

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-4-363-376>

УДК 629.331-504

Совместное сжигание продуктов пиролиза шин и древесных пеллет

А. В. Гриценко¹⁾, Н. В. Внукова²⁾, Е. И. Позднякова²⁾

¹⁾Научно-исследовательское учреждение «Украинский научно-исследовательский институт экологических проблем» (Харьков, Украина),

²⁾Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет (Харьков, Украина)

© Белорусский национальный технический университет, 2021
Belarusian National Technical University, 2021

Реферат. К числу основных источников загрязнения окружающей среды относятся теплоэлектростанции. Ухудшение качества традиционных углеродсодержащих энергоресурсов ведет к необходимости развития технологий совместного сжигания биотоплива и угля на малых и крупных электростанциях. В настоящей статье предлагается концепция использования твердых отходов переработки шин путем добавления в состав смесового топлива «уголь – древесные отходы» в качестве заменителя угля шлака, образующегося при утилизации изношенных шин методом пиролиза. Цель исследования – определение возможности повышения теплотворной способности древесных пеллет путем совместного их сжигания с пиролизным шлаком вместо угля без увеличения нагрузки на окружающую среду. При этом ставились задачи: определение низшей теплоты сгорания смесовых топлив и оценка ее изменения при замене угля на шлак; определение влажности, содержания общей серы, выхода летучих веществ, зольности смесовых топлив по стандартным методикам и оценка изменения этих параметров при замене угля на шлак при одинаковых соотношениях компонентов; определение оптимальных соотношений компонентов в смесовых топливах, не увеличивающих нагрузку на окружающую среду при замене угля на пиролизный шлак. Установлено, что при замене угля шлаком происходит повышение теплотворной способности на 37–45 %, уменьшение содержания золы на 37–42 %, увеличение выхода летучих веществ. Вместе с тем содержание серы увеличивается на 5,6–18 %. Для снижения выброса диоксидов серы рекомендуется применение традиционного очистного оборудования. Результаты исследования позволяют обосновать возможности замены угля шлаком в смесовых топливах при определенных соотношениях компонентов. Предложено новое направление использования твердых продуктов утилизации резинотехнических изделий, в частности изношенных шин, методом пиролиза в смесовых топливах «шлак – древесные пеллеты» для малых и средних энергетических установок.

Ключевые слова: шлак, смесовые топлива, теплота сгорания, зола, сера, выход летучих веществ, отходы, малая энергетика, пиролиз

Для цитирования: Гриценко, А. В. Совместное сжигание продуктов пиролиза шин и древесных пеллет / А. В. Гриценко, Н. В. Внукова, Е. И. Позднякова // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2021. Т. 64, № 4. С. 363–376. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-4-363-376>

Адрес для переписки

Гриценко Анатолий Владимирович
Научно-исследовательское учреждение
«Украинский научно-исследовательский институт
экологических проблем»
ул. Бакулина, 6,
61166, г. Харьков, Украина
Тел.: +38 057 702-15-92
directorniiep@gmail.com

Address for correspondence

Grytsenko Anatolii V.
Research Institution
“Ukrainian Scientific Research Institute
of Ecological Problems”
6, Bakulina str.,
61166, Kharkov, Ukraine
Tel.: +38 057 702-15-92
directorniiep@gmail.com

Co-Combustion of Tire Pyrolysis Products and Wood Pellets

A. V. Grytsenko¹⁾, N. V. Vnykova²⁾, O. I. Pozdnyakova²⁾

¹⁾Research Institution “Ukrainian Scientific Research Institute of Ecological Problems” (Kharkov, Ukraine),

²⁾Kharkov National Automobile and Highway University (Kharkov, Ukraine)

Abstract. Thermal power plants remain one of the main sources of environmental pollution. The deterioration of the quality of traditional carbon-containing energy resources leads to the need to develop technologies for co-combustion of biofuel and coal at small and large power plants. The paper proposes the concept of using solid waste from tire recycling by adding to the composition of the mixed fuel “coal – wood waste” as a substitute for coal slag, which is formed during the utilization of worn-out tires by pyrolysis. The aim of the work was to determine the possibility of increasing the calorific value of wood pellets by co-firing with pyrolysis slag instead of coal without increasing the burden on the environment. At the same time, the following tasks have been set: to determine the lowest combustion heat of mixed fuels and assess its change when replacing coal with slag; to determine moisture content, total sulfur content, volatile matter yield, ash content of mixed fuels according to standard methods; to assess the change in these parameters when replacing coal with slag at the same component ratios; to determine the optimal ratios of components in mixed fuels, which will not increase the burden on the environment when replacing coal with pyrolysis slag. It has been determined that replacing coal with slag results in an increase in calorific value by 37–45 %, a decrease in ash content by 37–42 %, and an increase in the yield of volatile substances. At the same time, the sulfur content increases by 5.6–18 %. The use of traditional cleaning equipment is recommended in order to reduce the emission of sulfur dioxide. The research results make it possible to substantiate the possibility of replacing coal with slag in mixed fuels at certain ratios of components. A new direction of using solid products from recycling of rubber products, i.e. worn-out tires, has been proposed by the pyrolysis method in mixed fuels “slag-wood pellets” for small and medium-sized power plants.

