

ОБОСНОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ ЛИСТЬЕВ В СМЕСИ С УГЛЕМ

¹Есин К.С., ^{1,2}Мисюкова А.Д., ¹Берикболов А.К.,
¹Янковская Н.С., ^{1,2}Янковский С.А.

¹ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»,
Томск, e-mail: kse2@tpu.ru;

²ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева»,
Кемерово, e-mail: jankovsky@tpu.ru

Исследованы теплотехнические характеристики смесевых топлив, сформированных на основе бурого угля месторождения Балахтинского района Красноярского края, и биомассы на основе древесных листьев, произрастающих в г. Томске. Выполнены исследования процессов воспламенения и горения таких композитных топлив с целью установления времени задержки зажигания. Установлено, что добавление доли листьев к углю существенно влияет на процессы начала воспламенения и горения смесевых топлив. При увеличении доли листьев в смеси до 10% время задержки зажигания сокращается на 5,7%. Замещение 25% угля в смеси с измельченными листьями приводит к сокращению времени задержки воспламенения на 26% по сравнению с однородным углем. Увеличение доли листьев в смеси до 50% существенно, на 54%, сокращает время задержки зажигания таких топливных композиций по сравнению с однородным углем. Выполненные исследования позволяют обосновать возможность применения высушенных опавших листьев как эффективную добавку к углю, которая способствует ускорению процессов воспламенения смесевых топлив при их сжигании в энергетических котлах малой и средней мощности и снижению временных затрат на разогрев подобных котельных агрегатов.

Ключевые слова: уголь, листва, биомасса, воспламенение, горение, смесевые топлива

Работа выполнена при поддержке гранта FSWW-2022-0018, реализуемого в рамках проекта создания новых молодежных лабораторий.

JUSTIFICATION OF THE POSSIBILITY OF ENERGY USE OF LEAVES MIXED WITH COAL

¹Esin K.S., ^{1,2}Misyukova A.D., ¹Berikbolov A.K.,
¹Yankovskaya N.S., ^{1,2}Yankovskiy S.A.

¹National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, e-mail: kse2@tpu.ru;

²T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, e-mail: jankovsky@tpu.ru

Thermal characteristics of blended fuels formed on the basis of brown coal from the Balakhtha deposit of the Krasnoyarsk region and biomass on the basis of wood leaves growing in Tomsk have been studied. Studies of ignition and combustion processes of such composite fuels have been carried out in order to establish the ignition delay time. It was found that the addition of the share of leaves to coal significantly affects the processes of ignition initiation and combustion of blended fuels. When the proportion of leaves in the blend is increased to 10%, the ignition delay time is reduced by 5.7%. Substitution of 25% of the coal in the blend with crushed leaves results in a 26% reduction in ignition delay time compared to homogeneous coal. Increasing the share of leaves in the mixture up to 50% significantly, by 54%, reduces the ignition delay time of such fuel compositions compared to homogeneous coal. The performed studies allow to substantiate the possibility of using dried fallen leaves as an effective additive to coal, contributing to the acceleration of ignition processes of mixed fuels during their combustion in power boilers of small and medium capacity and reducing the time costs for heating of such boiler units.

Keywords: coal, foliage, biomass, ignition, combustion, mixed fuels

This work was supported by grant FSWW-2022-0018, implemented within the framework of the project to create new youth laboratories.

Введение

В современном мире наблюдается неуклонный рост потребления энергоресурсов, что связано с высокими темпами промышленного развития и ростом численности населения планеты. Процессы сжигания ископаемых видов топлив для промышленного производства, а также выработки тепловой и электрической энергии влечет за собой серьезные глобальные экологические сдвиги

за счет колоссальных антропогенных выбросов. Одним из вариантов сокращения вредных выбросов является частичная замена традиционных топлив, в том числе промышленных энергетических отходов (например, угольная и коксовая пыль), биомассой [1]. Биомасса обладает большим потенциалом, поскольку является возобновляемой, в отличие от ископаемого топлива. Совместное сжигание биомассы

с углем расширит возможность экологичного производства энергии. Выбор вида биомассы в качестве добавки к углю зависит от наличия отходов в каждом конкретном регионе мира, и этот список довольно широк: отходы лесопиления, жмых сахарного тростника, листья и др. [1]. За последние пять лет исследования в данном направлении увеличились в несколько десятков раз. Ниже приведены результаты некоторых исследований.

