

Экспериментальные исследования газогенераторной установки с трёхступенчатым подводом воздуха, работающей на пеллетах из RDF

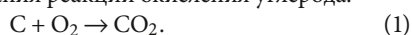
Рецензия эксперта на статью получена 15.09.2025 [The expert review of the article was received on September 15, 2025]

Трёхступенчатый подвод воздуха в газогенераторах — технология, направленная на разделение зон окисления, пиролиза и восстановления, что улучшает управляемость процесса. В 1970-х годах была предложена идея зонального регулирования, однако практическая реализация для топлива, изготовленного из переработанных отходов (Refuse-Derived Fuel, RDF), стала возможной только с развитием систем автоматизации [1, 2]. Работы [3, 4] демонстрируют, что многоступенчатый подвод воздуха снижает образование смол и повышает содержание CO и H₂. Цель данной работы — экспериментальная верификация трёхступенчатой схемы для пеллет из RDF с анализом её преимуществ перед классическими системами.

Теоретическая часть

Первоначально необходимо рассмотреть подачу воздуха в зоны газогенератора. Исследуемая система предполагает раздельную подачу воздуха в три зоны.

Первичный воздух подаётся в центральную часть газификатора для протекания реакции окисления углерода:



Вторичный воздух (зона пиролиза) — дожигание летучих и снижение выбросов смол. Третичный воздух принимает участие в реакции восстановления:



Теоретическая модель разработана на основе исследований [4], в котором описано уравнение для распределения подачи воздуха в три зоны:

$$\Phi_{\text{общ}} = \Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3, \quad (3)$$

где Φ_1 , Φ_2 и Φ_3 — доли воздуха, подаваемого на каждой ступени.

Такой способ подачи воздуха в топочное пространство газогенератора позволяет достичь следующих результатов: снижения содержания смол [4] за счёт дожигания вторичным воздухом и повыше-

ния концентрации H₂ при подаче третичного воздуха в зону восстановления [3].

Рассмотрим более подробно конструкцию экспериментального газогенератора. Экспериментальная установка представляла собой газогенератор обращённого типа мощностью 40 кВт, спроектированный для работы с RDF-пеллетами.

Основные компоненты газогенератора, входящего в состав экспериментальной установки, представлены на рис. 1.

RDF — процесс переработки горючих компонентов твердых бытовых и промышленных отходов в альтернативное топливо. Этот процесс включает сортировку, измельчение, сушку и брикетирование отходов

Газификатор состоит из вертикальной шахты из жаропрочной стали высотой 2,5 м и диаметром 0,6 м. Внутренняя поверхность футерована керамическими материалами для устойчивости к температурам до 1200°C. Система подачи топлива представляет собой шнековый питатель с регулируемой скоростью подачи от 0 до 50 кг/ч, обеспечивающий равномерное поступление RDF-пеллет в зону газификации. Последним основным компонентом газогенератора является трёхступенчатая система подвода воздуха в топку. Первичный воздух, составляющий 50 % от общего расхода, подавался через центральную часть газификатора для поддержки окисления углерода. Вторичный воздух составлял 30 % от общего расхода и подавался для дожигания летучих и снижения образования смол. Третичный воздух в содержании 20 % от общего расхода подавался для регулирования реакции восстановления CO₂ до CO.

УДК 62-626.4. Научная специальность: 2.1.3.

Экспериментальные исследования газогенераторной установки с трёхступенчатым подводом воздуха, работающей на RDF-пеллетах

Сергей Владимирович Кашников, старший преподаватель, кафедра теплогазоснабжения и вентиляции, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ)

В работе представлены результаты экспериментальных исследований процесса газификации RDF-пеллет на установке обращённого типа мощностью 40 кВт с трёхступенчатым подводом воздуха. Цель исследования — определение влияния распределения воздуха по зонам окисления, пиролиза и восстановления на состав и энергетические параметры генераторного газа. Используются теоретические основы газификации из трудов В.В. Копытова и данные зарубежных исследований за авторством Н. Knoef, U. Arena и др. Показано положительное влияние многоступенчатого подвода воздуха на КПД газификации.

Ключевые слова: синтез-газ, газификация, топливо, твёрдые бытовые отходы, теплоснабжение.

UDC 62-626.4. Scientific specialty number: 2.1.3.

Experimental research of a gas generator plant with a three-stage air supply, operating on RDF pellets

Sergey V. Kashnikov, senior lecturer, the Department of Heat and Gas Supply and Ventilation, St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU)

The paper presents the results of experimental studies of the RDF pellet gasification process in a 40 kW reverse type installation with a three-stage air supply. The purpose of the study is to determine the effect of air distribution over oxidation, pyrolysis and reduction zones on the composition and energy parameters of the generator gas. The theoretical foundations of gasification from the works of V.V. Kopytov and data from foreign studies authored by H. Knoef, U. Arena and others are used. The positive effect of multi-stage air supply on the efficiency of gasification is shown.