Keywords: slag, mixed fuels, calorific value, ash, sulfur, volatile content, waste, small energy, pyrolysis

For citation: Grytsenko A. V., Vnykova N. V., Pozdnyakova O. I. (2021) Co-Combustion of Tire Pyrolysis Products and Wood Pellets. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 64 (4), 363–376. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-4-363-376> (in Russian)

Введение

Несмотря на интенсивное развитие альтернативных источников энергии, основным энергоресурсом по-прежнему остается углеродсодержащее сырье. Вероятно, эта ситуация сохранится и в ближайшие десятилетия. В настоящее время около 36 % электроэнергии в мире вырабатывается на угольных тепловых электрических станциях (ТЭС), которые, таким образом, относятся к числу основных стационарных источников загрязнения окружающей среды. Как известно [1], на долю процессов сгорания приходится более 95 % эмиссии CO₂, 85 % SO₂. Кроме того, шлак и пеллеты получают из отходов, а в большинстве промышленно развитых стран значительная часть отходов утилизируется сжиганием [2]. Ухудшение качества традиционных углеродсодержащих энергоресурсов ведет к необходимости

развития технологий сжигания биотоплива не только в коммунальном секторе для целей теплоснабжения, но и для производства электроэнергии даже на крупных электростанциях.

Уменьшить вредное воздействие сжигающих уголь ТЭС можно несколькими способами: совершенствованием технологии сжигания топлива, конструкции котлов и горелок; установкой пылегазоочистного оборудования; улучшением качества топлива.

Первые два направления требуют больших капиталовложений и имеют длительный срок окупаемости. Высокая стоимость современного пылегазоочистного оборудования ограничивает возможности его применения на объектах малой и средней энергетики. Запасы высококачественных углей с низким содержанием серы и золы ограничены, а использование энергетических углей с содержанием золы более 30 % существенно осложняет работу пылегазоочистного оборудования [3].

Сжигание смесевых топлив на основе каменных углей и биомассы – самый низкокзатратный способ сокращения эмиссии токсичных веществ. Половина из производимых в мире пеллет используется в качестве топлива на ТЭС [4]. Совместное сжигание угля и биомассы (древесина, рисовая шелуха, овсяная солома, сахарный тростник, отходы переработки оливок и др.) распространено в ряде развитых стран Европы (Германия, Финляндия, Швеция), Канаде, Китае, Индии и США. Данная технология реализована не менее чем на 230 предприятиях мало- и крупнотоннажного сжигания смесевых топлив на основе углей и биомассы, причем как в рамках экспериментов, так и в условиях многолетней работы котельных агрегатов ТЭС [3, 5].

Обзор методов совместного сжигания углей и отходов древесины в составе смесевых топлив [3] позволил выделить следующие основные технологии:

- сжигание в циклонных котлах при добавлении не более 5 % древесины;
- использование пылеугольных топок с возможностью добавления до 20 % древесины;
- совместное сжигание в кипящем слое при содержании древесных отходов 10–20 %;
- применение котлов со слоевыми топками, в которых содержание древесины может варьироваться от 0 до 100 %.

Все перечисленные технологии имеют преимущества и недостатки и нашли практическое применение. Известны несколько способов совместного и раздельного введения отходов древесины и угля в топку [6]. Наиболее перспективной считается технология совместного сжигания пеллет с углем в пылеугольных котлах, при которой биомасса готовится в автономной системе подачи и помола. Далее пеллеты сжигаются в горелках, оптимизированных для сжигания биомассы [7].

Согласно различным исследованиям [5, 7], содержание пеллет в топливных смесях с углями может составлять от 5 до 50 %. Однако считается,

что устойчивое горение смесевых топлив возможно при содержании древесных отходов до 10 %.

Использование смесевых топлив на основе древесных отходов и углей положительно повлияет не только на экологические, но и на технические характеристики энергетических установок. Так, применение смесевых топлив на основе углей и биомассы в котлах со слоевыми топками приводит к повышению эффективности работы электростанций [8–10]. Причем при производстве тепловой энергии добавление до 10 % биомассы приводит к снижению энергетических характеристик энергоустановок не более чем на 5 % [11, 12]. Использование смесевых топлив на малых и средних ТЭС (мощностью 15 кВт – 150 МВт) обеспечивает надежную работу агрегатов и снижение эмиссии токсичных веществ в окружающую среду [13–15].

В работах отечественных и зарубежных авторов проанализированы преимущества использования смесевых топлив на основе угля и отходов древесины на промышленных установках [5, 16–19], в общем виде их можно представить следующим образом [20]:

а) снижаются цены на приобретение топлива (в среднем в США стоимость пеллет почти на 20 % ниже стоимости угля) и происходит диверсификация рынка энергоносителей, привлечение возобновляемых ресурсов в энергетический баланс; в результате повышается энергетическая независимость государства;

б) уменьшается эмиссия оксидов серы, азота, а также золы;

в) сокращается сброс отходов биомассы в отвалы;

г) снижаются выбросы парниковых газов (сокращение достигает более 60 %) [4];

д) увеличивается возможность использования местного биотоплива и продуктов утилизации шин;

е) повышается эффективность котлов со слоевыми топками.

Кроме того, основным преимуществом совместного сжигания является использование уже существующего котельного оборудования [4]. Дооснащение существующих электростанций под использование биомассы требует значительно меньших капитальных затрат, чем строительство новых.

К недостаткам технологии можно отнести низкую плотность и калорийность твердой биомассы, а иногда и высокую влажность [21].

Таким образом, совместное сжигание углей и древесных отходов имеет ряд экологических, экономических и, по мнению некоторых авторов, технических преимуществ. В настоящее время оно интенсивно развивается в ряде стран Европы, Америки, Азии, а также в России. Положительный эффект может быть достигнут при различных технологиях совместного сжигания и подготовки смесового топлива на промышленных и опытных установках. В основном добавки биотоплива применяются в случае использования углей с высоким содержанием золы и серы.

