ГОРЕНИЕ И ВЗРЫВ, 2026. Том 19. №2. С. 107–123

ПАРОУГЛЕКИСЛОТНАЯ ГАЗИФИКАЦИЯ ЛУЗГИ СЕМЯН ПОДСОЛНЕЧНИКА ПРОДУКТАМИ ГАЗОВОЙ ДЕТОНАЦИИ

С. М. Фролов[1], В. А. Сметанюк[2], И. А. Садыков[3], К. А. Авдеев[4], А. С. Силантьев[5], П. О. Виноградов[6], Я. С. Дудко[7], А. Б. Воробьёв[8], А. В. Иноземцев[9], Я. О. Иноземцев[9], Я. К. Хасяк[10], Ф. С. Фролов[11], А. В. Евланов[12], М. И. Молодид[13]

Аннотация: Лузга семян подсолнечника (ЛСП) — отход масложировой промышленности с суточным объемом накопления в Российской Федерации до тысячи тонн. Содержание C, O, H и N в сухой ЛСП: 50,28, 40,5, 6,31 и 0,74 %(масс.) соответственно; минеральные компоненты в ЛСП (зольность 2,17 %(масс.)) представлены в основном соединениями S, K, Ca, Mg, P, Cl и Si; высшая теплота сгорания ЛСП 19,2 МДж/кг. Цель работы — определить наилучшие условия аллотермической газификации ЛСП продуктами газовой детонации, играющими роль высокотемпературного пароуглекислотного газифицирующего агента (ГА), и доказать возможность «самозапитки» процесса газификации, т. е. использования получаемого генераторного газа для генерации ГА, используя термодинамические расчеты и лабораторный эксперимент. Под наилучшими условиями газификации ЛСП понимается отношение массовых расходов ЛСП/ГА, при котором достигается наибольший выход газа с наименьшим содержанием CO_2. Термодинамический расчет показал, что процесс газификации ЛСП продуктами детонации стехиометрической кислородной смеси стартового горючего (природного газа) и стехиометрической кислородной смеси генераторного газа следует проводить при давлении 0,1 МПа, температуре ГА не менее 1500 K и массовом отношении ЛСП/ГА = 2,2–1,8, причем получаемый сухой газ будет содержать до 53 %(об.) CO и 47 %(об.) H_2, обладать низшей теплотворной способностью не менее 15,5 МДж/кг и допускать самозапитку процесса газификации с коэффициентом самозапитки — отношением расхода газа на самозапитку к полному выходу газа — менее 19%. На лабораторной проточной установке проведены две серии экспериментов по газификации ЛСП со средним массовым отношением ЛСП/ГА ≈ 2. Для генерации ГА, в основном состоящего из H_2O и CO_2, в экспериментах использовалась импульсно-детонационная пушка (ИДП), работающая с частотой 1 Гц. В первой серии в качестве ГА использовались продукты газовой детонации стехиометрической кислородной смеси природного газа, расширенные до атмосферного давления. Задачи этой серии — получить и накопить достаточное количество сухого первичного генераторного газа с наименьшим содержанием CO_2. Первичный сухой газ, полученный в экспериментах этой серии, в среднем содержал 37,7 %(об.) CO, 25,3 %(об.) H_2, 7,4 %(об.) CH_4, 8,6 %(об.) C_xH_y и 21 %(об.) CO_2, причем самым тяжелым зарегистрированным углеводородом C_xH_y был пропан (менее 0,1 %(об.)), т. е. конденсируемые углеводороды (смолы) в получаемом газе отсутствовали. Во второй серии в качестве ГА использовались продукты газовой детонации стехиометрической кислородной смеси первичного генераторного газа, расширенные до атмосферного давления. Задачи этой серии — получить и накопить достаточное количество сухого вторичного газа с наименьшим содержанием CO_2 и проверить его детонационную способность в смеси с кислородом. Оказалось, что вторичный сухой газ, полученный в экспериментах этой серии, в среднем содержал 44,4 %(об.) CO, 18,5 %(об.) H_2, 5,0 %(об.) CH_4, 2,1 %(об.) C_xH_y и 30 %(об.) CO_2, а измеренная в ИДП средняя скорость детонации в стехиометрической кислородной смеси такого газа составила 1730 ± 50 м/с, т. е. возможность самозапитки ИДП получаемым газом