Key words: synthesis gas, gasification, fuel, solid household waste, heat supply.

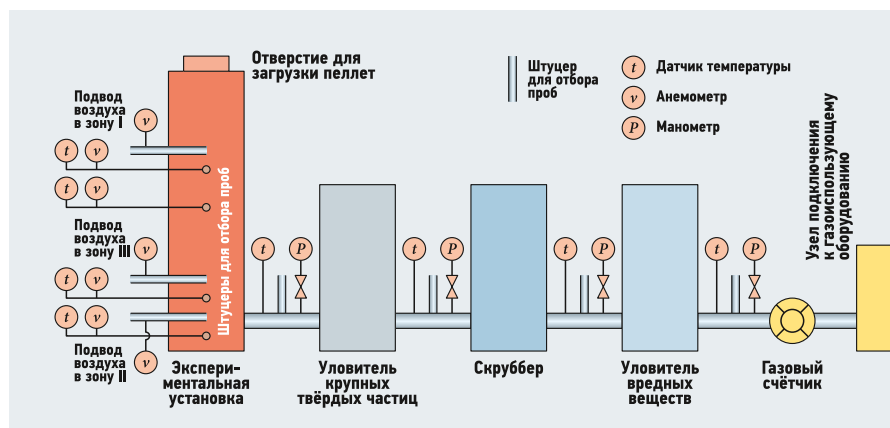


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки для газификации ТБО

Для снятия требуемых показаний использовалась приборная база, позволяющая измерять состав газа и его температуру. Для измерения состава газа использовался анализатор Gasboard-3100, измеряющий концентрации CO , H_2 , CH_4 , CO_2 и O_2 с погрешностью $\pm 1\%$. Для измерения температуры газа были использованы термопары типа К для контроля температурного режима.

Перед началом эксперимента проводилась калибровка измерительных приборов: массовый расходомер воздуха откалиброван по эталонному расходомеру, анализатор Gasboard-3100 проверен на точность измерений с использованием калибровочных газовых смесей, термопары проверены на соответствие показаний эталонным термометрам.

Анализ состава RDF-пеллет

Для экспериментальных исследований использовались пеллеты из RDF, произведенные по ГОСТ Р 55127–2012 [6].

Промышленный анализ показал, что содержание влаги составляет 3,2%, золы — 10,5%, летучих веществ — 68,3%, фиксированного углерода — 18,0%. Элементный анализ RDF-пеллет выявил содержание в них 46,3% углерода, 5,9% водорода, 34,1% кислорода, 1,2% азота, 0,5% серы.

Теплотворная способность определена при помощи калориметра и составляет 18,7 МДж/кг.

Параметры проведения экспериментальных исследований

Эксперимент проводился при трёх различных соотношениях «воздух/топливо» (1:1, 1:2, 1:3) и трёх вариантах распределения воздуха между ступенями (50:30:20, 40:40:20, 30:50:20). Каждый режим стабилизировался в течение 30 минут перед отбором проб газа.

Полученные результаты

При соотношении «воздух/топливо» 1:2 и распределении воздуха 40:40:20 были получены концентрации компонентов газа, описанные в табл. 1.

Теплотворная способность газа рассчитывается по формуле:

$$Q_n = Q_1 N_1 + Q_2 N_2 + \dots + Q_n N_n, \text{ МДж/м}^3, \quad (4)$$

где Q_i — теплотворная способность i -го компонента газа, МДж/м³; N_i — содержание i -го компонента в составе газа:

$$Q_n = 12,6 \times 0,247 + 10,8 \times 0,12 + 35,8 \times 0,018 = 5,1 \text{ МДж/м}^3.$$

Результаты анализа исследованных режимов подачи воздуха в газогенератор описаны в табл. 2.

В качестве преимуществ трёхступенчатой системы подачи воздуха следует отметить, что было достигнуто увеличение доли выхода CO с 18,5 до 24,7% за счёт оптимизации зоны восстановления,

а также снижение уровня образования смол с 0,25 до 0,09 г/м³ при распределении 40:40:20.

Заключение

В ходе исследований разработан и экспериментально исследован газогенератор обратного типа с трёхступенчатой схемой подачи воздуха.

Основные результаты исследования заключаются в следующем. Что касается вторичного воздуха, увеличение его доли до 40% (режим 40:40:20) позволило снизить содержание смол на 64% за счёт дожигания летучих в зоне пиролиза. Это согласуется с данными [5, 7], где рост вторичного воздуха уменьшал выход смол на 50–70%. В области исследования третичного воздуха и реакции восстановления было установлено, что подача 20% воздуха в зону восстановления повысила концентрацию CO с 18,5% для одноступенчатой системы до 24,7% — для трёхступенчатой. Оптимальным был признан режим 40:40:20, который обеспечил максимальный КПД, составляющий 72,1%, и минимальное содержание смол. При этом увеличение доли первичного воздуха выше 50% приводило к переокислению углерода и росту CO_2 .

