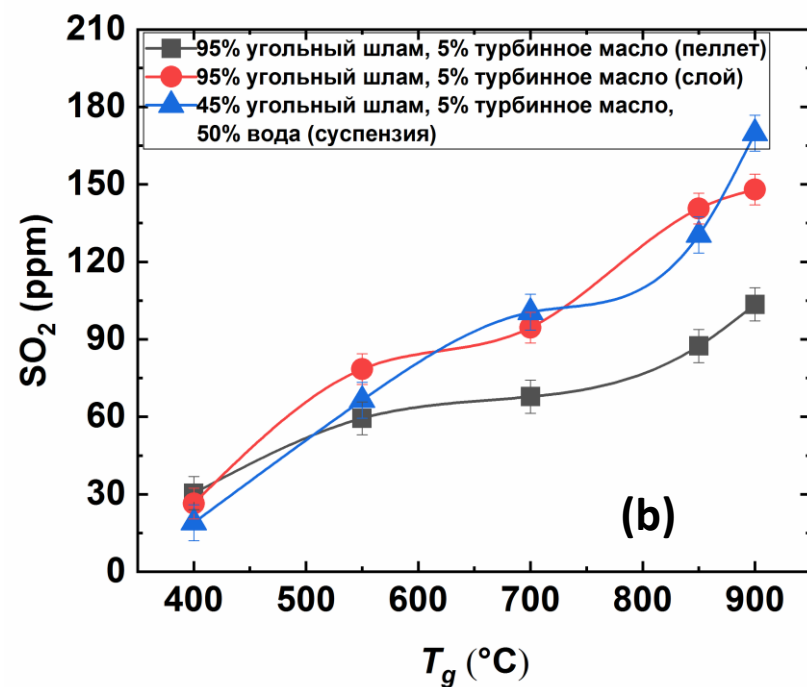
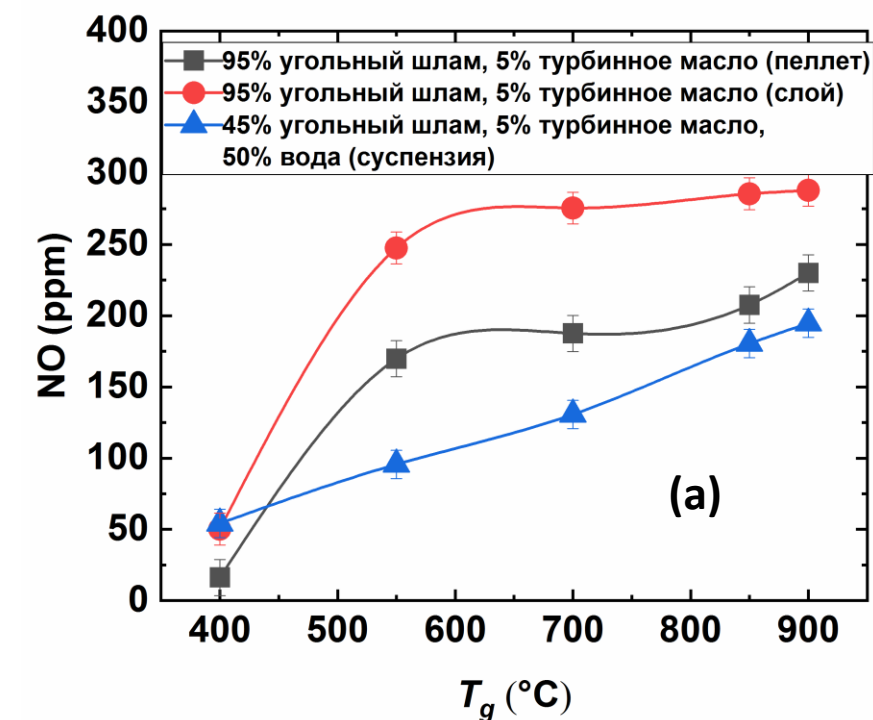


Рис. 22. Влияние температуры в печи на концентрацию NO (a) и SO₂ (b) в продуктах сгорания топлив на основе угольного шлама с добавкой турбинного масла