[1]Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, smfrol@chph.ras.ru
[2]Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, smetanuk@chph.ras.ru
[3]Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, ilsadykov@mail.ru
[4]Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, kaavdeev@mail.ru
[5]Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, silantevu@mail.ru
[6]Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, vinarbeit@yandex.ru
[7]Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, yasdudko@yandex.ru
[8]Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, ynm07@mail.ru
[9]Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, vectr1@yandex.ru
[10]Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, hasiak1996@gmail.com
[11]Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, f.frolov@chph.ru
[12]ООО «Бирюч», a.evlanov@tb-drone.ru
[13]ООО «Бирюч», molodid@efko.ru

доказана экспериментально. Экспериментальное значение коэффициента самозапитки оказалось приблизительно равным 60%. Различие в расчетных и измеренных составах получаемого газа и в значениях коэффициента самозапитки, по-видимому, связано с тепловыми потерями и нерасчетными условиями смешения реагентов в эксперименте.

Ключевые слова: лузга семян подсолнечника; аллотермическая газификация; водяной пар; диоксид углерода; генераторный газ; импульсно-детонационная пушка; самозапитка

DOI: 10.30826/CE26190209 **EDN:** BXAXOB

Литература

1. *Смычагин Е. О., Мустафаев С. К.* Анализ состава отходов очистки масличных семян и способов их утилизации и переработки // Научный журнал КубГАУ, 2016. №120(06). С. 651–663.
2. *Filho J. G., Egea M. B.* Sunflower seed byproduct and its fractions for food application: An attempt to improve the sustainability of the oil process // J. Food Sci., 2021. Vol. 86. P. 1497–1510.
3. Bioactive phytochemicals from vegetable oil and oilseed processing by-products / Eds. M. Fawzy, R. Hassanien. — Cham, Switzerland: Springer, 2023. 790 p.
4. *Basu P.* Biomass gasification and pyrolysis: Practical design and theory. — Burlington, MA, USA: Academic Press, 2010. 365 p.
5. *Turzynski T., Kluska J., Ochnio M., Kardaś D.* Comparative analysis of pelletized and unpelletized sunflower husks combustion process in a batch-type reactor // Materials, 2021. Vol. 14. P. 2484.
6. *Spiewak K., Soprych P., Czerski G.* Influence of pressure and sunflower husks ash as catalyst on tire-char steam gasification // Energy Reports, 2023. Vol. 9. P. 1–15.
7. *Mohan D., Pittman C., Jr.* Activated carbons and low cost adsorbents for remediation of tri- and hexavalent chromium from water // J. Hazard. Mater., 2006. Vol. 137. P. 762–811.
8. *Nunes A., Franca A., Oliveira L.* Activated carbons from waste biomass: An alternative use for biodiesel production solid residues // Bioresource Technol., 2009. Vol. 100. P. 1786–1792.
9. *Quaranta N., Unsen M., López H., Giansiracusa C., Roether J. A., Boccaccini A. R.* Ash from sunflower husk as raw material for ceramic products // Ceram. Int., 2011. Vol. 37. P. 377–385.
10. *Ooi T. C., Aries E., Ewan B. C. R., Thompson D., Anderson D. R., Fisher R., Fray T., Tognarelli D.* The study of sunflower seed husks as a fuel in the iron ore sintering process // Miner. Eng., 2008. Vol. 21. P. 167–177.
11. *Barczewski M., Sa łasińska K., Szulc J.* Application of sunflower husk, hazelnut shell and walnut shell as waste agricultural fillers for epoxy-based composites: A study into mechanical behavior related to structural and rheological properties // Polym. Test., 2019. Vol. 75. P. 1–11.
12. *Boukis N., Stoll I. K.* Gasification of biomass in supercritical water, challenges for the process design — lessons learned from the operation experience of the first dedicated pilot plant // Processes, 2021. Vol. 9. P. 455.
13. *DiCarlo A., Savuto E., Foscolo P. U., Papa A. A., Tacconi A., Del Zotto L., Aydin B., Bocci E.* Preliminary results of biomass gasification obtained at pilot scale with an innovative 100 kWth dual bubbling fluidized bed gasifier // Energies, 2022. Vol. 15. P. 4369.
14. *Roncancio R., Gore J. P.* CO_2 char gasification: A systematic review from 2014 to 2020 // Energ. Convers. Manage., 2021. Vol. 10. P. 100060.
15. *Frolov S. M.* Organic waste gasification: A selective review // Fuels, 2021. Vol. 2. P. 556–651.
16. *Фролов С. М.* Газификация органических отходов ультраперегретым водяным паром и диоксидом углерода // Горение и взрыв, 2021. Т. 14. № 3. С. 74–97. doi: 10.30826/CE21140308.
17. *Фролов С. М., Сметанюк В. А., Авдеев К. А., Набатников С. А.* Способ получения сильно перегретого пара и устройство детонационного парогенератора (варианты). Патент РФ № 2686138 от 24.04.2019. Приоритет от 26.02.2018.
18. *Фролов С. М., Сметанюк В. А., Набатников С. А.* Способ газификации угля в сильно перегретом водяном паре и устройство для его осуществления. Патент Российской Федерации на изобретение № 2683751 от 01.04.2019. Приоритет от 24.05.2018.
19. *Фролов С. М., Набатников С. А., Диесперов К. В., Ачильдиев Е. Р.* Способ обеззараживания летучей золы, образующейся при сжигании отходов, и устройство для его осуществления. Патент РФ № 2739241 от 22.12.2020. Приоритет от 11.06.2020.
20. *Frolov S. M., Smetanyuk V. A., Sadykov I. A., Silantiev A. S., Shamshin I. O., Aksenov V. S., Avdeev K. A., Frolov F. S.* Natural gas conversion and liquid/solid organic waste gasification by ultra-superheated steam // Energies, 2022. Vol. 15. P. 3616.
21. *Frolov S. M., Smetanyuk V. A., Sadykov I. A., Silantiev A. S., Shamshin I. O., Aksenov V. S., Avdeev K. A., Frolov F. S.* Natural gas conversion and organic waste gasification by detonation-born ultra-superheated steam: Effect of reactor volume // Fuels, 2022. Vol. 3. P. 375–391.
22. *Frolov S. M.* Organic waste gasification by ultra-superheated steam // Energies, 2023. Vol. 16. P. 219.
23. *Фролов С. М., Сметанюк В. А., Садыков И. А., Силантьев А. С., Авдеев К. А., Фролов Ф. С., Воробьев А. Б., Иноземцев А. В., Иноземцев Я. О., Коверзанова Е. В., Гордиенко Ю. А., Блинов Н. Д., Дударева Т. В., Попкова В. Я.* Газификация отходов животноводства ультраперегретой смесью водяного пара и диоксида углерода // Горение и взрыв, 2025. Т. 18. № 2. С. 63–91.