Как показывает анализ научных работ, возможность использования в смесях с древесиной вместо углей углеродсодержащих отходов изучена

недостаточно. Например, в [22] обосновано получение экологического и экономического эффекта от совместного использования отходов нефтепереработки и древесных горючих отходов в качестве твердого топлива для локальных систем теплоснабжения. Причем отходы нефтепереработки в таких смесевых топливах заменяют уголь. В [23] предлагается использовать твердое гранулированное топливо на основе твердого продукта пиролиза резинотехнических изделий (РТИ), отходов древесины и азотсодержащих веществ в соотношении соответственно (50–70)/(20–30)/(5–10) массовых процентов. Однако использование такого топлива возможно только по технологии кипящего слоя и приводит к увеличению эмиссии оксидов азота.

В [24] на основе сравнительного анализа свойств пиролизного шлака, углей и пеллет и оценочных расчетов предложена полезная модель смесевоего топлива на основе пиролизного шлака изношенных шин и древесных пеллет. Соотношения компонентов обоснованы расчетным путем, экспериментальная проверка влияния шлака на экологические характеристики процессов горения проведена не была.

Таким образом, возможность использования в топливных смесях отходов переработки РТИ, в частности изношенных шин, изучена недостаточно.

Концепция совместного использования отходов в качестве топлива

Предлагаемая концепция использования твердых отходов переработки шин заключается в добавлении в состав смесевоего топлива «уголь – древесные отходы» в качестве заменителя угля шлака, образующегося при утилизации изношенных шин методом пиролиза. Содержание углерода в твердом пиролизном шлаке соответствует аналогичному показателю для антрацита. Следовательно, твердые продукты пиролиза можно использовать как хорошее высококалорийное топливо, по величине теплоты сгорания сходное с антрацитом [25], если при этом не возрастает эмиссия токсичных веществ в окружающую среду.

В последние годы появились пиролизные установки нового поколения для утилизации РТИ, в частности изношенных шин. Они успешно применяются в Польше, Китае и США [26, 27]. Основное назначение таких установок – производство аналогов жидкого топлива. Однако одним из продуктов пиролиза, как известно, всегда является твердый углеродистый остаток (шлак), который не может быть использован в качестве адсорбента без специальной обработки [28]. По нашему мнению, применение пиролизного шлака в смесевом топливе вместо угля позволит использовать такие отходы в качестве энергоресурсов без дополнительной обработки.

Свойства шлака и углей во многом подобны [25, 26, 29]. Например, содержание серы и зольность шлака не выше, чем в высококачественных марках энергетических углей, и существенно ниже, чем в некоторых сор-

тах антрацитового штыба и газовых углях. Так, в Украине 49 % ТЭС спроектированы для работы на низкорреакционном антрацитовом штыбе и тощем угле, зольность которых достигает 37 %, а теплота сгорания не превышает 17,5 МДж/кг [3, 29]. Кроме того, твердые продукты пиролиза имеют низкую стоимость, и частичная замена ими угля позволит снизить затраты на закупку топлива.

В данной статье предлагается использовать на объектах малой и средней энергетики смесевые топлива на основе пиролизного шлака РТИ и древесных пеллет. Это позволит обеспечить необходимую теплотворную способность топлива на действующем оборудовании (как и при использовании смесей «уголь – пеллеты»), сократить потребление ископаемого сырья и эмиссию токсичных веществ в окружающую среду за счет меньшей зольности шлака, а также найти новую область применения продуктов утилизации РТИ, в частности изношенных шин. Предлагаемое двухкомпонентное топливо позволит обеспечить выполнение экологических и энергетических требований к промышленным котельным малой и средней мощности.

В силу менее значимого влияния малой энергетики на окружающую среду на ее объектах в качестве местного топлива могут использоваться горючие отходы, в том числе пиролизный шлак, что сокращает расходы на транспортировку топлива, способствует утилизации отходов и экономии природного сырья.

В последние годы увеличивается спрос на отопительные промышленные котлы, использующие в качестве твердого топлива пеллеты. При несомненном преимуществе пеллет с точки зрения воздействия на окружающую среду их теплотворная способность ниже, чем у самых низкоккачественных углей.

Цель данного исследования – определение возможности повышения теплотворной способности древесных пеллет путем совместного их сжигания с пиролизным шлаком вместо угля без увеличения нагрузки на окружающую среду. При этом ставились задачи: определение низшей теплоты сгорания смесевых топлив и оценка ее изменения при замене угля на шлак; определение влажности, содержания общей серы, выхода летучих веществ, зольности смесевых топлив по стандартным методикам и оценка изменения этих параметров при замене угля на шлак при одинаковых соотношениях компонентов; определение оптимальных соотношений компонентов в смесевых топливах, не увеличивающих нагрузку на окружающую среду при замене угля на пиролизный шлак.

Характеристика объектов исследования и экспериментальные данные

Свойства пиролизного шлака, как известно, зависят от состава исходного сырья, температурного режима и технологических особенностей установок [28] и могут изменяться в широких пределах (табл. 1) [20]. Иссле-

дуем шлак, полученный методом среднетемпературного пиролиза изношенных шин на установке украинского производства. Сравним характеристики смесевых топлив на его основе с характеристиками смесевых топлив на основе углей марки АШ, часто используемых на объектах малой энергетики (табл. 1). Высокое содержание золы и низкая калорийность таких углей отмечены в [29, 30]. Поскольку в настоящее время в Украине нет единого стандарта на древесные пеллеты, рассмотрим средние по свойствам пеллеты украинских производителей (табл. 1) [20].

