УДК 620.92

Роман Александрович Анненков
ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет имени М.И. Платова», аспирант кафедры тепловых электрических станций и теплотехники, Россия, Новочеркасск, e-mail: annenkov-1999-161@mail.ru

Роман Владимирович Безуглов
ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет имени М.И. Платова», кандидат технических наук, доцент кафедры тепловых электрических станций и теплотехники, Россия, Новочеркасск, e-mail: bezuglov@npi-tu.ru

Владимир Борисович Ильин
ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет имени М.И. Платова», старший научный сотрудник НИИ «Нанотехнологии и новые материалы», Россия, Новочеркасск, e-mail: ilyin07@gmail.com

Данила Алексеевич Пономарев
ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет имени М.И. Платова», студент, лаборант НИИ «Нанотехнологии и новые материалы», Россия, Новочеркасск, e-mail: danila_ponomarev1@mail.ru

Денис Алексеевич Пономарев
ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет имени М.И. Платова», студент, лаборант НИИ «Нанотехнологии и новые материалы», Россия, Новочеркасск, e-mail: denis.ponomarev.04@list.ru

Сравнение воздушной газификации твердых органических отходов и пеллет с добавлением низкосортного угля[1]

Авторское резюме

Состояние вопроса. Рост объемов органических и древесных отходов требует эффективных методов их переработки с получением вторичных энергетических ресурсов. Термическая газификация биомассы и комбинированных топлив с использованием воздуха как окислителя является перспективным подходом, позволяющим получать генераторный газ для производства тепла, электричества и химической продукции. Однако увеличение доли азота снижает теплоту сгорания газа, что делает актуальным использование комбинированных пеллет с добавлением угля для повышения энергетической эффективности и стабильности процесса. Цель исследования – изучение процессов газификации пеллет из биомассы с добавлением низкосортного угля, определение влияния коэффициента избытка воздуха на состав и теплоту сгорания генераторного газа, а также оценка эффективности комбинированных пеллет для получения вторичных энергетических ресурсов.
Материалы и методы. В качестве материала для исследования использована смесь шрота подсолнечника и отходов тары деревянной с добавлением угля Донецкого АШ. Формование пеллет выполнено на механическом таблеточном прессе при давлении 5–8 т, диаметре пеллет 25 мм и длине пеллет 15–30 мм. Газификация пеллет проведена на экспериментальной установке с подачей воздуха при коэффициентах избытка α = 0,2–0,4. Состав газов определен с использованием газового хроматографа.
Результаты. Проведен эксперимент по термической переработке пеллет из твердых органических сельскохозяйственных отходов в газификаторе обращенного типа. На основе проведенного эксперимента выполнена оценка влияния добавления угля в твердых органических сельскохозяйственных отходах. Получен генераторный газ теплотой сгорания, приемлемой для сжигания в энергетических котлах. Установлено, что увеличение подачи воздуха повышает выход газообразных продуктов за счет глубокой окислительной переработки сырья, при α = 0,2 преобладают горючие компоненты (CO, H_2, CH_4), а при α = 0,4 увеличивается доля инертных газов и снижается теплота сгорания. Оптимальный диапазон α = 0,2–0,3 обеспечивает максимальный выход горючего генераторного газа при контролируемом окислении.
Выводы. Газификация пеллет из биомассы с добавлением угля позволяет эффективно получать генераторный газ с высокой теплотой сгорания, превышающей показатели при газификации чистой биомассы, что делает предложенную технологию перспективной для переработки органических отходов и производства вторичных энергетических ресурсов.

Ключевые слова: воздушная газификация, пеллеты, генераторный газ, твердые органические отходы, вторичные энергетические ресурсы

[1] Работа выполнена в рамках стратегического проекта «Разработка технологий малотоннажной химической продукции и материалов для энергетики» Программы развития ЮРГПУ (НПИ) при реализации программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030».
The study is carried out within the framework of the strategic project “Development of Technologies for Small-Scale Chemical Products and Materials for the Energy Sector” under the Development Program of Platov South Russian State Polytechnic University, as part of the “Priority-2030” Strategic Academic Leadership Program.

© Анненков Р.А., Безуглов Р.В., Ильин В.Б., Пономарев Д.А., Пономарев Д.А., 2026
Вестник ИГЭУ, 2026, вып. 5, с. 31–35.