В работе авторов [1] рассматривались характеристики смесового топлива на основе угольной пыли с лузгой и листьями подсолнечника. Были проанализированы несколько составов брикетов в различных массовых концентрациях. Исследование показало, что полученные брикеты быстрее воспламеняются, более плотные и прочные. Время горения таких брикетов уменьшается с увеличением концентрации биомассы в составе смеси, при этом скорость горения таких брикетов кратно увеличивается.

Использование в энергетической отрасли топливных смесей, состоящих из угля и древесной биомассы, позволяет значительно повысить экологические характеристики энергетических систем, работающих на таком топливе. Это достигается за счет сокращения выбросов антропогенных газов до 90% по сравнению с угольными энергетическими установками, при этом потери энергетической ценности топлива не превышают 9% [2].

В работе [3] рассматривалось сжигание смесевых топлив на основе угля и биомассы в слое. Эксперименты показали, что увеличение доли древесной компоненты в смеси приводит к снижению времени задержки зажигания смесевых топлив и концентрации антропогенных газов в процессе сжигания.

Авторами [4] рассматривалось смесевое топливо на основе угольной пыли и навоза крупного рогатого скота. Результаты экспериментов показали, что физические свойства брикетов соответствуют предъявляемым требованиям, плотность брикетов больше или равна 1 г/см^3 . Брикет имеет низкий показатель разбиваемости (менее 0,5%), что делает его устойчивым к ударам при падении. В зависимости от добавленной биомассы можно уменьшить время задержки зажигания и количество продуктов сгорания до 68,68%. Выбросы газов от сжигания топлива в виде брикетов оказывают меньшее влияние на окружающую среду, поскольку значения концентраций CO и H_2S ниже пороговых значений.

Авторами [5] сравнивалось воздействие токсичности угля и сосновых пеллет

при их совместном сжигании в трубчатой печи на экологию и здоровье людей. Результаты исследований показали, что совместное сжигание угля и пеллет приводит к снижению экотоксичности и токсичности окружающей среды для человека [6].

Смесевое топливо обычно обладает меньшей плотностью и большим количеством летучих веществ, из-за чего его свойства воспламенения и горения заметно различаются по сравнению с однородным углем. Важным энергетическим параметром таких топлив является время задержки зажигания. Определение этого параметра важно для понимания химической кинетики воспламенения, что имеет большое значение для процесса горения, влияя на эффективность работы котла, энергетическую эффективность и уровень выбросов вредных веществ.

Несмотря на достаточно обширные исследования в процессах воспламенения и горения биомассы в смеси с углем, в литературных источниках практически отсутствуют результаты экспериментальных исследований по обоснованию возможности энергетического применения смесевых топлив, сформированных на основе листьев различных пород древесины совместно с углем, для сжигания в котлах средней и малой мощности. Не исследованы процессы воспламенения и горения таких топливных композиций, нет результатов определения их технических и энергетических характеристик. Для обоснования возможности энергетического применения таких композитных топлив необходим комплексный подход, что и подтверждает актуальность выполняемых исследований в данном направлении.

Целью исследования является обоснование возможности применения опавших листьев различных пород древесины как эффективной добавки биомассы к углю, способствующей без существенного снижения энергетических характеристик угля улучшить его качественные показатели, например снижение зольности и ускорение процессов воспламенения.

Материалы и методы исследования

Подробная методика приготовления смесевых топлив описана в работе [2].