Таблица 1

Характеристики компонентов смесевых топлив

Characteristics of composite fuels components

Компонент топлива	Содержание общей серы S_t^d , %	Влажность W , %	Зольность A^d , %	Выход летучих веществ V^{daf} , %	Низшая теплота сгорания Q , МДж/кг
Пиролизный шлак	2,40	2,5	12,5	5,2	28,2
Антрацитовый штыб	2,00	9,0	21,4	6,0	18,9
Древесные пеллеты	0,02	7,5	1,3	78,0	17,5

При исследовании совместного сжигания антрацитового штыба и древесных биогранул установлено, что при содержании биогранул до 40 % теплотехнические характеристики котлов не ухудшаются [30]. В [3] обоснована возможность увеличения доли древесины в смесевых топливах до 50 %. С учетом этих данных проанализированы смеси пиролизного шлака и древесных пеллет при соотношениях компонентов 50/50 (табл. 2, смесь 1.1). Соотношение шлак/пеллеты в смесях 1.2, 1.3 соответственно 80/20, 90/10. Для сравнения даны характеристики смеси «уголь – пеллеты» при таких же соотношениях компонентов (табл. 2, смеси 2.1–2.3).

Такие характеристики топлив, как низшая теплота сгорания (Q), зольность (A^d), влажность (W), содержание общей серы (S_t^d) и выход летучих веществ (V^{daf}), используются традиционно для обоснования возможности их эффективного применения при сжигании в топках энергетического оборудования. К числу основных экологических показателей, характеризующих воздействие процессов горения на окружающую среду, относятся зольность топлива и массовое содержание в нем серы. Экологические характеристики процессов горения пиролизного шлака определяли по стандартным методикам в смесях 1.1–1.3. Определение низшей теплоты сгорания проводилось при помощи калориметрической бомбы на калориметре сжигания АБК-1 по стандартной методике [31]. Указанные характеристики для смесей «уголь АШ – пеллеты» (смеси 2.1–2.3) при таких же соотношениях компонентов приведены в табл. 2.

Как видно из табл. 2, практически все исследованные характеристики смесей «шлак – пеллеты» лучше, чем «уголь – пеллеты» (кроме содержания серы), при соответствующих соотношениях компонентов.

Таблица 2

Характеристики смесевых топлив
Composite fuels characteristics

№ смеси	Соотношение «углеродсодержащий компонент/пеллеты»	Содержание общей серы S_t^d , %	Зольность A^d , %	Низшая теплота сгорания Q , МДж/кг	Выход летучих веществ V^{daf} , %
Смесевые топлива «пиролизный шлак – древесные пеллеты»					
1.1	50/50	1,70	7,70	24,83	43,80
1.2	80/20	1,95	10,10	26,20	19,20
1.3	90/10	2,30	11,20	26,80	15,16
1.4	10/90	0,34	4,81	20,04	74,40
1.5	20/80	0,58	5,65	21,19	67,40
Смесевые топлива «уголь АШ – древесные пеллеты»					
2.1	50/50	1,61	12,30	18,00	41,20
2.2	80/20	1,80	17,30	18,20	18,10
2.3	90/10	2,12	19,40	18,40	14,30
2.4	10/90	0,31	5,65	17,72	70,70
2.5	20/80	0,49	7,70	17,85	63,20

В табл. 3 приведены результаты расчета относительного изменения параметров смесевых топлив, полученные на основании данных табл. 2.

Таблица 3

Результаты расчета относительного изменения параметров смесей
Results of calculating relative change in parameters of mixtures

Соотношение «углеродсодержащий компонент/пеллеты»	Изменение низшей теплоты сгорания ΔQ	Изменение зольности ΔA^d	Изменение содержания общей серы ΔS_t^d	Изменение выхода летучих веществ ΔV^{daf}
50/50	6,83/37,90	4,60/37,30	0,09/5,60	2,30/5,60
80/20	8,00/43,95	7,20/41,42	0,15/8,30	1,10/6,07
90/10	8,40/45,65	8,20/42,26	0,18/8,49	0,86/6,00
10/90	2,32/13,09	0,84/14,60	0,03/9,67	3,70/5,20
20/80	3,34/18,70	2,05/26,60	0,09/18,40	4,20/6,60

В числителе дроби приведены абсолютные изменения параметров смесей «шлак – пеллеты», а в знаменателе – процент изменения этих параметров по отношению к смесям «уголь – пеллеты» при соответствующих соотношениях компонентов. При расчетах за 100 % принимали значения каждого параметра в смесях «уголь – пеллеты» при соответствующих соотношениях компонентов в смесевых топливах.

Согласно полученным данным, замена угля на шлак в смесевых топливах 1.1–1.3 приводит к повышению теплотворной способности на 37–45 % в зависимости от соотношения компонентов. При этом содержание золы

уменьшается на 37–42 % по отношению к смесям «уголь – пеллеты». Содержание серы в таких смесях увеличивается на 5,6–18 % по сравнению со смесями 2.1–2.3, причем в абсолютных числах оно изменяется только на 0,09–0,18. Таким образом, замена угля на пиролизный шлак в смесевых топливах ведет к увеличению эмиссии диоксидов серы. Для снижения их выбросов рекомендуется применять очистное оборудование.