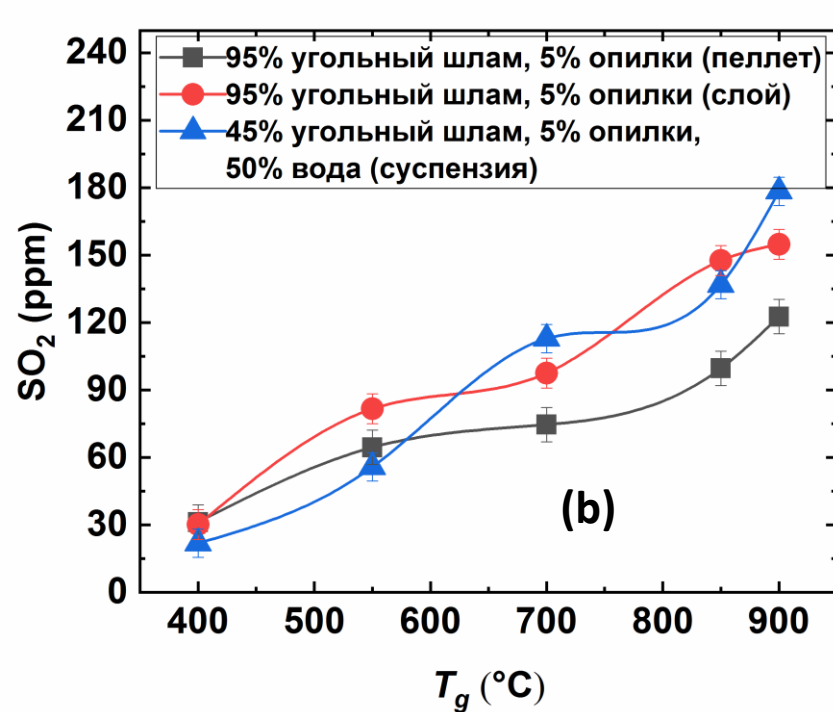
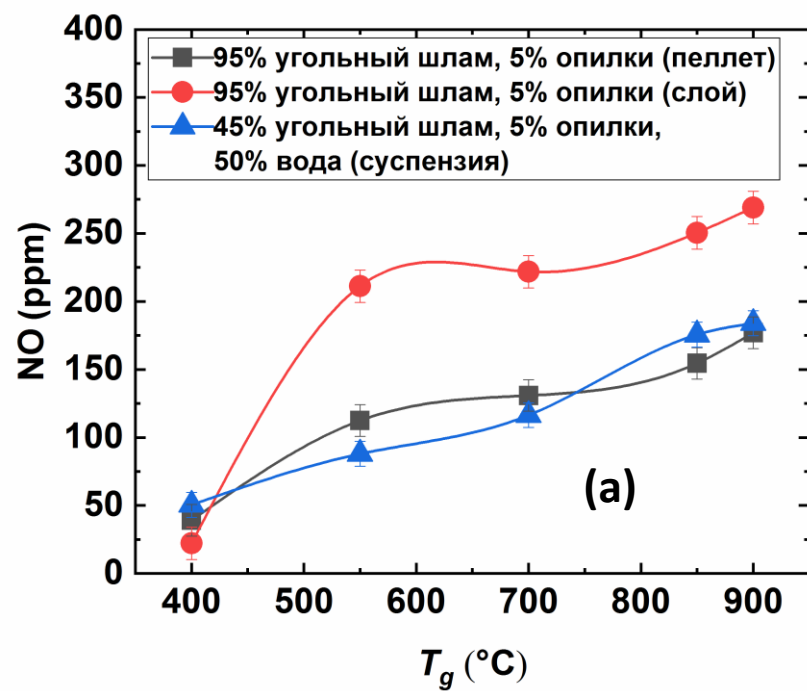


Рис. 23. Влияние температуры в печи на концентрацию NO (a) и SO₂ (b) в продуктах сгорания топлив на основе угольного шлама с добавкой опилок