В данной работе исследовались листовно-угольные композиции двух видов:

1. Композитное топливо, сформированное из бурого угля и листовенной смеси, состоящей из измельченных опавших листьев березы и тополя.
2. Композитное топливо, сформированное из бурого угля и измельченных листьев ивы.

Таблица 1

Результаты анализа теплотехнических характеристик
угля, листьев и смесей на их основе

Исходные компоненты	Теплотехнический анализ, %		
	W^a	A^d	V^{daf}
100 % Бурый уголь	7,12	2,78	57,64
100 % Листья ивы	6,10	7,31	85,58
100 % Смесь листьев (тополь, береза)	7,31	14,55	87,54
Уголь бурый / смесь листьев 90/10 %	7,52	3,88	62,33
Уголь бурый / смесь листьев 75/25 %	7,61	6,28	67,09
Уголь бурый / смесь листьев 50/50 %	7,65	7,04	74,09
Уголь бурый / листья ивы 90/10 %	7,24	3,57	64,02
Уголь бурый / листья ивы 75/25 %	7,18	4,28	68,76
Уголь бурый / листья ивы 50/50 %	7,16	5,45	73,20

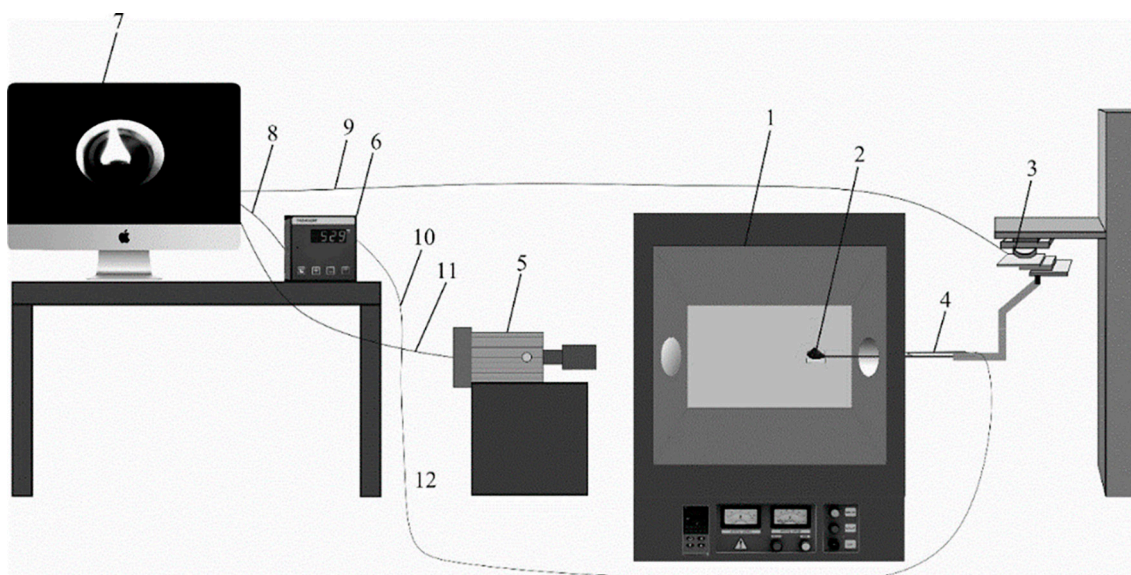


Рис. 1. Экспериментальный стенд для исследования воспламенения и горения смесевых топлив при термическом нагреве в слое. 1 – терморегулируемая муфельная печь; 2 – смесевое топливо массой 1 г; 3 – координатное устройство с приводом; 4 – платино-родиевая термопара; 5 – высокоскоростная видеокамера; 6 – преобразователь сигнала Термодат; 7 – персональный компьютер; 8, 9, 10, 11, 12 – каналы связи между оборудованием [3]

Уголь использовался бурый Балахтинского месторождения Красноярского края, листовая биомасса, прорастающая в г. Томске. Уголь и листья измельчались механическим способом, с помощью ножевой мельницы *Stegler-1000*, после чего компоненты смешивались в различных массовых концентрациях, %: 90/10, 75/25, 50/50.