Согласно данным табл. 3, замена угля на шлак увеличивает выход летучих веществ в среднем на 6 % вне зависимости от соотношения компонентов в смесях. Введение пеллет в смесевые топлива приводит к росту выхода летучих веществ по сравнению как со шлаком, так и с углем (табл. 1). Известно, что увеличение выхода летучих веществ в смесях «уголь – пеллеты» [5] свидетельствует о снижении максимальной температуры термического разложения, а процесс полного разложения топлива проходит при более низких температурах и увеличении скорости этого процесса. Очевидно, выход летучих веществ растет и при использовании смесей «шлак – пеллеты». Кроме того, увеличение выхода летучих веществ в результате использования пеллет позволяет сократить расход природного газа для подсветки топок промышленных энергоустановок, работающих на твердом топливе [32].

Согласно [1–3], составы 1.1–1.3 (табл. 2) рекомендуются для факельного сжигания, сжигания в кипящем и циркулирующем кипящем слое. При использовании этих технологий возможна эффективная замена высокозольного угля с содержанием серы более 2,4 % на пиролизный шлак при совместном сжигании с древесными пеллетами.

Смеси 1.4, 1.5 (табл. 2) можно использовать в котлах со слоевыми топками [3], причем по своим характеристикам они не уступают смесям 2.4, 2.5 (уголь – пеллеты). Замена угля на шлак приводит к увеличению теплотворной способности таких смесевых топлив, уменьшению зольности и эмиссии твердых частиц, а также незначительному увеличению содержания серы. Введение в древесные пеллеты добавок пиролизного шлака повышает калорийность топлива, при этом оно может использоваться без существенных технологических изменений в конструкции топливных котлов. Полученные авторами результаты коррелируют с данными, представленными в работе [33], в которой на основе математической модели обоснованы преимущества применения многокомпонентных твердых смесей, состоящих из древесного сырья (не менее 70 %) и углеводородсодержащих отходов, при сжигании в котельных для локальных систем теплоснабжения.

ВЫВОДЫ

1. Экспериментально определены основные экологические характеристики процессов сжигания смесевых топлив на основе низкокачественного угля АШ и древесных пеллет, а также смесей «пиролизный шлак – древесные пеллеты». Установлено, что введение в древесные пеллеты добавок пиролизного шлака повышает калорийность топлива, при этом оно может использоваться без существенных технологических изменений в конструкции топливных котлов.

2. Показано, что замена угля на шлак (в соответствующих соотношениях) в смесевых топливах повышает теплоту сгорания и выход летучих веществ, при этом зольность смесей снижается.

3. Замена угля на пиролизный шлак, полученный при утилизации шин, увеличивает содержания серы в смесевых топливах, что вызывает необходимость установки очистного оборудования.

4. Смесевые топлива с соотношением пиролизный шлак/древесные пеллеты от 50/50 до 90/10 можно рекомендовать в качестве равнозначного заменителя смесевых топлив «уголь – пеллеты» для малых и средних энергетических установок, если содержание золы в угле не менее 12,5 %, а серы – не менее 2,4 %.

5. Смеси пиролизный шлак/древесные пеллеты с соотношением 10/90, 20/80 рекомендуются для слоевого сжигания на малых и средних энергетических установках.

ЛИТЕРАТУРА

1. Комбинированное сжигание потоков различных промышленных отходов в топках котлов. Часть 2 / Ю. П. Ярмольчик [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2020. Т. 63, № 6. С. 526–540. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-6-526-540>.
2. Комбинированное сжигание потоков различных промышленных отходов в топках котлов. Часть 1 / Ю. П. Ярмольчик [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2020. Т. 63, № 3. С. 236–252. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-3-236-252>.
3. Обзор технологий совместного сжигания биомассы и угля на электрических станциях зарубежных стран / Н. М. Жовмир [и др.] // Промышленная теплотехника. 2006. Т. 28, № 2. С. 75–85.
4. Любов, В. К. Совместное сжигание каменного угля с биотопливом / В. К. Любов, А. Е. Ивтунь // Вест. Череповец. гос. ун-та. 2016. № 5. С. 16–21.
5. Янковский, С. Я. Совершенствование технологии пылевидного сжигания угля на ТЭС за счет добавления мелкодисперсной древесины / С. Я. Янковский. Томск, 2017. 122 с.
6. Рациональный выбор топлива для муниципальной котельной, или При каких условиях уголь может стать альтернативой природному газу / С. М. Назаров [и др.] // Новости теплоснабжения. 2006. № 3. С. 34–45.
7. Голубев, В. А. Обоснование и совершенствование способов энергетического использования растительных отходов / В. А. Голубев. Барнаул, 2014. 160 с.
8. Perez Jeldres, R. A. Estudio y Modelación de la Co-Combustión con Formación de Depósitos en Reactores a Combustión / R. A. Perez Jeldres. Concepción, Universidad de Concepción, 2016. 265 p.
9. Krzywański, J. Model Research of Gas Emissions from Lignite and Biomass Co-Combustion in a Large Scale CFB Boiler / J. Krzywański, R. Rajczyk, W. Nowak // Chemical and Process Engineering. 2014. Vol. 35, No 2. P. 217–231. <https://doi.org/10.2478/cpe-2014-0017>.
10. Full-Scale Co-Firing of Straw and Coal / L. S. Pedersen [et al.] // Fuel. 1996. Vol. 75, No 13. P. 1584–1590.
11. Янковский, С. А. Анализ мирового опыта сжигания смесевых топлив в топках котлоагрегатов тепловых электростанций / С. А. Янковский // Главный энергетик. 2018. № 7. С. 62–77.

