

Торайғыров университетінің хабаршысы
ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайғыров университета

Торайғыров университетінің ХАБАРШЫСЫ

Энергетикалық сериясы
1997 жылдан бастап шығады



ВЕСТНИК Торайғыров университета

Энергетическая серия
Издается с 1997 года

ISSN 2710-3420

№2 (2026)

ПАВЛОДАР

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайгыров университета

Энергетическая серия
выходит 4 раза в год

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о постановке на переучет периодического печатного издания,
информационного агентства и сетевого издания

№ 14310-Ж

выдано

Министерство информации и общественного развития
Республики Казахстан

Тематическая направленность

публикация материалов в области электроэнергетики,
электротехнологии, автоматизации, автоматизированных и
информационных систем, электромеханики и теплоэнергетики

Подписной индекс – 76136

<https://doi.org/10.48081/BGQF2124>

Бас редакторы – главный редактор

Талипов О. М.

доктор PhD, ассоц. профессор (доцент)

Заместитель главного редактора

Калтаев А.Г., *доктор PhD*

Ответственный секретарь

Сағындық Ә.Б., *доктор PhD*

Редакция алқасы – Редакционная коллегия

Клецель М. Я.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Никифоров А. С.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Новожилов А. Н.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Алиферов А. И.,	<i>д.т.н., профессор (Российская Федерация)</i>
Кошеков К. Т.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Приходько Е. В.,	<i>к.т.н., профессор</i>
Кислов А. П.,	<i>к.т.н., доцент</i>
Нефтисов А. В.,	<i>доктор PhD</i>
Шеръязов С. К.	<i>т.ғ.д., профессор (Российская Федерация)</i>
Искакова З. С.	<i>технический редактор</i>

За достоверность материалов и рекламы ответственность несут авторы и рекламодатели

Редакция оставляет за собой право на отклонение материалов

При использовании материалов журнала ссылка на «Вестник Торайгыров университета» обязательна

© Торайгыров университет

<https://doi.org/10.48081/BGQF2154>

***Ж. А. Тулебаева¹, А. Е. Карманов², Е. Б. Жуков³,
А. В. Капишников⁴, А. С. Расмухаметова⁵**

^{1,2}Торайғыров университет, Республика Казахстан, г. Павлодар;

^{3,4}Алтайский государственный технический университет
имени И. И. Ползунова, Российская Федерация, г. Барнаул;

⁵Алматинский университет энергетики и связи
имени Гумарбека Даукеева, Республика Казахстан, г. Алматы.

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4289-9777>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7512-0275>

³ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-6016-4301>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-8763-7497>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1376-6112>

*e-mail: tulebaeva.zhanar@mail.ru

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ БИОМАССЫ И ЕГО РЕАЛИЗАЦИЯ ПРИ СОВМЕСТНОМ СЖИГАНИИ С УГЛЕМ

Биомасса как возобновляемый энергетический ресурс рассматривается в современных исследованиях в качестве эффективной альтернативы ископаемым видам топлива. В статье приведены результаты комплексного лабораторного анализа теплотехнических характеристик биомассы растительного происхождения (сухие листья, зелёные листья, ветки, шишки), а также смеси каменного угля и сухих листьев в массовом соотношении 70:30. Определены показатели аналитической и рабочей влажности, зольности, содержания горючих веществ, выхода летучих веществ, высшей и низшей теплот сгорания всех рассматриваемых альтернативных видов топлива. Проведено сопоставление полученных значений с характеристиками каменного угля и дана оценка перспектив использования исследуемых альтернативных видов топлива (биомассы растительного происхождения) в качестве энергетического топлива, а также смешанного топлива в комбинации с углем. В ходе проведенного комплексного лабораторного анализа установлено, что биомасса растительного происхождения обладает

более низкой зольностью и более высокой реакционной способностью по сравнению с углём, что обеспечивает более экологичное и интенсивное сжигание. Показано, что применение смеси уголь-биомасса 70:30 позволяет улучшить теплотехнические и экологические показатели по сравнению с использованием одного угля.