Предварительно перед проведением исследований были определены теплотехнические характеристики исходных компонент в соответствии с государственными стандартами, описанными в ГОСТ 11022-

95, ГОСТ Р 52911-2020, ГОСТ Р 55660-2013. Результаты полученных теплотехнических характеристик, сформированных на основе бурого угля и листьев, приведены в табл. 1.

Результаты теплотехнических характеристик исходных топливных компонент и смесей, сформированных на их основе, показали, что смеси топливных компонентов уступают чистому углю по зольности и выходу летучих.

Экспериментальные исследования по определению времен задержки зажигания смесевых топлив выполнялись при их

термическом нагреве в муфельной печи модели ПМ-1400. Принципиальная схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. Выполняемые исследования направлены на моделирование процесса слоевого сжигания смесевых топлив и установление степени влияния доли измельченных листьев на процессы воспламенения частиц угля, расположенных на минимальном расстоянии друг от друга в плотном слое.

Экспериментальные исследования выполнялись по следующей методике: навеска с топливом массой 1 г (2) помещалась на держатель координатного механизма (3). При поступлении сигнала с компьютера (7) координатный механизм приводился в действие и держатель вводился в отверстие муфельной печи (1). Фиксация начала процесса воспламенения и времени задержки зажигания осуществлялась при помощи высокоскоростной видеокамеры *Photron* (5). Временем задержки зажигания считалась разница между попаданием держателя с топливом в объектив видеокамеры и моментом начала свечения топливных частиц.

Результаты исследования и их обсуждение

Экспериментальные исследования по установлению времени задержки зажигания композитных топлив выполнялись в широком диапазоне температур (600, 700 и 800 °С).

Результаты экспериментальных исследований изменения времен задержки зажигания топливных смесей, сформированных на основе бурого угля и листьев, приведены в табл. 2.

Исследование процессов зажигания смесевых топлив при температуре 600°С показало, что при соотношении угля и листьев (%) 90/10 время задержки воспламенения уменьшается на 1,3 с по сравнению с чистым углем. При увеличении доли листьев до 25% время задержки воспламенения уменьшается на 3,14 с. При содержании листьев 50% время задержки воспламе-

ния уменьшается на 9,1 с, что существенно отличается от времени воспламенения чистого угля. При соотношении компонентов (%) 50/50 (уголь / листья ивы), время задержки воспламенения уменьшается на 4,5 с по сравнению с чистым углем, следовательно, вид листьев влияет на время задержки воспламенения смесевых топлив.

Задержка воспламенения смеси уголь/листья в процентном соотношении по массе 90/10 оказалась на 5,7 с меньше, чем у однородного угля, когда температура печи была увеличена до 700 °С. При тех же условиях задержка воспламенения угля и ивы была на 4,6 с меньше, чем у однородного угля. При добавлении к углю 25% смешанной лиственной биомассы время задержки воспламенения смеси сократилось на 7,16 с, а время задержки воспламенения древесного угля и ивы – на 6,11 с. При одинаковой концентрации компонентов (древесный уголь / листья) задержка воспламенения смеси была в 2,5 раза ниже по отношению к гомогенному углю. При той же концентрации компонентов (смесь угля и ивы) время задержки воспламенения оказалось в 3,3 раза меньше, чем у гомогенизированного древесного угля.

При установленной в печи температуре 800 °С были получены следующие результаты: время задержки зажигания при добавлении 10% смеси листьев в уголь уменьшилось на 5,06 с, а при добавлении 25% лиственной смеси – на 5,26 с, по сравнению со временем задержки зажигания однородного угля. При равной концентрации компонент время задержки зажигания меньше, чем у однородного угля, на 5,32 с. При соотношении угля и листьев ивы (%) 90/10 время задержки зажигания уменьшилось на 4,31 с по сравнению со временем задержки зажигания однородного угля. При добавлении 25% листьев ивы время задержки воспламенения композиционного топлива уменьшилось на 4,87 с, а при концентрации уголь / листья ивы (50/50) время задержки зажигания меньше, чем у однородного угля, на 5,44 с.