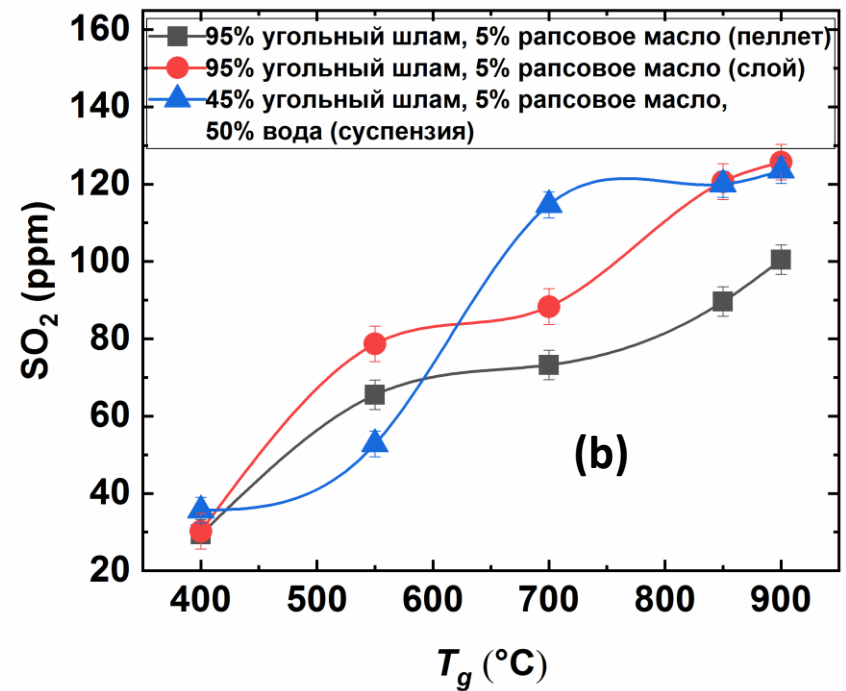
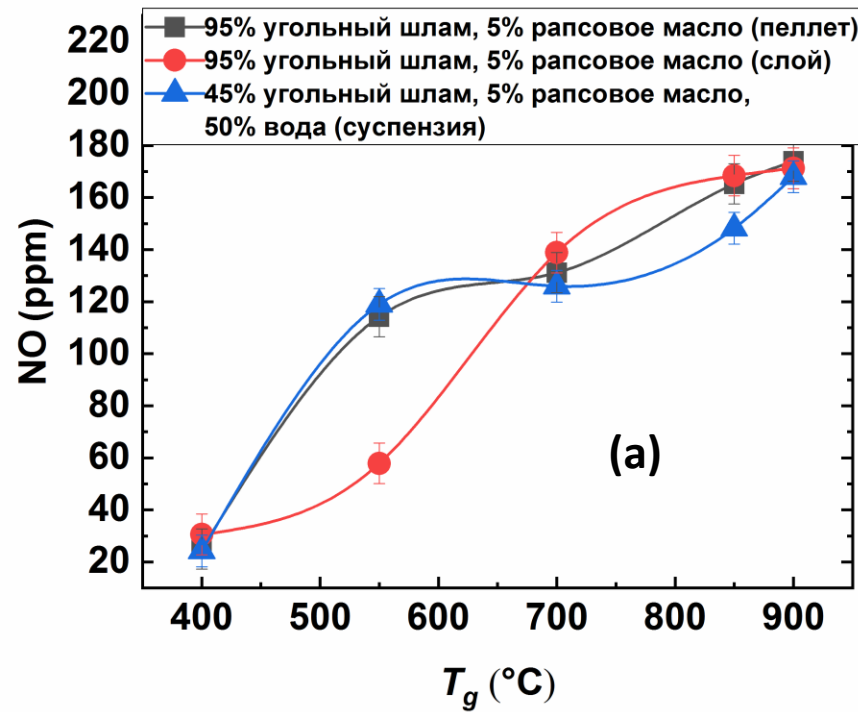
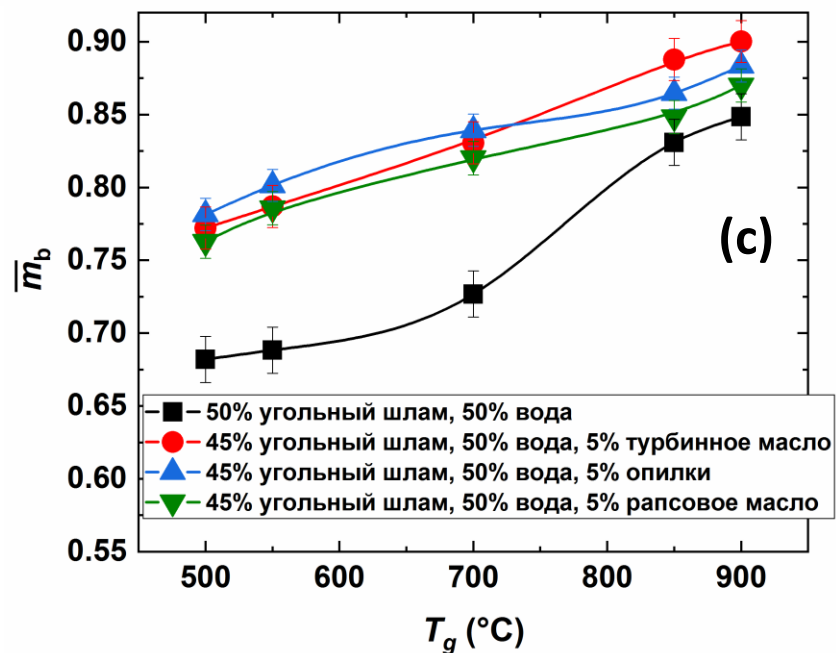