Ключевые слова: биомасса, каменный уголь, теплотехнические характеристики, зольность, летучие вещества, теплота сгорания, совместное сжигание.

Введение

Современное развитие энергетики характеризуется одновременным ростом потребности в топливе и ужесточением экологических требований. Это стимулирует поиск и внедрение возобновляемых энергоресурсов, среди которых особое место занимает биомасса. В отличие от ископаемых видов топлива, биомасса формируется в относительно короткие сроки в результате жизнедеятельности растений, а при её сжигании высвобождается углекислый газ, ранее поглощённый в процессе фотосинтеза. Таким образом, при рациональном использовании биомасса может рассматриваться как компонент замкнутого углеродного цикла [1].

В условиях городов и населённых пунктов значительные объёмы биомассы образуются в виде опавших листьев, веточного мусора, шишек и других отходов зелёного хозяйства. Как правило, такие отходы либо вывозятся на полигоны, либо подвергаются неконтролируемому сжиганию, что сопровождается потерей потенциальной энергии и локальным загрязнением атмосферы. Перевод этих потоков отходов в категорию энергетических ресурсов позволяет одновременно решать задачи ресурсосбережения и уменьшения нагрузки на окружающую среду [2].

Наряду с этим во многих регионах остаётся актуальным использование каменного угля, обладающего высокой теплотой сгорания, но сопровождающегося значительными выбросами золы и продуктов неполного сгорания. В этой связи перспективным направлением является совместное сжигание угля и биомассы, позволяющее снижать долю твёрдых минеральных остатков и улучшать экологические показатели работы топок и котельных установок [3].

Для обоснования таких решений необходима количественная оценка энергетического потенциала биомассы и его реализации при совместном сжигании с углём. Важнейшими показателями являются влажность, зольность, содержание горючих веществ, выход летучих компонентов и теплота сгорания [4].

Цель работы – исследование теплотехнических характеристик различных видов растительной биомассы (листьев зеленых и сухих опавших,

веток, хвои, шишек), сравнение их с характеристиками каменного угля и оценка эффективности совместного сжигания в составе смеси уголь-листья.

Материалы и методы

Объекты исследования

В качестве объектов исследования использовались следующие виды твёрдого топлива:

Образец № 1 – сухие листья (масса партии 3,9 кг);

Образец № 2 – зелёные листья (0,955 кг);

Образец № 3 – ветки (1,0 кг);

Образец № 4 – шишки (2,9 кг);

Образец № 5 – каменный уголь (5,1 кг);

Образец № 6 – смесь «уголь-листья» в массовой пропорции 70:30 (0,1 кг).

Таким образом, анализ охватывает как чистые образцы биомассы, так и ископаемое топливо, а также их топливную смесь, что позволяет выполнить корректное сравнение и оценить эффект от ко-сжигания.

Подготовка проб

Перед проведением испытаний все образцы были подвергнуты стандартной подготовке:

- удаление посторонних включений (камни, земля, металлические частицы);
- предварительная сушка при температуре порядка 105 °С до постоянной массы для получения аналитической пробы;
- измельчение до фракции 1-3 мм для обеспечения однородности и воспроизводимости результатов;
- тщательное перемешивание подготовленных проб.

Для смеси уголь-биомасса массовое соотношение компонентов 70:30 выдерживалось по навескам в рабочем состоянии, с последующим перемешиванием до получения визуально однородной массы.