Roman Aleksandrovich Annenkov
Platov South Russian State Polytechnic University, Post graduate Student of Thermal Power Plants and Thermal Engineering Department, Russia, Novocherkassk, e-mail: annenkov-1999-161@mail.ru

Roman Vladimirovich Bezuglov
Platov South Russian State Polytechnic University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Thermal Power Plants and Thermal Engineering Department, Russian, Novocherkassk, e-mail: bezuglov@npi-tu.ru

Vladimir Borisovich Ilyin
Platov South Russian State Polytechnic University, Senior Researcher of the Research Institute “Nanotechnology and New Materials”, Russia, Novocherkassk, e-mail: ilyin07@gmail.com

Danila Alekseevich Ponomarev
Platov South Russian State Polytechnic University, Student, Laboratory Assistant of the Research Institute “Nanotechnology and New Materials”, Russia, Novocherkassk, e-mail: danila_ponomarev1@mail.ru

Denis Alekseevich Ponomarev
Platov South Russian State Polytechnic University, Student, Laboratory Assistant of the Research Institute “Nanotechnology and New Materials”, Russia, Novocherkassk, e-mail: denis.ponomarev.04@list.ru

Comparison of air gasification of solid organic waste and pellets with the addition of low-grade coal

Abstract

Background. The growing volume of organic and wood waste requires effective processing methods to recover secondary energy resources. Thermal gasification of biomass and combined fuels using air as an oxidant is a promising approach to generate gas for heat, electricity, and chemical production. However, an increase in nitrogen content reduces its calorific value, making it important to use combined pellets with added coal to enhance energy efficiency and process stability. The purpose of this study is to investigate the gasification processes of biomass pellets blended with low-grade coal, to determine the effect of the air excess ratio on the composition and calorific value of the generator gas, and to evaluate the efficiency of combined pellets to recover secondary energy resources.
Materials and methods. A mixture of sunflower meal and wooden packaging waste with the addition of Donetsk ASh-grade coal has been used as the research material. The pellets have been formed using a mechanical pellet press at a pressure of 5–8 tons, a diameter of pellet is 25 mm, and a length of pellet is 15–30 mm. Pellet gasification has been carried out on an experimental installation with air supply at excess factors α = 0,2–0,4. The composition of gases has been determined by gas chromatograph.
Results. An experiment has been conducted on the thermal processing of pellets from solid organic agricultural waste in a reverse-flow gasifier. Based on the results of the experiment, the effect of adding coal to the solid organic agricultural waste has been assessed. The resulting generator gas with a calorific value suitable for combustion in power boilers has been obtained. It has been found that increasing the air supply enhances the yield of gaseous products due to the deep oxidative processing of raw materials. At α = 0,2 combustible components (CO, H_2, CH_4) predominate, while at α = 0,4, the proportion of inert gases increases and the heat of combustion decreases. The optimal range of α = 0,2–0,3 ensures maximum yield of combustible generator gas during controlled oxidation.
Conclusions. Biomass pellet gasification with coal addition enables the efficient production of generator gas with a high calorific value that is twice as high as that of pure biomass, making it a promising technology for the processing of organic waste and the production of secondary energy resources.

Key words: air gasification, pellets, generator gas, solid organic waste, secondary energy resources

DOI: 10.17588/2072-2672.2026.5.031-035

Введение. Рост объемов твердых органических отходов, включая сельскохозяйственные и древесные, требует внедрения технологий их эффективной переработки с получением вторичных энергетических ресурсов [1, 2]. Одним из перспективных методов является термохимическая газификация, которая позволяет преобразовать биомассу и уголь в генераторный газ, пригодный для производства тепловой и электрической энергии, а также химической продукции.

Использование воздуха в качестве окислителя делает процесс более экономичным и технологически доступным для промышленных установок. Однако увеличение доли азота в газовой смеси снижает теплоту сгорания генераторного газа. Для повышения энергетической эффективности предлагается использование комбинированных пеллет, где биомасса (шрот подсолнечника и древесные отходы) смешивается с углем (уголь Донецкого АШ).

Газификация твердых топлив. Основы газификации твердых топлив изложены в [3], где рассматриваются механизмы термохимических реакций, энергетический баланс, влияние состава топлива на выход синтез-газа и отмечается, что применение воздуха как окислителя ограничивает максимальную температуру реакционной зоны из-за присутствия азота, что снижает долю CO и H_2 в газе.