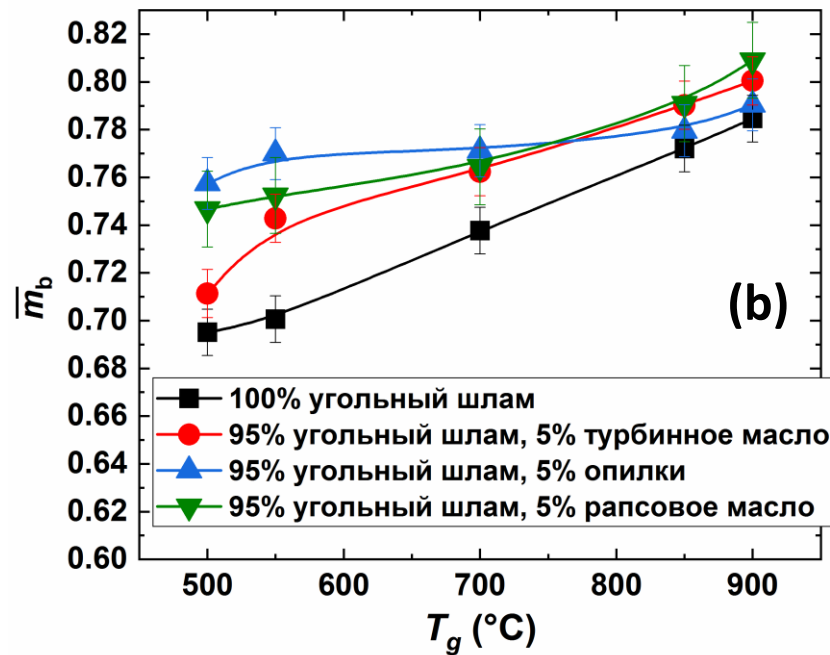
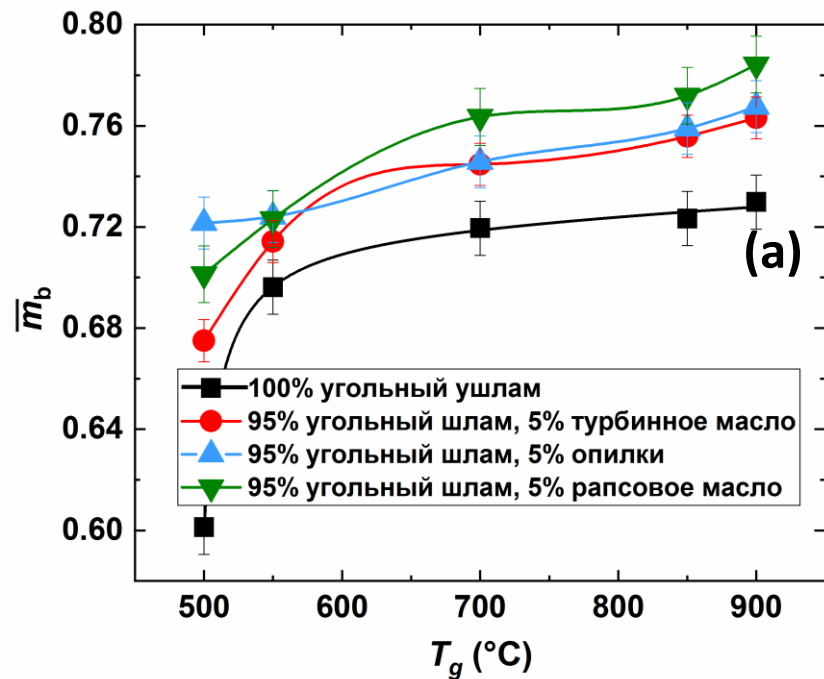