12. Research of Heat Rates Effect on the Process of Fuel-Bed Gasification of “Balakhtinskoe”, “Osinnikovskoe”, “Krasnogorskoe” and “Borodinskoe” Coal Deposits / A. Zenkov [et al.] / MATEC Web of Conferences. 2016. Vol. 72. Article 01131. <https://doi.org/10.1051/matec-conf/20167201131>.
13. Biomass Co-Firing: An Efficient Way to Reduce Greenhouse Gas Emissions [Electronic resource] / K. Veijonen [et al.]. European Bioenergy Networks, 2000. Mode of access: https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/2003_cofiring_eu_bionet.pdf. Date of access: 04.06.2019.
14. Ash Deposition in Biomass Combustion or Co-Firing for Power / Y. Shao [et al.] // Energies. 2012. Vol. 5, Iss. 12. P. 5171–5189. <https://doi.org/10.3390/en5125171/>.
15. Al-Mansour, F. An Evaluation of Biomass Co-Firing in Europe / F. Al-Mansour, J. Zuwala // Biomass and Bioenergy. 2010. Vol. 34, Iss. 5. P. 620–629. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.01.004>.
16. Key World Energy Statistics 2007 [Electronic resource] / International Energy Agency (IEA). 2007. Mode of access: http://large.stanford.edu/courses/2011/ph240/demori1/docs/key_stats_2007.pdf. Date of access: 04.06.2019.
17. Sebastián, F. Cofiring Versus Biomass-fired Power Plants: GHG (Greenhouse Gases) Emissions Savings Comparison by Means of LCA (Life Cycle Assessment) Methodology / F. Sebastián, J. Royo, M. Gómez // Energy. 2011. Vol. 36, Iss. 4. P. 2029–2037. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.06.003>.
18. Исламова, С. И. Исследование эффективности преобразования энергии при термической утилизации древесной биомассы / С. И. Исламова, Е. К. Вачагина // Изв. высш. учеб. заведений. Проблемы энергетики. 2015. № 9–10. С. 3–11. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2015-0-9-10-3-11>.
19. Investigation of Slagging in Pulverized Fuel Co-Combustion of Biomass and Coal at a Pilot-Scale Test Facility / T. Heinzel [et al.] // Fuel Process Technology. 1998. Vol. 54. P. 109–125. [https://doi.org/10.1016/s0378-3820\(97\)00063-5](https://doi.org/10.1016/s0378-3820(97)00063-5).
20. Pozdnyakova, O. The Worn Tyres Pyrolysis’ Solid Products Opportunity Application as Fuel Substitute Assessment / O. Pozdnyakova, N. Vnykova // Environmental Problems. 2017. Vol. 2, No 4. P. 199–200.
21. Совместное сжигание угля и биомассы в факельных котлоагрегатах [Электронный ресурс] / Т. С. Щудло [и др.] // Горение твердого топлива: материалы VIII Всероссийской конф. с междунар. участием, 3–16 нояб. 2012. Режим доступа: <http://www.itp.nsc.ru/conferences/gtt8/files/111Shchudlo.pdf>. Дата доступа: 30.05.2019.
22. Хрусталева, Б. М. Твердое топливо из углеводородсодержащих, древесных и сельскохозяйственных отходов для локальных систем теплоснабжения / Б. М. Хрусталева, А. Н. Пехота // Энергетика. Изв. высш. учебн. заведений и энерг. объединений СНГ. 2017. Т. 60, № 2. С. 147–158. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-2-147-158>.
23. Твердотопливная гранулированная композиция и способ ее получения: пат. № 2484124 Российская Федерация. МПК C10/C10L/C10L5 / В. И. Назаров, Д. А. Макаренко, Е. А. Баринский. Оpubл. 10.01.2013.
24. Спосіб одержання комплексного палива для енергетичних пристроїв малої та середньої потужності з продуктів переробки промислових відходів: пат. № 116918 Україна, МПК C10L5/44 (2006.01)C10L5/48(2006.01) / А. М. Туренко, Н. В. Внукова, О. І. Позднякова. Оpubл. 25.01.2017.
25. Булавин, О. В. Применение низкотемпературного пиролиза для переработки автомобильных шин / О. В. Булавин, В. М. Пашкевич // Экологические проблемы промышленных мегаполисов: материалы междунар. науч.-практ. конф.: в 2 т. Донецк: Лебедь, 2004. Т. 2. С. 103–108.
26. Pyrolysis Process of Whole Waste Tires as a Biomass Energy Recycling / M. Ryms [et al.] // Ecological Chemistry and Engineering S. 2013. Vol. 20, No 1. P. 93–107. <https://doi.org/10.2478/eces-2013-0007>.