Газификация биомассы и комбинированных топлив. Зарубежные исследования [4, 5] показывают, что предварительная механическая обработка биомассы – пеллетирование – стабилизирует процесс газификации в воздушной среде. Добавление углеродистых компонентов, таких как уголь, позволяет повысить теплоту сгорания генераторного газа и уменьшить влияние низкотемпературного горения.

Газификация в воздушной среде. Использование воздуха как окислителя обеспечивает технологическое удобство и низкую стоимость самого процесса газификации (нет необходимости подключения линии кислорода либо сооружения на объекте установки разделения воздуха). Однако использование воздуха приводит к разбавлению генераторного газа азотом, что снижает его теплоту сгорания [6, 7]. Комбинированное топливо, содержащее уголь, позволяет компенсировать эти недостатки, увеличивая долю CO и H_2 в газе и стабилизируя тепловой режим.

Совместная газификация биомассы и угля. Современные исследования [8] показывают, что совместная газификация биомассы и угля повышает энергетическую эффективность и стабильность процесса газификации. Донецкий уголь марки АШ отличается высокой долей углерода и низкой влажностью, что улучшает теплотворные характеристики комбинированных пеллет [9, 10]. Тем не менее Донецкий АШ является низкосортным топливом и требует постоянной подсветки газом[2]. Таким подсветочным газом может стать генераторный газ, получаемый от двух предлагаемых составов.

Материалы и методы исследования. *Исходное сырье*. Для изготовления пеллет использовались следующие смеси:

1) отходы тары деревянной + уголь Донецкий АШ (состав 1);

2) шрот подсолнечника + уголь Донецкий АШ (состав 2).

Все компоненты предварительно были высушены до влажности 6,2–6,4 % и измельчены до фракции 1–2 мм.

Смесь компонентов готовилась в пропорции 72 % биомассы, 25 % угля (по массе) и в качестве связующего компонента добавлялось 3 % картофельного крахмала. Доли каждого компонента обоих составов пеллет выбраны исходя из имеющегося мирового опыта и количества биомассы определенного вида, встречающейся на полигонах регионов России.

Формирование пеллет проводилось на механическом прессе таблеточного типа. Основные параметры процесса следующие:

- масса загрузки в форму для пресса – от 10 до 20 грамм;
- давление прессования – от 5 до 8 тонн;
- температура прессования – температура окружающей среды;
- диаметр пеллет – 25 мм;
- длина – 15–30 мм.

При вышеуказанных параметрах обеспечивается оптимальное спекание лигнина, выступающего в роли природного связующего, что исключает необходимость использования добавления воды.

На рис. 1 представлено фото пеллет двух видов, полученных методом прессования.



Рис. 1. Композитные пеллеты для газификации, полученные методом прессования (вверху – состав 1, внизу – состав 2)

Описание экспериментальной установки. Эксперимент проводился в лаборатории НИИ «Нанотехнологии и новые материалы» ЮРГПУ (НПИ) на экспериментальной установке газификации твердых отходов, состоящей из реактора, системы подачи воздуха и системы сбора синтетического газа. Реактор был оснащен температурными датчиками и манометром для контроля условий процесса. Состав газа определялся при помощи газового хроматографа «Кристаллюкс-4000М». На рис. 2 представлено фото экспериментальной установки для газификации твердых органических отходов.



Рис. 2. Лабораторная установка для газификации твердых отходов

[2] РД 34.10.501-90. Нормы расхода газомазутного топлива при сжигании каменных углей с выходом летучих веществ менее 20 % на тепловых электростанциях Минэнерго СССР. – М., 1991.

Режим термической газификации. Пеллеты загружались в реактор, который впоследствии герметизировался. Для обеспечения ограниченного окисления в реактор подавался расчетный объем воздуха, соответствующий коэффициентам избытка α = 0,2; 0,3; 0,4. Был взят именно такой диапазон α ввиду того, что при α = 0,1 не обеспечивается условий экзотермичности реакции – требуется подвод теплоты извне. При α = 0,5 наблюдается слишком высокая доля балластных негорючих газов (азота и двуокиси углерода), ввиду чего нецелесообразно проводить газификацию при значениях α, больших, чем α = 0,4 [11]. Объем воздуха для газификации топлива вычисляется по формуле

$$V_{\text{в}} = V_{\text{о}}^{\text{н}} \alpha,$$

где $V_{\text{о}}^{\text{н}}$ – теоретическое количество сухого воздуха, необходимое для полного сгорания топлива (при α = 1); α – коэффициент избытка воздуха.