Рис. 24. Влияние температуры в печи на концентрацию NO (a) и SO₂ (b) в продуктах сгорания топлив на основе угольного шлама с добавкой рапсового масла

Относительный показатель выгорания



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

\bar{m}_b – относительный показатель выгорания топлива;
 m_0 – начальная масса топлива, г;
 m_1 – масса несгоревшего остатка, г.

Рис. 25. Влияние температуры в печи на относительный показатель выгорания топлив, сжигаемых в виде пеллет (a), рыхлого слоя (b) и капель суспензий (c)

Температуры зажигания и горения топлив

Табл. 3. Температуры зажигания и максимальные температуры горения топливных смесей.



	100% угольный шлам (пеллет)	100% угольный шлам (слой)	50% угольный шлам, 50% вода (суспензия)
T_g^{min}	480 °C	480 °C	480 °C
T_d^{max} (при 700 °C)	959.7 °C	954.8 °C	988 °C
T_d^{max} (при 800 °C)	1008 °C	1027 °C	1004 °C
T_d^{max} (при 900 °C)	1014 °C	1109 °C	1051 °C
	95% угольный шлам, 5% турбинное масло (пеллет)	95% угольный шлам, 5% турбинное масло (слой)	45% угольный шлам, 50% вода, 5% турбинное масло (суспензия)
T_g^{min}	500 °C	450 °C	480 °C
T_d^{max} (при 700 °C)	980 °C	957 °C	969.4 °C
T_d^{max} (при 800 °C)	1031 °C	1032 °C	1001.4 °C
T_d^{max} (при 900 °C)	1068 °C	1085 °C	1058 °C
	95% угольный шлам, 5% опилки (пеллет)	95% угольный шлам, 5% опилки (слой)	45% угольный шлам, 50% вода, 5% опилки (суспензия)
T_g^{min}	500 °C	500 °C	480 °C
T_d^{max} (при 700 °C)	993 °C	967 °C	1041.9 °C
T_d^{max} (при 800 °C)	1033 °C	1032 °C	1035 °C
T_d^{max} (при 900 °C)	1114 °C	1087 °C	1071 °C
	95% угольный шлам, 5% рапсовое масло (пеллет)	95% угольный шлам, 5% рапсовое масло (слой)	45% угольный шлам, 50% вода, 5% рапсовое масло (суспензия)
T_g^{min}	500 °C	480 °C	480 °C
T_d^{max} (при 700 °C)	962 °C	959 °C	997 °C
T_d^{max} (при 800 °C)	1048 °C	1038 °C	1015 °C
T_d^{max} (при 900 °C)	1070 °C	1068 °C	1072 °C

Соотношение длительности стадий процессов зажигания и горения

100% угольный шлам (пеллет)

95% угольный шлам, 5% турбинное масло (пеллет)

95% угольный шлам, 5% опилки (пеллет)

95% угольный шлам, 5% рапсовое масло (пеллет)