Таблица 2

Результаты анализа времени задержки зажигания угля и композитных топлив на их основе

Исходные компоненты	100%	90/10%	75/25%	50/50%	90/10%	75/25%	50/50%
	бурый уголь	смесь угля и листьев	смесь угля и листьев	смесь угля и листьев	смесь угля и листьев ивы	смесь угля и листьев ивы	смесь угля и листьев ивы
Температура, °С							
600	21,79	20,4	18,65	12,69	20,55	18,76	17,33
700	13,55	7,77	6,39	4,15	8,97	7,44	6,03
800	7,21	2,15	1,95	1,89	2,89	2,34	1,77

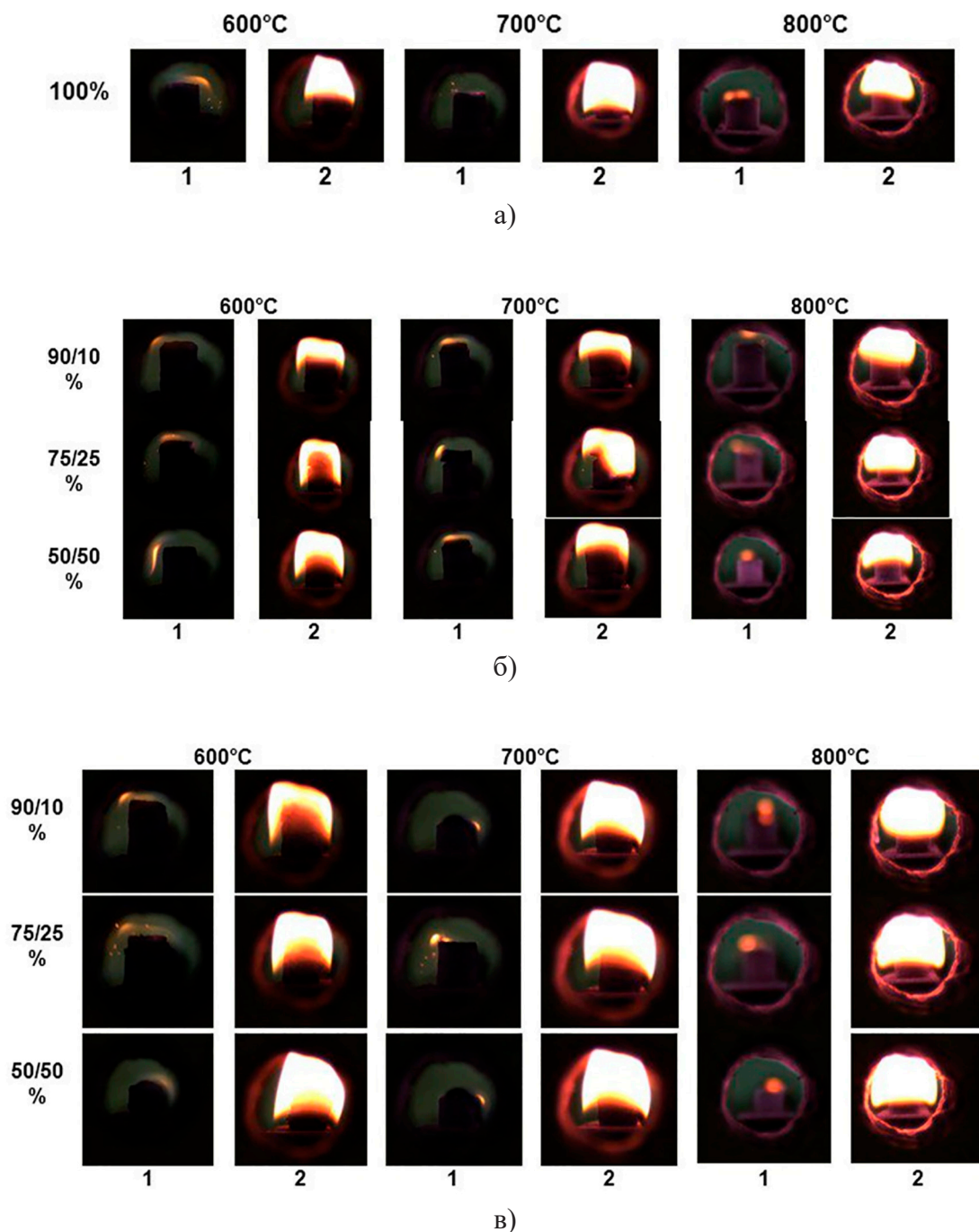


Рис. 2. Кадры моментов зажигания и горения образцов бурого угля, смеси бурого угля и листьев в разной массовой концентрации: 1 – момент зажигания; 2 – горение смеси: а – уголь бурый; б – смеси топлива на основе угля и листьев ивы в разных массовых концентрациях; в – смеси топлива на основе смеси листьев и угля в разных массовых концентрациях

Результаты исследований показали, что увеличение доли листьев в угле до 50% способствует значительному уменьшению времен задержки зажигания.

На рис. 2 приведены типичные кадры процессов воспламенения смесевых топлив исследуемых навесок в широком диапазоне температур.

Заключение

Выполненные экспериментальные исследования позволяют обосновать перспективность применения листьев как эффективной добавки к углю, способствующей ускорению процессов воспламенения, эффект позволит в перспективном будущем снизить затраты на процессы разжигания

энергетических котлов средней и малой мощности.

Технический анализ показал, что зольность при добавлении листвы в бурый уголь увеличивается, что не является положительным эффектом, однако увеличение зольности компенсируется значительным уменьшением времени задержки зажигания смесевых топлив.