Отбор и анализ продуктов. Генераторный газ из реактора выходит через выходной патрубок, далее проходит сепаратор, адсорбер и поступает на линию анализа газовым хроматографом «Кристаллюкс-4000М». При этом определяются концентрации CO, CO_2, H_2, N_2, CH_4.

Жидкая фракция (надсмольная вода) собиралась в приемной емкости для дальнейшего анализа смол, масел и воды (рис. 3).



Рис. 3. Приемная емкость для жидкой фракции

Твердый остаток извлекался после охлаждения реактора до 25 °C, взвешивался и визуально оценивался (рис. 4).



Рис. 4. Твердый коксовый остаток

Для обеспечения должной степени статистической обработки данных эксперименты проводились трижды для каждого типа пеллет и при разных коэффициентах избытка воздуха.

Результаты исследования влияния коэффициента избытка воздуха на выход продуктов газификации представлены в таблице.

Выход продуктов газификации

Сырье	α	Массовая доля компонента в газе, %					$Q_{\text{н}}$, МДж/м^3
		H_2	N_2	CO_2	CH_4	CO	
Пеллеты состав 1	0,2	16,10	48,90	13,26	6,71	15,03	6,04
	0,3	8,72	56,04	12,15	3,75	19,34	4,73
	0,4	9,42	47,86	13,16	4,81	24,74	4,18
Тара	0,3	7,75	65,13	5,84	5,45	15,84	4,78
Пеллеты состав 2	0,2	12,15	46,73	11,09	4,89	25,14	6,24
	0,3	14,72	52,95	12,22	7,14	12,97	5,78
	0,4	14,37	54,57	10,14	6,45	14,47	5,67
Шрот	0,3	9,81	53,46	11,08	4,19	21,46	5,27

Результаты. В ходе эксперимента четырех видов сырья установлено, что генераторный газ от чистой древесной биомассы (отходы тары деревянной) имеет большую теплоту сгорания, чем древесные пеллеты с добавлением 25 % угля (Донецкого АШ). Однако генераторный газ от чистой подсолнечной биомассы имеет меньшую теплоту сгорания, чем пеллеты подсолнечника с добавлением 25 % угля (Донецкого АШ). Данный факт обусловлен тем, что древесина имеет большую теплоту сгорания, чем шрот подсолнечный. Таким образом, в пеллетах состава 1 низкосортный уголь Донецкий АШ снижает теплоту сгорания генераторного газа при его газификации, а в пеллетах состава 2 – повышает.

Коэффициент избытка воздуха α оказывает определяющее влияние на направление протекающих процессов. Установлено, что при α = 0,2 процесс ближе к пиролизу, образуется газ с более высоким энергетическим потенциалом (повышенное содержание CO, H_2, CH_4).

При α = 0,4 процесс переходит в область глубокого окисления, что приводит к увеличению доли балластных компонентов (N_2, CO_2) и уменьшению теплоты сгорания газа.

Выход твердого остатка (золы вместе с несгоревшим углеродом) зависит от количества подаваемого воздуха и тепловых условий в реакторе. Полученные данные подтверждают, что оптимальным диапазоном для получения газообразного топлива является область коэффициента избытка воздуха α = 0,2–0,3. В этом диапазоне обеспечивается наилучшее сочетание выхода горючих компонентов (CO, H_2, CH_4) и допустимого уровня окисления.

При низком α процесс характеризуется повышенным выходом летучих веществ и горючих газов, при высоком α – усиливается образование CO_2 и N_2 и газ становится низкокалорийным. Таким образом, регулирование подачи воздуха является ключевым инструментом управления

кинетикой термического разложения и качеством получаемого газа.

Выводы. Газификация пеллет из шрота подсолнечника и древесных отходов с добавлением донецкого угля в воздушной среде является перспективной технологией получения генераторного газа.

Теплота сгорания генераторного газа комбинированного типа пеллет выше, чем чистой биомассы, в случае со шротом подсолнечным и ниже в случае древесной биомассы. Теплота сгорания пеллет с отходами древесной тары составляет 4,18–6,94 МДж/м^3, пеллет с отходами шрота подсолнечного – 5,67–6,24 МДж/м^3.