Рисунок 1 – Аналитическая проба смеси уголь-листья
в соотношении 70:30

Определяемые характеристики

Для каждого образца определялись следующие показатели:

- **аналитическая влажность** W^a , % – содержание влаги в аналитической пробе;
- **рабочая (общая) влажность** W^p , % – суммарная влага в рабочем топливе;
- **зольность сухой массы** A^c , % – массовая доля минеральных веществ после полного сжигания без учёта влаги;
- **зольность рабочей массы** A^p , % – зольность исходного топлива;
- **содержание горючих веществ** G , % – доля органической части топлива в сухом состоянии;
- **выход летучих веществ** V_r , % – массовая доля летучих компонентов, выделяющихся при нагреве топлива без доступа воздуха;
- **высшая теплота сгорания** $Q_{\text{в}}$, кДж/кг – количество теплоты при полном сгорании с конденсацией паров воды;
- **низшая теплота сгорания** $Q_{\text{н}}$, кДж/кг – теплота сгорания без учёта скрытой теплоты парообразования воды [5].

Определение показателей выполнялось с использованием стандартных методик (калориметрическое определение теплоты сгорания, гравиметрическое определение влажности, прокаливание в муфельной печи для установления зольности). Для каждого параметра проводилось не менее трёх параллельных измерений, рассчитывались средние значения и оценивалась сходимость [6].

Результаты и обсуждение

1. Влажность

Результаты определения аналитической и рабочей влажности показали, что:

- для сухих и зелёных листьев аналитическая влажность W^a составляет около 7,1 %;
- для веток – 6,0 %;
- для шишек – 6,5 %;
- для угля – 6,3 %;
- для смеси уголь-листья – 9,1 %.

При этом **рабочая влага** зелёных листьев достигает 64,8 %, а угля – 19,5 %. Высокая рабочая влажность приводит к дополнительным затратам теплоты на прогрев и испарение воды, что снижает эффективную полезную теплоту сгорания топлива.

Для биомассы такой уровень влажности характерен для свежесобранных зелёных отходов; при хранении и дополнительной сушке влажность может

быть существенно снижена. В случае угля часть влаги является связанной и труднее удаляется, что учитывается в тепловых расчётах топок [7].

2. Зольность

Зольность сухой массы A^c является ключевым показателем, определяющим объём твёрдых отходов и склонность к образованию золошлаковых отложений:

- сухие листья – 10,5 %;
- зелёные листья – 5,9 %;
- ветки – 3,4 %;
- шишки – 2,0 %;
- уголь – 41,5 %;
- смесь уголь-листья – 27,4 %.



Рисунок 2 – Зола сухих листьев и смеси уголь-листья
в соотношении 70:30

Таким образом, биомасса имеет зольность в 5–20 раз ниже, чем каменный уголь. Минимальные значения характерны для древесной биомассы (шишки, ветки), максимальные – для листовой массы. При добавлении 30 % листьев к углю зольность смеси снижается по сравнению с чистым углём, что потенциально уменьшает нагрузку на золоулавливающие устройства и объём золошлаковых отходов [8; 9].

3. Содержание горючих веществ

Содержание горючих веществ G для исследованных образцов составляет:

- сухие листья – 89,5 %;
- зелёные листья – 94,1 %;
- ветки – 96,6 %;
- шишки – 98,0 %;
- уголь – 58,5 %;
- смесь – 72,6 %.

Биомасса характеризуется очень высокой долей горючих веществ (более 90 %), что свидетельствует о низком содержании минеральной части и высокой плотности химически связанной энергии в органической части. Для каменного угля значительная доля минеральных примесей снижает величину G , что напрямую отражается на зольности и эффективности сжигания.

4. Выход летучих веществ

Выход летучих веществ V_r для биомассы находится в диапазоне 78–83 %, тогда как для каменного угля составляет около 49,5 %. Высокий выход летучих веществ:

- облегчает воспламенение;
- способствует формированию протяжённого факела;
- увеличивает долю теплопередачи излучением.

Смесь уголь-листья имеет промежуточное значение выхода летучих (57,6 %), объединяя преимущества быстрого зажигания биомассы и высокой теплотворной способности угля.

5. Теплота сгорания

Для высшей теплоты сгорания Q^* :

- сухие листья – 19237 кДж/кг;
- зелёные листья – 23056 кДж/кг;
- ветки – 20856 кДж/кг;
- шишки – 21051 кДж/кг;
- уголь – 28622 кДж/кг;
- смесь – 24940 кДж/кг.