100% угольный шлам (слой)

95% угольный шлам, 5% турбинное масло (слой)

95% угольный шлам, 5% опилки(слой)

95% угольный шлам, 5% рапсовое масло (слой)

50% угольный шлам, 50% вода (суспензия)

45% угольный шлам, 50% вода, 5% турбинное масло (суспензия)

45% угольный шлам, 50% вода, 5% опилки (суспензия)

45% угольный шлам, 50% вода, 5% рапсовое масло (суспензия)

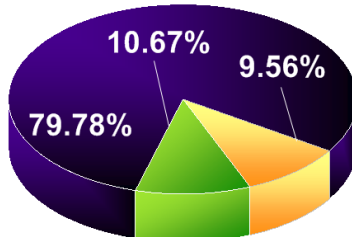
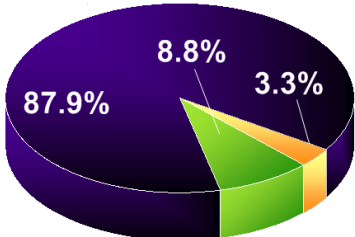
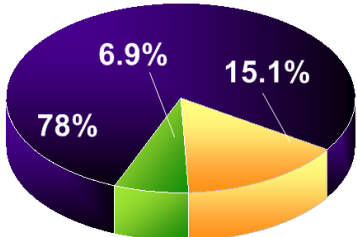
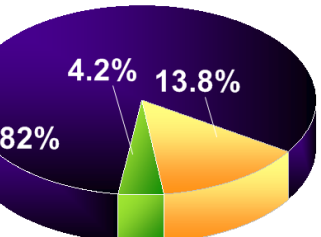
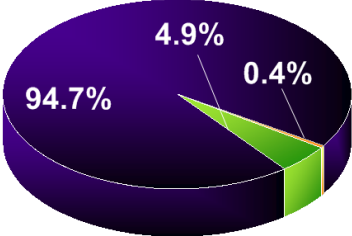
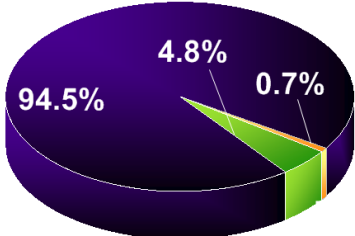
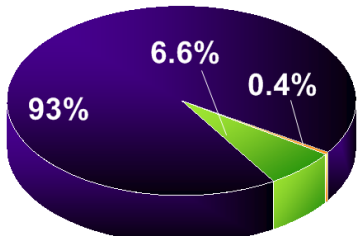
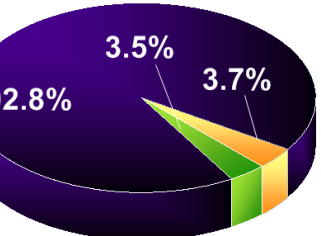
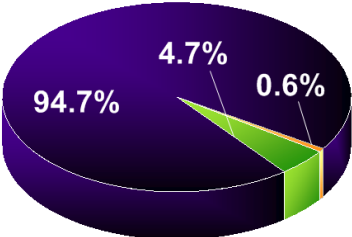
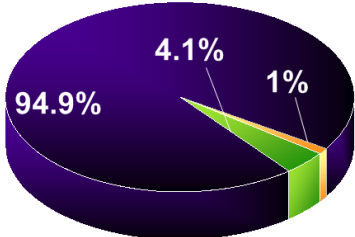
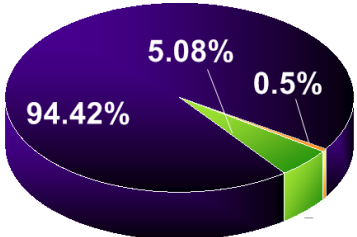
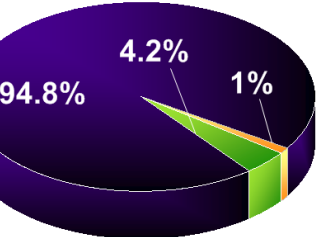
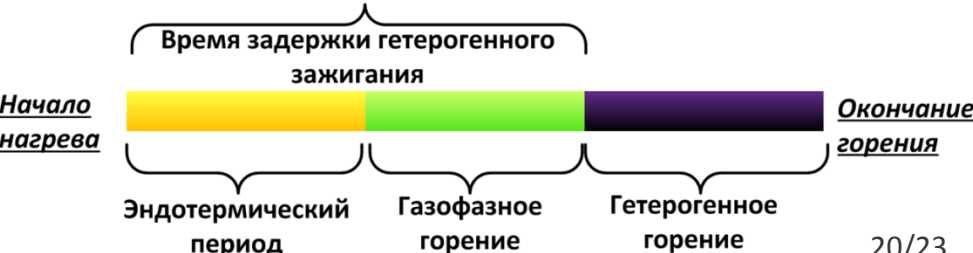


