

Экспериментально определены характеристики термического разложения и горения композиционных топлив на основе бурого угля, отработанного моторного масла, древесных опилок. Установлено влияние скорости нагрева на процессы термического окисления композиционных топлив. Определена величина синергетического эффекта, возникающего при совместном сжигании компонентов в составе композиционных топлив.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Соглашение от 24.04.2024 № 075-15-2024-543.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Yang D., Li S., He S. Zero/negative carbon emission coal and biomass staged co-gasification power generation system via biomass heating // *Applied Energy*. – 2024. – V. 357. – P. 122469.
2. Sun Y., Liu M.A study on the path planning and optimization of carbon peaking and carbon neutrality in the highway service area // *Building and Environment*. – 2025. – V. 267. – P. 112187.
3. San José J., Sanz-Tejedor M.A., Arroyo Y., toychev P. SAnalysis of vegetable oil mixture combustion in a conventional 50 KW thermal energy installation // *Renewable Energy*. – 2021. – V. 164. – P. 1133–1142.
4. Li T.X., Zhu D.L., Akafuah N.K., Saito K., Law C.K. Synthesis, droplet combustion, and sooting characteristics of biodiesel produced from waste vegetable oils // *Proceedings of the Combustion Institute*. – 2011. – V. 33, № 2. – P. 2039–2046.
5. Chen J., Mu L., Cai J., Yin H., Song X., Li A. Thermal characteristics and kinetics of refining and chemicals wastewater, lignite and their blends during combustion // *Energy Conversion and Management*. – 2015. – V. 100. – P. 201–211.
6. Idris S.S., Rahman N.A., Ismail K. Combustion characteristics of Malaysian oil palm biomass, sub-bituminous coal and their respective blends via thermogravimetric analysis (TGA) // *Bioresource Technology*. – 2012. – V. 123. – P. 581–591.
7. Tahmasebi A., Kassim M.A., Yu J., Bhattacharya S. Thermogravimetric study of the combustion of Tetraselmis suecica microalgae and its blend with a Victorian brown coal in O₂/N₂ and O₂/CO₂ atmospheres // *Bioresource Technology*. – 2013. – V. 150. – P. 15–27.
8. Gil M.V., Casal D., Pevida C., Pis J.J., Rubiera F. Thermal behaviour and kinetics of coal/biomass blends during co-combustion // *Bioresource technology*. – 2010. – V. 101, № 14. – P. 5601–5608.

ВЛИЯНИЕ ДОБАВКИ КАРТОНА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ И СВОЙСТВА ПЕЛЛЕТИРОВАННОГО ТОПЛИВА

Д.К. Шведов, В.В. Дорохов

Томский политехнический университет, ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова, группа 5БМ33

Научный руководитель: Г.С. Няшина, к.т.н., доцент, НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ ТПУ

В настоящее время создание композиционных топлив с использованием отходов стало популярной технологией переработки отходов за счет экономической эффективности и экологической безопасности [1].

Использование отходов в составе композиционного топлива является одним из перспективных способов расширения сырьевой базы и утилизации отходов. В частности, смешивание бумажных отходов (макулатура, картон, газеты) с биомассой можно считать одним из наиболее перспективных методов его переработки для получения композиционных топлив [2].

Схема экспериментального стенда, используемого для определения прочностных характеристик и характеристик термического разложения пеллетированного топлива представлена на рис. 1.

На рис. 2 представлены рассчитанные коэффициенты ударопрочности пеллет исследуемых составов. Данный показатель имеет важное значение при транспортировке, погрузочно-разгрузочных работах и хранении пеллет. Чем ниже показатель ударопрочности, тем выше вероятность образования осколков и пылевидных мелких частиц при ударных нагрузках, которые не могут быть полезно использованы в дальнейшем.