Низшая теплота сгорания Q^r :

- сухие листья – 15689 кДж/кг;
- зелёные листья – 4521 кДж/кг;
- ветки – 18619 кДж/кг;
- шишки – 19102 кДж/кг;
- уголь – 11913 кДж/кг;
- смесь – 17014 кДж/кг.

Каменный уголь, ожидаемо, имеет наибольшую высшую теплоту сгорания. Однако биомасса, особенно шишки и зелёные листья, демонстрирует достаточно высокие значения, позволяющие использовать её в энергетических целях [9].

Низшая теплота сгорания Q_p с учётом влажности снижается, причём особенно заметно это для зелёных листьев, где высокая рабочая влажность приводит к значительной доле тепла, расходуемого на испарение.

Сравнительная диаграмма по результатам исследования низшей теплоты сгорания рассматриваемых топлив представлена на рисунке 3.

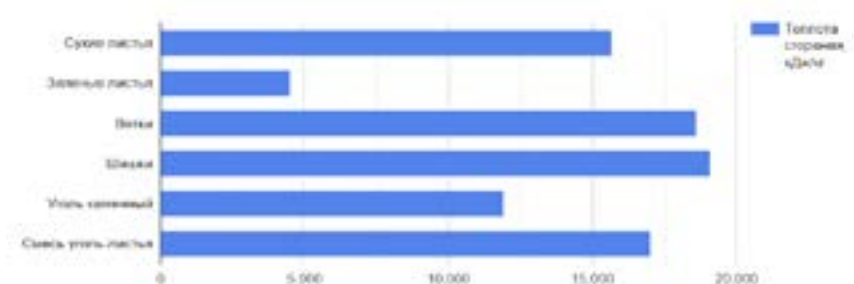


Рисунок 3 – Низшая теплота сгорания топлив

При этом для смеси уголь-листья низшая теплота сгорания (17014 кДж/кг) оказывается выше, чем у чистого угля (11913 кДж/кг), что указывает на выигрыш за счёт изменения баланса влаги и горючих компонентов [9].

Сравнительный анализ и перспективы совместного сжигания

По сравнению с каменным углём биомасса характеризуется:

- низкой зольностью (2–10 % против 41,5 %);
- высоким выходом летучих веществ (78–83 % против 49,5 %);
- высоким содержанием горючих веществ (90–98 % против 58,5 %);
- более низкой, но достаточной для практического использования теплотой сгорания.

Смесь уголь-листья 70:30:

- уменьшает зольность рабочей массы;
- повышает выход летучих веществ;
- улучшает низшую теплоту сгорания по сравнению с чистым углём;
- способствует более полному сгоранию топлива и снижению выбросов твёрдых частиц.

На основании проведённого анализа можно сделать вывод, что частичная замена угля биомассой в топливных смесях является перспективным подходом для энергетических установок малой и средней мощности [10; 11].

Элементы математической модели и CFD-подход (для дальнейших работ)

Для количественного описания процессов горения и теплообмена в топке котла при совместном сжигании угля и биомассы может быть использована математическая модель, включающая:

уравнение неразрывности:

$$\frac{d\rho}{dt} + \nabla(\rho u) = 0, \quad (1)$$

уравнения движения (Навье–Стокса) в осреднённой форме:

$$\rho(u \cdot \nabla)u = -\nabla p + \nabla(\mu \nabla u) + \rho g + S_u, \quad (2)$$

уравнение энергии:

$$\rho c_p(u \cdot \nabla T) = \nabla(\lambda \nabla T) + S_T, \quad (3)$$

уравнения переноса массовых долей компонентов:

$$\rho(u \cdot \nabla Y_i) = \nabla(\Gamma_i \nabla Y_i) + S_i, \quad (4)$$

модель турбулентности (например, $k-\varepsilon$) для учёта влияния турбулентного перемешивания на процессы тепло- и массообмена [12; 13; 14].