Рис. 26. Соотношение длительностей основных стадий, реализующихся при нагреве топлива (температура в муфельной печи около 900 °С)



Относительные показатели эффективности топлив [1]

№	Состав	№	Состав
1	100% угольный шлам (пеллет)	7	95% угольный шлам, 5% опилки (пеллет)
2	100% угольный шлам (слой)	8	95% угольный шлам, 5% опилки (слой)
3	50% угольный шлам, 50% вода (суспензия)	9	45% угольный шлам, 5% опилки, 50% вода (суспензия)
4	95% угольный шлам, 5% турбинное масло (пеллет)	10	95% угольный шлам, 5% рапсовое масло (пеллет)
5	95% угольный шлам, 5% турбинное масло (слой)	11	95% угольный шлам, 5% рапсовое масло (слой)
6	45% угольный шлам, 5% турбинное масло, 50% вода (суспензия)	12	45% угольный шлам, 5% рапсовое масло, 50% вода (суспензия)

Расчеты проведены по методу взвешенных сумм (Weight Sum Method [2]) с равным приоритетом всех составляющих.

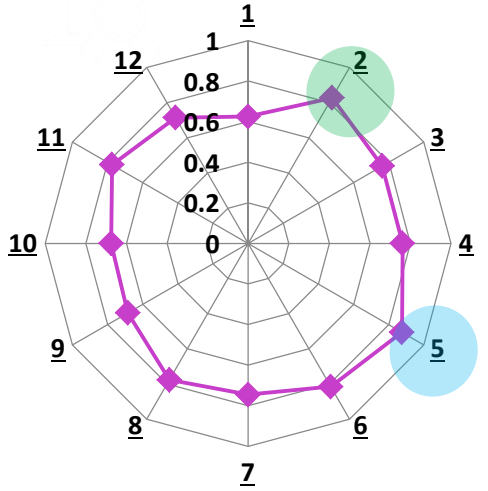


Рис. 27. Относительный показатель энергетической эффективности
 Составляющие (при 800 °С):
 - зольность;
 - теплота сгорания;
 - относительный показатель выгорания;
 - время задержки газофазного зажигания;
 - время задержки гетерогенного зажигания;
 - температура зажигания;
 - температура горения.

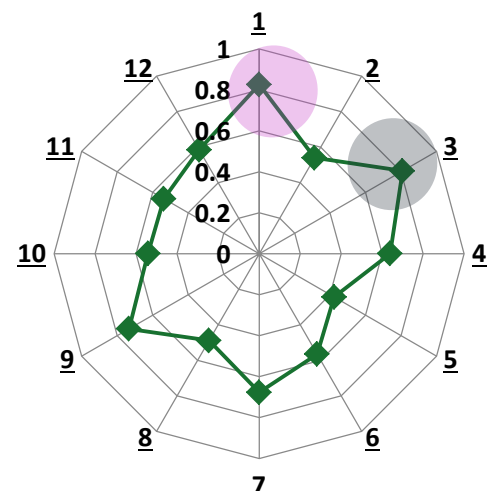


Рис. 28. Относительный показатель экологической эффективности
 Составляющие (при 800 °С):
 - CO;
 - CO₂;
 - NO;
 - SO₂.