Экспериментальные исследования подтверждают перспективность применения комбинированных топлив на энергетических установках средней и малой мощности для выработки тепловой энергии.

Список литературы

1. Nikiforov A., Kinzhibekova A., Prikhodko E., Karmanov A., Nurkina S. Analysis of the Characteristics of Bio-Coal Briquettes from Agricultural and Coal Industry Waste // *Energies*. 2023. MDPI. Vol. 16 (8). P. 1–16. DOI: 10.3390/en16083527.
2. Yankovsky S.A., Kuznetsov G.V., Misyukova A.D. Justification of Reducing the Yield of Sulfur Oxides in the Pyrolysis of Coals with the Addition of Logging Waste // *Chemistry of solid fuel*. 2022. № 1. P. 57–65. DOI: 10.31857/S0023117722010108.
3. Kuznetsov G., Cherednik I., Galaktionova A., Yankovsky S. The influence of wood processing waste on the technical and energy characteristics of the Maikuben coal-based mixed fuels // *J. Phys. Conf Ser.* 2021. Vol. 2057, Is. 1. P. 012128. DOI: 10.1088/1742-6596/2057/1/012128.
4. Dyah M., Lenny M.E. Value Increasing of Reject Coal with Biomass Adding as Bio-coal Briquette // *Indonesian journal of urban and environmental technology*. 2020 Vol. 3, Is. 2. P. 123–135. DOI: 10.25105/urbanenvirotech.v3i2.5110.
5. Bai X., Lu G., Bennet T., Sarroza A., Eastwick C., Liu H., Yan Y. Combustion behavior profiling of single pulverized coal particles in a drop tube furnace through high-speed imaging and image analysis // *Exp. Therm. Fluid Sci.* Elsevier. 2017. Vol. 85. P. 322–330. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2017.03.018.
6. Mouton L., Trigaux D., Allacker K., Röck M. Low-tech passive solar design concepts and bio-based material solutions for reducing life cycle GHG emissions of buildings // *Energy Build.* Elsevier. 2023. Vol. 282. P. 112678. DOI: 10.1016/j.enbuild.2022.112678.