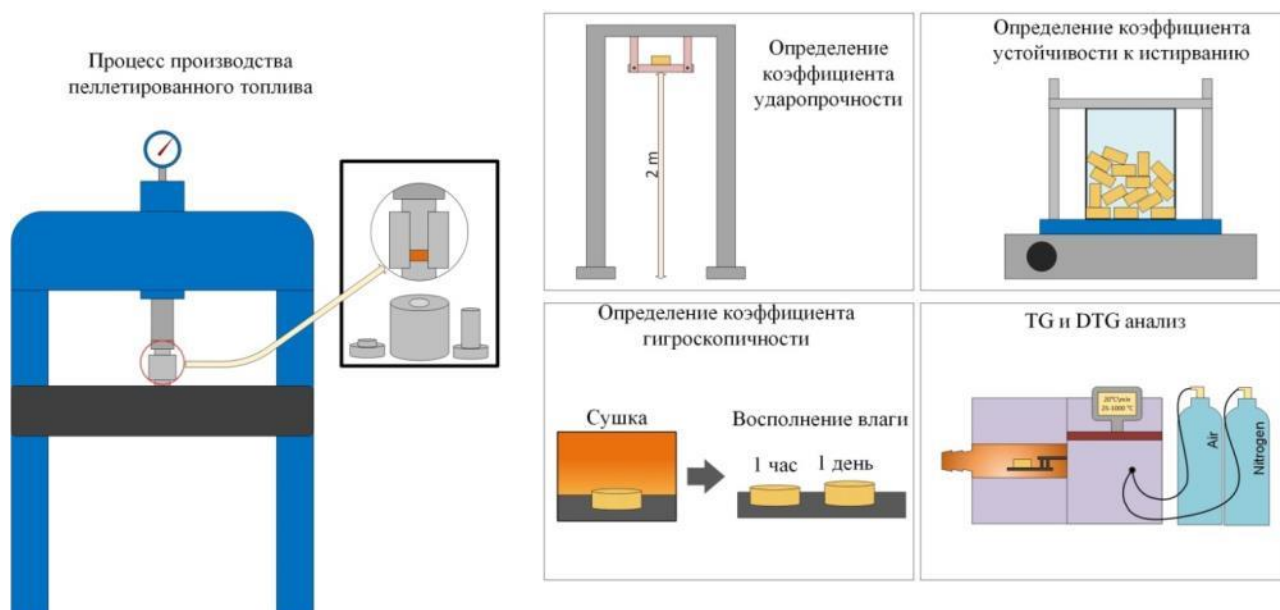


Рис. 1. Схема экспериментального стенда

Установлено, что ударопрочность пеллет, в составе которых есть картон либо соизмерима, либо превышает установленные значения для пеллет W100. При прессовании частицы картона и опилок сближались, вызывая межчастичные связи. Естественные связующие компоненты, такие как крахмал, белок, лигнин и водорастворимые углеводы в материалах опилок и картона, выдавливались из частиц, что способствовало образованию прочных мостиков [3]. На стадии сжатия частицы картона и опилок перестраивались, подвергались упругой и пластической деформации, в результате чего образовывались связи и генерировались силы ближнего действия. По мере сжатия из-за наличия влаги развивались межфазные силы и капиллярное давление, что в свою очередь увеличивало сцепление между частицами картона и опилок и образовывало жидкие мостики. Более мелкие частицы картона обеспечивали большую площадь контактной поверхности, что являлось основным параметром для достижения более высокой плотности и ударопрочности. Также длинные волокна картона сцеплялись или складывались друг вокруг друга за счет поперечных связей и диффузии молекул из одной частицы в другую в точках контакта после сжатия. Это усиливало межчастичные связи. Похожие результаты были достигнуты другими исследователями. Таким образом для достижения высокой ударопрочности пеллет предпочтительно использовать составы с 30 и 50 % картона.

Коэффициент устойчивости к истиранию (рис. 2) характеризует свойства пеллет сохранять целостность при колебательных и вибрационных нагрузках, вызванных тряской при транспортировке, в случае соударения пеллет друг с другом, либо о стенки тары или транспортного средства. Установлено, что максимальным коэффициентом устойчивости к истира-

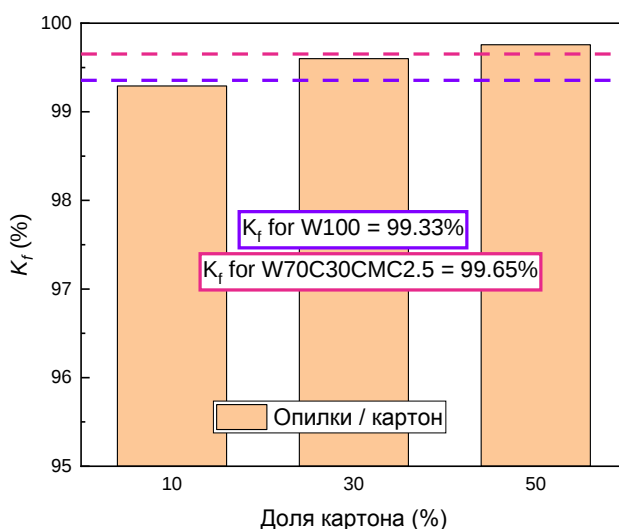


Рис. 2. Зависимость коэффициента ударопрочности (K_f) исследуемых пеллет при изменении доли добавок