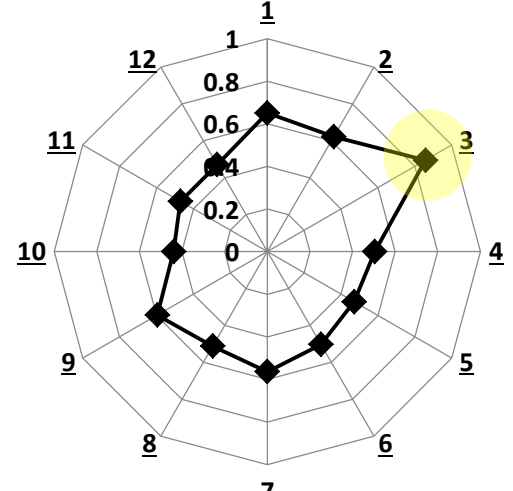


Рис. 29. Итоговый показатель относительной эффективности (включая стоимость топлива)

[1] V.V. Dorokhov, G.V. Kuznetsov, K.Yu. Verzhinina, P.A. Strizhak. Relative energy efficiency indicators calculated for high-moisture waste-based fuel blends using multiple-criteria decision-making. Energy. 2021. V. 234. Article number 121257. DOI: 10.1016/j.energy.2021.121257
 [2] Kumar A, Sah B, Singh AR, Deng Y, He X, Kumar P, et al. A review of multi criteria decision making (MCDM) towards sustainable renewable energy development. Renew Sustain Energy Rev 2017;69:596–609. https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.191

Основные результаты и выводы

- Условия сжигания могут быть критически важными для топлив, приготовленных из низкорреакционных компонентов. В частности, угольные шламы достаточно инертны при моносжигании. Их целесообразнее использовать в комбинации с другими компонентами. Состав топливной смеси во многом определяет развитие реакции горения.
- Ускорение газофазного зажигания **как минимум в 2 раза** происходило при добавлении к угольному шламу добавок в виде турбинного масла, опилок и рапсового масла. Уменьшение длительности эндотермической стадии максимально (**в 3–6 раз**) при смешении шлама с турбинным маслом. Наименьший эффект зарегистрирован при добавлении в топливную смесь опилок. Добавление турбинного масла в шлам ускоряло протекание эндотермических процессов, но не всегда приводило к более быстрому гетерогенному зажиганию.
- Рапсовое масло уменьшало длительность эндотермической стадии на **50–60%**.
- При слоевом сжигании шлама гетерогенное зажигание наступало **в 3.3 раза быстрее**, чем при сжигании угольного шлама с турбинным маслом.
- Капли суспензии характеризовались достаточно длительным эндотермическим периодом по сравнению с пеллетированным топливом или сухой смесью, сжигаемой в виде рыхлого слоя (разница **в 2-4 раза**). Это является фактором риска при запуске котла или в переходных режимах эксплуатации. Диффузия кислорода и продуктов горения вне топлива и внутри (в трещинах и порах) может играть определяющую роль на эндо- и экзотермических стадиях, особенно при температуре в печи менее 800 °С.

Основные результаты и выводы

- Минимальная температура устойчивого гетерогенного зажигания исследуемых топлив составила **450–500 °С**. Такие температуры можно обеспечить с использованием предтопков и завихрительных элементов.
- Пеллеты характеризовались наибольшей продолжительностью горения (**в 3–3.5 раза больше**, чем для неспрессованной смеси). Это обусловлено ограничением диффузионного переноса кислорода к внутренним слоям топлива, влияние которого может усилиться за счет постепенного формирования уплотненной зольной оболочки. При промышленном сжигании во избежание неполного выгорания потребуются интенсивное перемешивание топлива с окислителем и повышение температуры в котле.
- Выгорание коксового остатка занимает самую большую долю от времени пребывания топлива в печи. В частности, для суспензий и пеллет эта доля составляла **93–95%**, а для капель суспензий значительно меньше – **72–88%**.
- Каплям суспензий характерно более полное выгорание, чем сухим смесям, сжигаемым в виде пеллета или сухого слоя. Поэтому утилизация угольных шламов в составе водных суспензий может быть перспективной при использовании распылительных технологий.

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