27. Pyrolassist – Pyrolysis Consultants [Electronic resource] / Maura Keller // USA Archives – Edition of American Recycler News. 2017. Mode of access: <https://pyrolassist.com/environment/8>. Date of access: 30.05.2019.
28. Cunliffe, A. M. Properties of Chars and Activated Carbons Derived from the Pyrolysis of Used Tyres / A. M. Cunliffe, P. T. Williams // *Environmental Technology*. 1998. Vol. 19, No 12. P. 1177–1190. <https://doi.org/10.1080/09593331908616778>.
29. Энергетика: история, настоящее и будущее: в 5 т. / С. Г. Плачкова [и др.]; под общ. ред. С. Г. Плачкова. 2-е изд. Киев, 2012–2013. Т. 3. Ч. 1. 343 с.
30. Исследование сосжигания антрацитового штыба и биогранул в отопительном котле с топкой с высокотемпературным кипящим слоем / А. В. Михалев [и др.] // *Промышленная теплотехника*. 2006. Т. 28, № 1. С. 64–68.
31. Палива тверді мінеральні. Визначення найвищої теплоти згорання методом спалювання в калориметричній бомбі та обчислення найнижчої теплоти згорання: ДСТУ ISO 1928:2006 (ISO 1928:1995, IDT). Введ. 01.07.2008. Київ: Держстандарт України: Національний науковий центр «Інститут метрології», 2008. 46 с.
32. Филатов, В. И. Сумісне спалювання біомаси та антрациту в паровому котлі блоку 300 Мвт / В. И. Филатов, О. Ю. Тишко // *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2018. № 2. С. 38–42.
33. Хрусталева, Б. М. Технология эффективного использования углеводородсодержащих отходов в производстве многокомпонентного твердого топлива / Б. М. Хрусталева, А. Н. Пехота // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2016. Т. 59, № 2. С. 122–140. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2016-59-2-122-140>.

Поступила 01.07.2019 Подписана в печать 11.12.2019 Опубликована онлайн 30.07.2021

REFERENCES

1. Yarmolchick Yu. P., Schröger R., Haberfelner H., Pichler M., Kostić D., Moroz G. V. (2020) Combined Combustion of Various Industrial Waste Flows in Boiler Furnaces. Part 2. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 63 (6), 526–540. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-6-526-540> (in Russian).
2. Yarmolchick Yu. P., Schröger R., Haberfelner H., Pichler M., Kostić D., Moroz G. V. (2020) Combined Combustion of Various Industrial Waste Flows in Boiler Furnaces. Part 1. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 63 (3), 236–252. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-3-236-252> (in Russian).
3. Zhovmir N. M., Geletukha G. G., Zheleznaya T. A., Slenkin M. V. (2006) Review of Technologies for Co-Firing Biomass and Coal at Power Plants of Foreign Countries. *Promyshlennaya Teplotekhnika = Industrial Heat Engineering*, 28 (2), 75–85 (in Russian).
4. Lyubov V. K., Ivtun' A. E. (2016) Co-Combustion of Coal with Biofuel. *Vestnik Cherepovetskogo Gosudarstvennogo Universiteta = Cherepovets State University Bulletin*, (5), 16–21 (in Russian).
5. Yankovskii S. Ya. (2017) Improving the Technology of Pulverized Coal Combustion at Thermal Power Plants by Adding Fine Wood. Tomsk. 122 (in Russian).
6. Nazarov S. M., Kalinin E. V., Is'eman R. L., Kuz'min S. N., Konyakhin V. V., Mikhalev A. V. (2006) Rational Choice of Fuel for a Municipal Boiler House, or Under what Conditions Coal Can Become an Alternative to Natural Gas. *Novosti Teplosnabzheniya [News of Heat Supply]*, 3 (67), 34–45 (in Russian).

7. Golubev V. A. (2014) *Substantiation and Improvement Methods of Plant Waste Energy Use*. Barnaul. 160 (in Russian).
8. Perez Jeldres R. A. (2016) *Estudio y Modelación de la Co-Combustión con Formación de Depósitos en Reactores a Combustión*. Concepción. Universidad de Concepción. 265 (in Spanish).
9. Krzywański J., Rajczyk R., Nowak W. (2014) Model Research of Gas Emissions from Lignite and Biomass Co-Combustion in a Large Scale CFB Boiler. *Chemical and Process Engineering*, 35 (2), 217–231. <https://doi.org/10.2478/cpe-2014-0017>.
10. Pedersen L. S., Michelsen H. Ph., Kiil S., Hansen L. A., Dam-Johansen K., Kildsig F., Christensen J., Jespersen P. (1996) Full-Scale Co-Firing of Straw and Coal. *Fuel*, 75 (13), 1584–1590.
11. Yankovskii S. A. (2018) Analysis of the World Experience in the Combustion of Mixed Fuels in the Furnaces of Boiler Units of Thermal Power Plants. *Glavnyi Energetik = Chief Power Engineer*, (7), 62–77 (in Russian).
12. Zenkov A., Yankovsky S., Matveeva A., Lavrinenko S., Gromov A. (2016) Research of Heat Rates Effect on the Process of Fuel-Bed Gasification of “Balakhtinskoe”, “Osinnikovskoe”, “Krasnogorskoe” and “Borodinskoe” Coal Deposits. *MATEC Web of Conferences*, 72, 01131. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20167201131>.
13. Veijonen K., Vainikka P., Järvinen T., Alakangas E. (2000). *Biomass Co-Firing: An Efficient Way to Reduce Greenhouse Gas Emissions*. European Bioenergy Networks. Available at: https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/2003_cofiring_eu_bionet.pdf (Accessed 4 April 2019).
14. Shao Y., Wang J., Preto F., Zhu J., Xu Ch. (2012) Ash Deposition in Biomass Combustion or Co-Firing for Power. *Energies*, 5 (12), 5171–5189. <https://doi.org/10.3390/en5125171>.
15. Al-Mansour F., Zuwala J. (2010) An Evaluation of Biomass Co-Firing in Europe. *Biomass and Bioenergy*, 34 (5), 620–629. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.01.004>.
16. International Energy Agency (IEA) (2007) *Key World Energy Statistics 2007*. Available at: http://large.stanford.edu/courses/2011/ph240/demori1/docs/key_stats_2007.pdf (Accessed 4 June 2019).
17. Sebastián F., Royo J., Gómez M. (2011) Cofiring Versus Biomass-Fired Power Plants: GHG (Greenhouse Gases) Emissions Savings Comparison by Means of LCA (Life Cycle Assessment) Methodology. *Energy*, 36 (4), 2029–2037. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.06.003>.
18. Islamova S. I., Vachagina E. K. (2015) Study of Energy Conversion Efficiency at Thermal Utilization of Wood Biomass. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Problemy Energetiki = Power Engineering: Research, Equipment, Technology*, (9–10), 3–11. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2015-0-9-10-3-11> (in Russian).
19. Heinzl T., Siegle V., Spliethoff H., Hein K. R. G. (1998) Investigation of Slagging in Pulverized Fuel Co-Combustion of Biomass and Coal at a Pilot-Scale Test Facility. *Fuel Process Technology*, 54, 109–125. [https://doi.org/10.1016/s0378-3820\(97\)00063-5](https://doi.org/10.1016/s0378-3820(97)00063-5).
20. Pozdnyakova O., Vnykova N. (2017) The Worn Tyres Pyrolysis’ Solid Products Opportunity Application as Fuel Substitute Assessment. *Environmental Problems*, 2 (4), 199–200.
21. Schudlo T. S., Dunaevskaya N. I., Bestsenyi I. V., Bondzik D. L. (2012) Joint Combustion of Coal and Biomass in Flare Boilers. *Gorenie Tverdogo Topliva: Materialy VIII Vserossiiskoi Konf. s Mezhdunar. Uchastiem, 3–16 Noyab. 2012* [Combustion of Solid Fuel: Proceedings of the VIII All-Russian Conference with International Participation, Nov. 3–16, 2012]. Available at: <http://www.itp.nsc.ru/conferences/gtt8/files/111Shchudlo.pdf> (Accessed 30 May 2019) (in Russian).
22. Khroustalev B. M., Pekhota A. N. (2017) Solid Fuel of Hydrocarbon, Wood and Agricultural Waste for Local Heat Supply Systems. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob’edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 60 (2), 147–158. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-2-147-158> (in Russian).