нию характеризовались образцы W100. При воздействии на них колебательных нагрузок образец потерял в виде осколочных частиц и мелкой пыли около 2 % от исходной массы. Наиболее близким к W100 коэффициентами устойчивости к истиранию обладали составы W70C30CMC2.5 и W50C50. Для данных образцов потеря при тряске составила не более 2,4 %. В случае использования только древесной биомассы (W100) давление при прессовании приводило к образованию твердых мостиков из-за размягчения и диффузии молекул между частицами, химических реакций на поверхности частиц, затвердевания расплавленных компонентов или связующих веществ между частицами. В случае древесных гранул лигнин образовывал эти твердые мостики. Вязкие связующие вещества, такие как смола или деготь, склеивали смежные поверхности частиц, создавая прочную связь, похожую на твердый мостик. Таким образом, для достижения максимальной устойчивости пеллет к колебательным и вибрационным нагрузкам рекомендуется использовать древесные пеллеты, композиции с картоном в количестве 50 %, либо с 30 % картона в совокупности со связующей добавкой.

Гигроскопичность пеллет (H) оценивалась по свойству пеллет поглощать влагу из атмосферного воздуха и представлена на рис. 4. Чем ниже коэффициент гигроскопичности, тем меньше атмосферной влаги впитывал в себя образец при хранении на открытом воздухе. Способность пеллет из биомассы поглощать как можно меньше влаги позволит избежать снижения энергетической плотности топлива, биоразложения и гниения материала. Установлено, что коэффициент гигроскопичности для большинства составов имеет приближенные значения к древесным пеллетам. Разница в значениях не превышала 0.4 %. Результат связан со схожей природой компонентов картона, опилок. Присутствие в обоих материалах лигноцеллюлозных волокон объясняет высокие гидрофильные свойства. Влага в лигноцеллюлозной матрице биомассы может впитываться в клеточные стенки и образовывать водородные связи с гидроксильными группами компонентов клеточной стенки.

Установлено, что при использовании добавки карбоксиметилцеллюлозы к пеллетам с картоном регистрировался рост коэффициента гигроскопичности. Полученный эффект может объясняться взаимными взаимодействиями добавки с картоном, которое приводит к накоплению и удержанию влаги в пеллетах.

На рис. 5 представлены термогравиметрические профили исследуемых композиционных пеллетированных топлив на основе смеси опилок с картоном. Процесс термического разло-

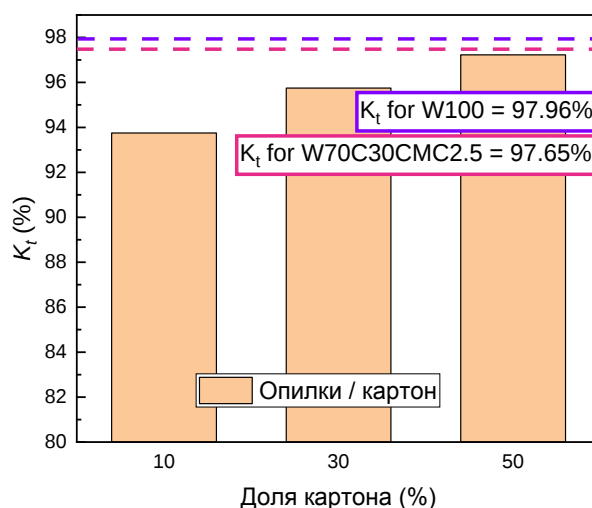


Рис. 3. Зависимость коэффициента устойчивости к истиранию (K_t) исследуемых пеллет при изменении доли добавок

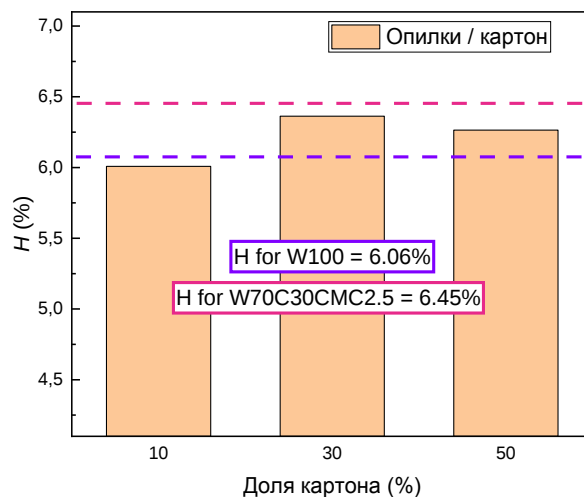


Рис. 4. Зависимость коэффициента гигроскопичности (H) исследуемых пеллет при изменении доли добавок

жения топливных пеллет включал в себя три стадии: 1 стадия – сушка образца от внутренней влаги; 2 стадия – выход и горение летучих; 3 стадия – горение твердого коксового остатка.