Такая постановка задачи позволяет в дальнейшем выполнять CFD-расчёты полей температуры, скорости, турбулентной кинетической энергии и концентраций компонентов при различных долях биомассы в смеси с углём. Это, в свою очередь, даёт возможность оптимизировать режимы сжигания и конфигурацию топочного пространства [15].

Выводы

Проведён комплексный анализ теплотехнических характеристик биомассы (листья, ветки, шишки), каменного угля и смеси уголь-листья в пропорции 70:30. Показано, что биомасса обладает низкой зольностью, высоким содержанием горючих веществ и значительным выходом летучих компонентов.

Несмотря на меньшую по сравнению с углём высшую теплоту сгорания, биомасса обеспечивает более экологичное сжигание, снижая объём минеральных отходов и повышая полноту сгорания за счёт высокой реакционной способности.

Смесь уголь-биомасса 70:30 демонстрирует улучшенные теплотехнические характеристики по сравнению с чистым углём: снижается зольность, возрастает выход летучих веществ, улучшатся низшая теплота сгорания и, как следствие, энергетическая эффективность.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке топливных смесей, оптимизации тепловых режимов работы топок и котельных агрегатов, а также при построении математических и CFD-моделей процессов совместного сжигания биомассы и угля [16; 17].

Исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № АР 26196911 по проекту «Исследование процессов утилизации органических отходов с низким содержанием горючих веществ и разработка устройства для генерации теплоты за счет их сжигания»).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Выбросы диоксида углерода в Казахстане по видам топлива [Электронный ресурс]. – <https://ourworldindata.org>.

2 Лиштван, И. И., Дударчик, В. М., Крайко, В. М., Ануфриева, Е. В., Смолячкова, Е. А. Энерготехнологическое использование биомассы // Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия химических наук. – 2017. – № 4. – С. 91–101.

3 Грачев, В. А., Плямина, О. В. Экологические характеристики разных способов производства электроэнергии // Атомная энергия. – 2017. – Т. 123. – № 3. – С. 160–64.

4 Назаренко, М. Ю., Кондрашева, Н. К., Салтыкова, С. Н., Бажин, В. Ю. Физические характеристики брикетов, полученных из сланцевой мелочи и древесных опилок [Текст] // Известия ТПУ. – 2016. – № 3. – С. 67–74.

5 Характеристики биомассы [Электронный ресурс]. – <http://www.gigavat.com>.

6 Vassilev, S. V., Baxter, D., Andersen, L. K., Vassileva, C. G. An overview of the chemical composition of biomass // Fuel. – 2010. – Vol. 89. – P. 913–933. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.10.022>.

7 Nurhilal, O., Yuliah, Y., Mulyana, C. Combustion quality analysis of briquettes from variety of agricultural waste as source of alternative fuels // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 2017. – № 65. – P. 6.

8 Deepak, K. B., Manujesh, B. J., Vivek, S., Yashas, B. K. Biomass: Turning Agricultural Waste to Green Power // IOP Conference Series Materials Science and Engineering, 2018. – № 376. – P. 10.

9 **Pnakovic, L., Dzurenda, L.** Combustion Characteristics of Fallen Fall Leaves from Ornamental Trees in City and Forest Parks // *BioResources*, 2015. – № 10. – P. 5563–5572.

10 **Ikelle, I., Nworu, J., Sundaya Nworie, F., Sundayb, Jedidiah, J.** Thermal Analyses of Briquette Fuels Produced from Coal Dust and Groundnut Husk // *Acta Chemica Malaysia*, 2020. – № 1(4). – P. 27.

11 **Jarvan, M., Vettik, R., Tamm, K.** The importance and profitability of farmyard manure application to an organically managed crop rotation // *Zemdirbyste-Agriculture*. – 2017. – Vol. 104. – № 4. – P. 321–328. <https://doi.org/10.13080/z-a.2017.104.041>.

