

# ГАЗИФИКАЦИЯ ЖИДКИХ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ОТХОДОВ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫМИ ПРОДУКТАМИ ГАЗОВОЙ ДЕТОНАЦИИ: ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ СОСТАВА И ТЕМПЕРАТУРЫ ПОЛУЧАЕМОГО СИНТЕЗ-ГАЗА

К. С. Панин<sup>1</sup>, В. А. Сметанюк<sup>2</sup>, С. М. Фролов<sup>3</sup>

**Аннотация:** Проведено термодинамическое моделирование процесса газификации жидких углеводородных отходов (ЖУО) в потоке высокотемпературного газифицирующего агента (ВГА). Источник ВГА — импульсно-детонационная пушка (ИДП). Основные компоненты ВГА — ультраперегретая смесь водяного пара и диоксида углерода с температурой продуктов детонации в состоянии Чепмена–Жуге или продуктов детонации, расширенных до атмосферного давления. В качестве горючего для ИДП использованы метан (стартовое горючее) и синтез-газ, полученный в результате газификации ЖУО. Для оптимизации состава получаемого синтез-газа рассмотрено влияние разбавления кислородной смеси стартового горючего водяным паром. Термодинамическое моделирование показало, что газификация ЖУО продуктами детонации позволяет добиться полной конверсии ЖУО в синтез-газ, состоящий исключительно из водорода и монооксида углерода, или в энергетический газ с высокими концентрациями метана и углеводородов C<sub>2</sub>–C<sub>3</sub> и низшей теплотой сгорания от 36,7 (кислородные смеси) до 13,6 МДж/кг (воздушные смеси). Получаемый синтез-газ в смеси с кислородом можно использовать для самозапитки ИДП, причем на самозапитку уходит около 33% получаемого синтез-газа. Для самозапитки ИДП смесью получаемого синтез-газа с воздухом требуется повышение давления в реакторе и/или обогащение воздуха кислородом. Добавление низкотемпературного водяного пара в исходную горючую смесь позволяет регулировать состав получаемого синтез-газа в широких пределах. Теоретически отношение H<sub>2</sub>/CO может изменяться от 1,3 до 3,4.

**Ключевые слова:** импульсно-детонационная пушка; ультраперегретая смесь водяного пара и диоксида углерода; жидкие углеводородные отходы; газификация; синтез-газ

DOI: 10.30826/CE24170107

EDN: PDJMUU

## Литература

1. Frolov S. M. Organic waste gasification: A selective review // *Fuels*, 2021. Vol. 2. P. 556–651. doi: 10.3390/fuels2040033.
2. Hess J. R., Ray A. E., Rials T. G. Advancements in biomass feedstock preprocessing: Conversion ready feedstocks // *Frontiers Energy Research*, 2020. Vol. 7. Article 140. 3 p.
3. 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.
4. Shahabuddin M., Alam M. T., Krishna B. B., Bhaskar T., Perkins G. A review on the production of renewable aviation fuels from the gasification of biomass and residual wastes // *Bioresource Technol.*, 2020. Vol. 312. P. 123596. doi: 10.1016/j.biortech.2020.123596.
5. 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. doi: 10.3390/en15103616.
6. 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. doi: 10.3390/fuels3030024.
7. Фролов С. М., Сметанюк В. А., Сергеев С. С. Реактор для газификации отходов сильно перегретым водяным паром // *Докл. Акад. наук*, 2020. Т. 495. С. 71–76. doi: 10.31857/S2686953520060151.
8. Safarian S., Unnthorsson R., Richter C. Performance investigation of biomass gasification for syngas and hydrogen production using Aspen Plus // *Open J. Modelling Simulation*, 2022. Vol. 10. P. 71–87. doi: 10.4236/ojmsi.2022.102005.

<sup>1</sup>Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, kostyapanin3@gmail.com

<sup>2</sup>Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, smetanuk@mail.ru

<sup>3</sup>Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, smfrol@chph.ras.ru

9. 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. doi: 10.3390/powders2030039.
10. Frolov S. M., Silantiev A. S., Sadykov I. A., Smetanyuk V. A., Frolov F. S., Hasiak J. K., Vorob'ev A. B., Inozemtsev A. V., Inozemtsev J. O. Gasification of waste machine oil by the ultra-superheated mixture of steam and carbon dioxide // *Waste*, 2023. Vol. 1. P. 515–531. doi: 10.3390/waste1020031.
11. Frolov S. M. Organic waste gasification by ultra-superheated steam // *Energies*, 2023. Vol. 16. P. 219. doi: 10.3390/en16010219.
12. Distaso E., Amirante R., Calò G., De Palma P., Tamburrano P., Reitz R. D. Predicting lubricant oil induced pre-ignition phenomena in modern gasoline engines: The reduced GasLube reaction mechanism // *Fuel*, 2020. Vol. 281. P. 118709. doi: 10.1016/j.fuel.2020.118709.
13. SDToolBox — numerical tools for shock and detonation wave modeling. <https://shepherd.caltech.edu/SDT>.
14. 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.
15. Frolov S. M., Smetanyuk V. A., Shamshin I. O., Sadykov I. A., Koval' A. S., Frolov F. S. Production of highly superheated steam by cyclic detonations of propane and methane–steam mixtures with oxygen for waste gasification // *Appl. Therm. Eng.*, 2021. Vol. 183. P. 116195. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2020.116195.

Поступила в редакцию 29.11.2023