Технология подходит для переработки органических отходов с получением вторичных энергетических ресурсов – генераторного газа и впоследствии тепловой и электрической энергии. Кроме того, предлагаемая технология позволяет эффективно использовать низкосортное твердое топливо – Донецкий АШ.

Список литературы

1. **Боркова Е.А., Горельчаник П.И., Горельчаник Л.И.** Проблема утилизации отходов в системе устойчивого развития РФ // Экономические отношения. – 2019. – Т. 9, № 2. – С. 1167–1178.
2. **Васильева Е.А.** Технология обращения с твердыми коммунальными отходами. Ч. 2: учеб. пособие. – СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2021. – 80 с.
3. **Белов В.Г.** Газификация твердых топлив. – М.: Недра, 2019.
4. **Bridgwater A.V.** Biomass Gasification and Pyrolysis: Practical Design and Theory. – Elsevier, 2012.
5. **Basu P.** Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction. – Elsevier: Academic Press, 2023.
6. **Соловьев А.Н., Михайлов П.П.** Газификация отходов с применением воздуха // Химическая технология. – 2021. – № 4. – С. 45–53.
7. **Черняев Д.В.** Термодинамический анализ газификации биомассы в воздушной среде // Энергетика и экология. – 2022. – № 2. – С. 12–18.
8. **Zhou H., Wu S., Zhang Y.** Co-gasification of coal and biomass in air/steam atmospheres // Energy Conversion and Management. – 2020. – Vol. 223. – P. 113285.
9. **Миронов В.Г., Блинов С.Н.** Газификация биотопливных пеллет из сельскохозяйственных отходов // Вестник МЭИ. – 2020. – № 6. – С. 55–63.
10. **Каган Г.М.** (ред.). Тепловой расчет котлов (Нормативный метод). – 3-е изд., перераб. и доп. – СПб.: ВТИ, 1998. 260 с.
11. **Безуглов Р.В.** Установка газификации твердых отходов // Вестник ИГЭУ. – 2025. – Вып. 2. – С. 12–17.

References

1. Borkova, E.A., Gorel′chanik, P.I., Gorel′chanik, L.I. Problema utilizatsii otkhodov v sisteme ustoychivogo razvitiya RF [The problem of waste disposal in the system of sustainable development of the Russian Federation]. *Ekonomicheskie otnosheniya*, 2019, vol. 9, no. 2, pp. 1167–1178.
2. Vasil′eva, E.A. *Tekhnologiya obrashcheniya s tverdymi kommunal'nymi otkhodami. Ch. 2* [Technology of solid municipal waste management. Part 2]. Saint-Petersburg: VSHTE SPbGUPTD, 2021. 80 p.
3. Belov, V.G. *Gazifikatsiya tverdykh topliv* [Gasification of solid fuels]. Moscow: Nedra, 2019.
4. Bridgwater, A.V. Biomass Gasification and Pyrolysis: Practical Design and Theory. Elsevier, 2012.
5. Basu, P. Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction. Elsevier: Academic Press, 2023.
6. Solov′ev, A.N., Mikhaylov, P.P. Gazifikatsiya otkhodov s primeneniem vozdukha [Waste gasification using air]. *Khimicheskaya tekhnologiya*, 2021, no. 4, pp. 45–53.
7. Chernyaev, D.V. Termodinamicheskiy analiz gazifikatsii biomassy v vozdushnoy srede [Thermodynamic analysis of biomass gasification in air]. *Energetika i ekologiya*, 2022, no. 2, pp. 12–18.
8. Zhou, H., Wu, S., Zhang, Y. Co-gasification of coal and biomass in air/steam atmospheres. *Energy Conversion and Management*, 2020, vol. 223, p. 113285.
9. Mironov, V.G., Blinov, S.N. Gazifikatsiya biotoplivnykh pellet iz sel′skokhozyaystvennykh otkhodov [Gasification of Biofuel Pellets from Agricultural Waste]. *Vestnik MEI*, 2020, no. 6, pp. 55–63.
10. Kagan, G.M. (ed.). *Teplovoy raschet kotlov (Normativnyy metod)* [Thermal calculation of boilers (Normative method). Saint-Petersburg: VTI, 1998. 260 p.
11. Bezuglov, R.V. Ustanovka gazifikatsii tverdykh otkhodov [Installation of solid waste gasification]. *Vestnik IGEU*, 2025, issue 2, pp. 12–17.