12 **Carvalho, L., Wopienka, E., Pointner, C., Lundgren, J., Verma, V. K., Haslinger, W., Schmidl, C.** Performance of a pellet boiler fired with agricultural fuels // *Applied energy*. – 2013. – Vol. 104. – P. 286–296. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.10.058>.

13 **Чернецкий, М. Ю., Дектерев, А. А., Бурдуков, А. П.** Расчетное исследование факельного горения мелкодисперсного лигноцеллюлозного сырья // *Журнал Сибирского федерального университета. Серия : Техника и технологии*. – 2013. – Т. 6. – № 6. – С. 625–636.

14 **Исламова, С. И.** Методы термической переработки и утилизации древесных отходов // *Труды Академэнерго*. – 2015. – № 2. – С. 88–97.

15 **Branca, C., Galgano, A., Di Blasi, C.** Multi-scale analysis of the exothermic behavior of agricultural biomass pyrolysis // *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. – 2023. – Vol. 173. – P. 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2023.106040>.

16 **Fahmy, T.Y., Fahmy, Y., Mobarak, F., El-Sakhawy, M., Abou-Zeid, R.E.** Biomass pyrolysis: past, present, and future // *Environment, Development and Sustainability*. – 2020. – Vol. 22. – P. 17–32. <https://doi.org/10.1007/s10668-018-0200-5>.

17 **Зайченко, В. М., Сычев, Г. А., Шевченко, А. Л.** Тепловые эффекты при торрефикации растительной биомассы. Эксперимент и математическое моделирование // *Теплоэнергетика*. – 2023. – № 5. – С. 31–39. <https://doi.org/10.56304/S0040363623050089>.

REFERENCES

1 **Vybrosy dioksida ughleroda v Kazakhstane po vidam topliva [CO₂ emissions in Kazakhstan by fuel type] [Electronic resource]**. – Available at: <https://ourworldindata.org>.

2 **Lishtvan, I. I., Dudarchik, V. M., Kraiko, V. M., Anufrieva, E. V., Smolyachkova, E. A.** *Energotekhnologicheskoe ispolzovanie biomassy [Energy-*

technological use of biomass] [Text] // In Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical Series. – 2017. – № 4. – P. 91–101.

3 **Grachev, V. A., Plyamina, O. V.** Ekologicheskie kharakteristiki raznykh sposobov proizvodstva elektroenergii [Environmental characteristics of different electricity generation methods] [Text] // In Atomic Energy. – 2017. – Vol. 123. – № 3. – P. 160–64.

4 **Nazarenko, M. Yu., Kondrasheva, N. K., Saltykova, S. N., Bazhin, V. Yu.** Fizicheskie kharakteristiki briketov, poluchennykh iz slantsevoi melochi i drevesnykh opilok [Physical characteristics of briquettes produced from shale fines and wood sawdust] [Text] // In Bulletin of Tomsk Polytechnic University. – 2016. – № 3. – P. 67–74.

5 Kharakteristiki biomassy [Biomass characteristics] [Electronic resource]. – Available at: <http://www.gigavat.com>.

6 **Vassilev, S. V., Baxter, D., Andersen, L. K., Vassileva, C. G.** An overview of the chemical composition of biomass [Text] // In Fuel. – 2010. – Vol. 89. – P. 913–933. – <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.10.022>.

7 **Nurhilal, O., Yuliah, Y., Mulyana, C.** Combustion quality analysis of briquettes from variety of agricultural waste as source of alternative fuels [Text] // In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2017. – № 65. – P. 1–6.

8 **Deepak, K. B., Manujesh, B. J., Vivek, S., Yashas, B. K.** Biomass: turning agricultural waste to green power [Text] // In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – № 376. – P. 1–10.

9 **Pnakovic, L., Dzurenda, L.** Combustion characteristics of fallen fall leaves from ornamental trees in city and forest parks [Text] // In BioResources. – 2015. – Vol. 10. – P. 5563–5572.