23. Nazarov V. I., Makarenkov D. A., Barinskii E. A. (2013) *Solid Fuel Granular Composition and Method for its Production*. Patent No 2484124 Russian Federation (in Russian).
24. Turenko A. M., Vnykova N. V., Pozdnyakova O. I. (2017) *The Method of Obtaining a Complex Firing for Power Plants of Low and Medium Power from Products of Industrial Waste Processing*. Patent No 116918 Ukraine (in Ukrainian).
25. Bulavin O. V., Pashkevich V. M. (2004) Application of Low-Temperature Pyrolysis for the Processing of Automobile Tires. *Ekologicheskie Problemy Industrial'nykh Megapolisov: Materialy Mezhdunar. Nauch.-Prakt. Konf. T. 2* [Environmental Problems of Industrial Megapolises: Materials of the International Scientific and Practical Conference. Vol. 2]. Donetsk, Lebed' Publ. 103–108 (in Russian).
26. Ryms M., Januszewicz K., Lewandowski W. M., Klugmann-Radziemska E. (2013) Pyrolysis Process of Whole Waste Tires as a Biomass Energy Recycling. *Ecological Chemistry and Engineering S*, 20 (1), 93–107. <https://doi.org/10.2478/eces-2013-0007>.
27. Keller Maura (2017) Pyrolassist-Pyrolysis Consultants. USA Archives – Edition of American Recycler News. Available at: <https://pyrolassist.com/environment/8> (Accessed 30 May 2019).
28. Cunliffe A. M., Williams P. T. (1998) Properties of Chars and Activated Carbons Derived from the Pyrolysis of Used Tyres. *Environmental Technology*, 19 (12), 1177–1190. <https://doi.org/10.1080/09593331908616778>.
29. Plachkova S. G. [et al.] (2012–2013) *Power Engineering: History, Present and Future. Vol. 3, Part 1*. Kiev. 343 (in Russian).
30. Mikhalev A. V., Kuz'min S. N., Is'emin R. L., Konyakhin V. V., Krasavtsev B. E., Zorin A. T. (2006) A Study of the Co-Combustion of Anthracite Powder and Biogranules in a Heating Boiler with a High-Temperature Fluidized Bed Furnace. *Promyshlennaya Teplotekhnika = Industrial Heat Engineering*, 28 (1), 64–68 (in Russian).
31. DSTU ISO 1928: 2006 (ISO 1928: 1995, IDT). *Solid Mineral Fuels. Determination of the Highest Heat of Combustion by the Method of Combustion in a Calorimetric Bomb and Calculation of the Lowest Heat of Combustion*. Kyiv, State Standardization Service of the Ukraine, National Research Center "Institute of Metrology", 2008. 46 (in Ukrainian).
32. Filatov V. I., Tyshko O. Yu. (2018) Co-Combustion of Biomass and Anthracite in a Steam Boiler of 300 MW. *Energetika: Ekonomika, Tekhnologii, Ekologiya* [Power Engineering: Economics, Technology, Ecology], (2), 38–42 (in Ukrainian).
33. Khroustalev B. M., Pekhota A. N. (2016) Technology for Efficient Usage of Hydrocarbon-Containing Waste in Production of Multi-Component Solid Fuel. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of the CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 59 (2), 122–140. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2016-59-2-122-140> (in Russian).