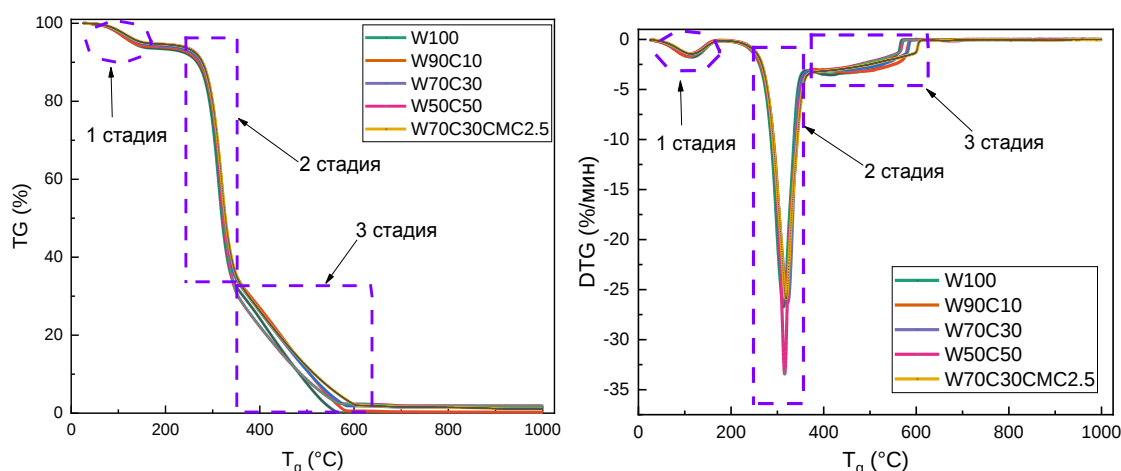


Рис. 5. TG и DTG кривые пеллет с картоном при скорости нагрева 20 °C/мин

Интенсивная потеря массы в ходе 2 стадии (230–380 °C) обусловлена, главным образом, разложением наименее термически стабильных фракций биомассы. Начало термического разложения гемицеллюлозы соответствует температуре около 230 °C, а термическое разложение целлюлозы происходит при температурах выше 280 °C. Лигнин, в свою очередь, наиболее интенсивно разлагается при температурах более 400 °C. Это обуславливает меньшую величину кривой DTG пеллет с добавками картона 30 и 50 % в ходе 3 стадии, поскольку содержание лигнина в составе картона меньше, чем в опилках. Также в области высоких температур происходит разложение минеральной составляющей, например, разложение карбонатов в составе биомассы, богатой кальциевыми соединениями. Помимо этого, в составе картона также содержатся карбонаты кальция, приводящие к увеличению температуры окончания термического разложения исследуемых образцов по сравнению с пеллетами без добавок. По сравнению с W100, при увеличении доли картона в составе топливных пеллет в диапазоне от 10 до 50 %, температура окончания термического разложения увеличилась на 2–23 %.

Максимальная скорость потери массы регистрировалась для образца W50C50. Данный результат обусловлен наибольшим содержанием термически нестабильных соединений (гемицеллюлозы и целлюлозы) в составе картона, что привело к интенсивному термическому разложению исследуемого образца в ходе 2 стадии.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ (грант №23-79-10098).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Li H, Jiang LB, Li CZ, Liang J, Yuan XZ, Xiao ZH, et al. Co-pelletization of sewage sludge and biomass: The energy input and properties of pellets // *Fuel Process Technol.* – 2015. – V. 132. – P. 55–61.
2. Kuptz D, Kuchler C, Rist E, Eickenscheidt T, Mack R, Schön C, et al. Combustion behaviour and slagging tendencies of pure, blended and kaolin additivated biomass pellets from fen paludicultures in two small-scale boilers < 30 kW // *Biomass and Bioenergy.* – 2022. – V. 164. – P. 106532.
3. 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 // *Bioresour Technol.* – 2014. – V. 166. – P. 435–443.