10 **Ikelle, I., Nworu, J., Nworie, F. S., Sunday, J.** Thermal analyses of briquette fuels produced from coal dust and groundnut husk [Text] // In Acta Chemica Malaysia. – 2020. – Vol. 4. – № 1. – P. 27–32.

11 **Jarvan, M., Vettik, R., Tamm, K.** The importance and profitability of farmyard manure application to an organically managed crop rotation [Text] // In Zemdirbyste–Agriculture. – 2017. – Vol. 104. – № 4. – P. 321–328. <https://doi.org/10.13080/z-a.2017.104.041>.

12 **Carvalho, L., Wopienka, E., Pointner, C., Lundgren, J., Verma, V. K., Haslinger, W., Schmidl, C.** Performance of a pellet boiler fired with agricultural fuels [Text] // In Applied Energy. – 2013. – Vol. 104. – P. 286–296. – <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.10.058>.

13 **Chernetskii, M. Yu., Dekterev, A. A., Burdukov, A. P.** Raschetnoe issledovanie fakelnogo goreniya melkodispersnogo lignotsellyuloznogo syrya [Numerical study of flame combustion of fine lignocellulosic fuel] [Text] // In

Journal of Siberian Federal University. Engineering and Technologies. – 2013. – Vol. 6. – № 6. – P. 625–636.

14 **Islamova, S. I.** Metody termicheskoi pererabotki i utilizatsii drevesnykh otkhodov [Methods of thermal processing and utilization of wood waste] [Text] // In Proceedings of Akademenergo. – 2015. – № 2. – P. 88–97.

15 **Branca, C., Galgano, A., Di Blasi, C.** Multi-scale analysis of the exothermic behavior of agricultural biomass pyrolysis [Text] // In Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. – 2023. – Vol. 173. – P. 1–11. – <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2023.106040>.

16 **Fahmy, T. Y., Fahmy, Y., Mobarak, F., El-Sakhawy, M., Abou-Zeid, R. E.** Biomass pyrolysis: past, present, and future [Text] // In Environment, Development and Sustainability. – 2020. – Vol. 22. – P. 17–32. – <https://doi.org/10.1007/s10668-018-0200-5>.

17 **Zaichenko, V. M., Sychev, G. A., Shevchenko, A. L.** Teplovye efekty pri torrefikatsii rastitelnoi biomassy. Eksperiment i matematicheskoe modelirovanie [Thermal effects during torrefaction of plant biomass: experiment and mathematical modeling] [Text] // In Thermal Engineering. – 2023. – № 5. – P. 31–39. – <https://doi.org/10.56304/S0040363623050089>.

Поступило в редакцию 29.04.26.

Поступило с исправлениями 18.05.26.

Принято в печать 08.06.26.

*Ж. А. Тулебаева¹, А. Е. Карманов², Е. Б. Жуков³,

А. В. Капишиников⁴, А. С. Расмухаметова⁵

^{1,2}Торайғыров университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.;

^{3,4}И. И. Ползунов атындағы Алтай мемлекеттік техникалық университеті, Ресей Федерациясы, Барнаул қ.;

⁵Ғұмарбек Дәукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

29.04.26 ж. баспаға түсті.

18.05.26 ж. түзетулерімен түсті.