24. *Frolov S. M., Silantiev A. S., Sadykov I. A., et al.* Composition and textural characteristics of char powders produced by thermomechanical processing of sunflower seed husks // Powders, 2023. Vol. 2. P. 624–638.
25. *Андриенко В. Г., Горлов Е. Г., Пилецкий В. Г., Фролов С. М., Горлова С. Е.* Повышение эффективности производства синтетического жидкого топлива из угля // Уголь, 2025. № 3. С. 38–43. doi: 10.18796/0041-5790-2025-3-00-00.
26. *Алексеев К. Ю., Горлов Е. Г., Пилецкий В. Г., Фролов А. А., Фролов С. М.* Социальная угольная энергетика, былое и будущее // Уголь, 2026. № 2. С. 103–112. doi: 10.18796/0041-5790-2026-2-103-112.
27. *Goodwin D. G., Moffat H. K., Schoegl I., Speth R. L., Weber B. W.* Cantera: An object-oriented software toolkit for chemical kinetics, thermodynamics, and transport processes. Version 3.0.0, 2023. doi: 10.5281/zenodo.8137090.
28. SDToolBox — numerical tools for shock and detonation wave modeling. https://shepherd.caltech.edu/EDL/PublicResources/sdt/.

Поступила в редакцию 04.02.2026
После доработки 10.03.2026
Принята к публикации 16.03.2026