Таким образом, трёхступенчатый подвод воздуха позволил повысить теплотворную способность газа до 5,1 МДж/м³ и КПД газификации до 72,1%. Выявлено оптимальное распределение воздуха по ступеням: 40% для первой ступени, 40% для второй, 20% для третьей. Кроме того, были разработаны условия проведения эффективного процесса газификации для RDF с влажностью менее 5%, что подтверждается снижением концентрации смол до 0,09 г/м³.

Концентрации компонентов полученного синтез-газа

табл. 1

Компонент	Концентрация, %
CO	24,7 ± 0,4
H2	12,0 ± 0,3
CH4	1,8 ± 0,1
CO2	14,2 ± 0,3
N2	52,8 ± 0,5

КПД и содержание смол в полученном синтез-газе

табл. 2

Режим (воздух/топливо)	Распределение воздуха	КПД, %	Содержание смол, г/м ³
1:2	50:30:20	70,3	0,15
1:2	40:40:20	72,1	0,09
1:2	30:50:20	68,9	0,21

- Копытов В.В. Газификация твёрдых топлив: ретроспективный обзор, современное состояние дел и перспективы развития // Альтернативная энергетика и экология. 2011. №6. С. 29–72.
- Кашников С.В. Перспективы использования твёрдых бытовых отходов в качестве альтернативного источника энергии // Инновации и инвестиции, 2021. №5. С. 148–150.
- Knoef H. Handbook of biomass gasification. BTG Biomass Technology Group. 2012. 509 p.
- Ptasinski K.J. Efficiency of biomass energy — An exergy approach to biofuels, power, and biorefineries. Wiley. 2016. 784 p.
- Arena U. Process and technological aspects of municipal solid waste gasification. Waste Management. 2012. Vol. 32. Pp. 625–639.
- ГОСТ Р 55127–2012 (CEN/TR 15508:2006). Топливо твёрдое из бытовых отходов. Основные свойства для составления системы классификации/Дата введ.: 01.07.2014.
- Basu P. Biomass gasification, pyrolysis and torrefaction. Academic Press. 2010. 530 p.
- Кашников С.В., Бирюзова Е.А. Генераторный газ из твёрдых коммунальных отходов как топливо для отопительных установок // Журнал СОК, 2023. №2. С. 36–37.

References — see page 79.

[Experimental research of a gas generator plant with a three-stage air supply, operating on RDF pellets. Pp. 42–43.](#)

Sergey V. Kashnikov, senior lecturer, the Department of Heat and Gas Supply and Ventilation, St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU)

1. V.V. Kopytov. *Gazifikatsiya tverdykh topliv: retrospektivnyy obzor, sovremennoe sostoyanie del i perspektivy razvitiya* [Gasification of solid fuels: A retrospective review, current state of the art, and development prospects]. *Al'ternativnaya energetika i ekologiya* ["Alternative Energy and Ecology" Magazine]. 2011. No. 6. Pp. 29–72. [In Russian]
2. S.V. Kashnikov. *Perspektivy ispol'zovaniya tvorydykh bytovykh othodov v kachestve al'ternativnogo istochnika energii* [Prospects for using municipal solid waste as an alternative energy source]. *Innovatsii i investitsii* ["Innovations and Investments" Magazine]. 2021. No. 5. Pp. 148–150. [In Russian]
3. H. Knoef. Handbook of biomass gasification. BTG Biomass Technology Group. 2012. 509 p.
4. K.J. Ptasiński. Efficiency of biomass energy — An exergy approach to biofuels, power, and biorefineries. Wiley. 2016. 784 p.
5. U. Arena. Process and technological aspects of municipal solid waste gasification. Waste Management. 2012. Vol. 32. Pp. 625–639.
6. GOST R 55127–2012 [The State Industry Standard of Russia No. 55127–2012] (CEN/TR 15508:2006). *Toplivo tvordoe iz bytovykh othodov. Osnovnye svoystva dlya sostavleniya sistemy klassifikatsii* [Solid fuels from municipal waste. Key properties for developing a classification system]. Date of impl.: July 1, 2014. [In Russian]
7. P. Basu. Biomass gasification, pyrolysis and torrefaction. Academic Press. 2010. 530 p.
8. [S.V. Kashnikov, E.A. Biryuzova. Generatornyy gaz iz tvorydykh kommunal'nykh othodov kak toplivo dlya otopitel'nykh ustanovok \[Generator gas from municipal solid waste as a fuel for heating installations\]. Zhurnal Santechnika, Otoplenie, Konditsionirovanie \(SOK\) \[Journal of Plumbing, Heating, Ventilation\]. 2023. No. 2. Pp. 36–37. \[In Russian\]](#)