08.06.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

БИОМАССАНЫҢ ЭНЕРГЕТИКАЛЫҚ ӘЛЕУЕТІ ЖӘНЕ ОНЫ КӨМІРМЕН БІРГЕ ЖАҒУ КЕЗІНДЕ ЖҮЗЕГЕ АСЫРУ

Биомасса жаңартылатын энергия ресурсы ретінде қазіргі зерттеулерде қазба отындарына тиімді балама ретінде қарастырылады. Мақалада өсімдік тектес биомассаның (құрғақ жапырақтар, жасыл жапырақтар, бұтақтар, қарағай бұршіктері) жылу сипаттамаларын, сондай-ақ көмір мен құрғақ жапырақтардың 70:30 массалық қатынасындағы қоспаларын кешенді зертханалық талдау нәтижелері келтірілген. Аналитикалық және жұмыс ылғалдылығының, күлдің, жанғыш заттардың құрамының, ұша заттардың шығымдылығының, қарастырылып отырған барлық баламалы отындардың жоғары және төмен жану жылуының көрсеткіштері анықталды. Алынған мәндерді тас көмірдің сипаттамаларымен салыстыру жүргізілді және зерттелетін баламалы отынды (өсімдік тектес биомасса) энергетикалық отын ретінде, сондай-ақ көмірмен үйлесімдегі аралас отынды пайдалану перспективаларына баға берілді. Кешенді зертханалық талдау барысында өсімдік тектес биомассаның көмірмен салыстырғанда күлділігі төмен және реактивтілігі жоғары екендігі анықталды, бұл экологиялық таза және қарқынды жануды қамтамасыз етеді. 70: 30 көмір-биомасса қоспасын қолдану бір көмірді қолданумен салыстырғанда жылу және экологиялық көрсеткіштерді жақсартуға мүмкіндік беретіні көрсетілген.

Кілтті сөздер: биомасса, көмір, жылу сипаттамалары, күл, ұша заттар, жану жылуы, бірге жану.

* Zh. A. Tulebayeva¹, A. Ye. Karmanov², E. B. Zhukov³,
A. V. Kapishnikov⁴, A. S. Rasmukhametova⁵

^{1,2} Toraiygyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar;

^{3,4} Altai State Technical University named after I. I. Polzunov,
Russian Federation, Barnaul;

⁵ Almaty University of Power Engineering and telecommunications
named after Gumarbek Daukeev, Republic of Kazakhstan, Almaty.

Received 29.04.26.

Received in revised form 18.05.26.

Accepted for publication 08.06.26.

THE ENERGY POTENTIAL OF BIOMASS AND ITS REALIZATION IN CO-COMBUSTION WITH COAL

Biomass as a renewable energy resource is considered in modern research as an effective alternative to fossil fuels. The article presents the results of a comprehensive laboratory analysis of the thermal characteristics of biomass of plant origin (dry leaves, green leaves, twigs, cones), as well as a mixture of coal and dried leaves in a mass ratio of 70:30. The indicators of analytical and working humidity, ash content, content of combustible substances, yield of volatile substances, higher and lower heat of combustion of all alternative fuels under consideration are determined. The obtained values are compared with the characteristics of coal and the prospects for using the studied alternative fuels (biomass of plant origin) as an energy fuel, as well as mixed fuels in combination with coal, are assessed. In the course of a comprehensive laboratory analysis, it was found that biomass of plant origin has a lower ash content and a higher reactivity compared to coal, which ensures more environmentally friendly and intensive combustion. It is shown that the use of a 70:30 coal-biomass mixture makes it possible to improve thermal and environmental performance compared with the use of coal alone.

Keywords: biomass, coal, thermal engineering characteristics, ash content, volatile substances, heat of combustion, co-combustion.

Теруге 09.06.2026 ж. жіберілді. Басуға 30.06.2026 ж. қол қойылды.

Электронды баспа

5,86 Mb RAM

Шартты баспа табағы 34,4. Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.

Компьютерде беттеген: А. Б. Шукитова

Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Тапсырыс № 4557

Сдано в набор 09.06.2026 г. Подписано в печать 30.06.2026 г.

Электронное издание

5,86 Mb RAM

Усл. печ. л. 34,4. Тираж 300 экз. Цена договорная.

Компьютерная верстка: А. Б. Шукитова

Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Заказ № 4557

«Toraighyrov University» баспасынан басылып шығарылған

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

«Toraighyrov University» баспасы

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

67-36-69

E-mail: kereku@tou.edu.kz

www.vestnik-energy.tou.edu.kz