

УДК 621.365

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

Установка газификации твердых отходов

Авторское резюме

Состояние вопроса. В настоящее время уничтожение бытовых и сельскохозяйственных отходов подразумевает либо захоронение, либо сжигание их на мусоросжигающих предприятиях. Такое положение дел обуславливает большой вред для экологии, а также высокие экономические затраты, как капитальные, так и эксплуатационные, необходимые для уничтожения отходов. Те немногие случаи, когда из отходов извлекают энергию, всё равно требуют огромных капитальных и эксплуатационных затрат на строительство отдельных мусороперерабатывающих объектов. Предложено использование существующих тепловых электростанций в качестве объектов утилизации твердых бытовых и сельскохозяйственных отходов. Проведенное ранее численное моделирование термической деструкции отходов, выявившее оптимальные параметры процесса, положено в основу экспериментальных исследований газификации в реакторе. Цель данного исследования – опробовать технологию термической газификации твердых отходов при оптимальных параметрах процесса в реакторе усовершенствованной конструкции.

Материалы и методы. Экспериментальные исследования газификатора обращенного типа проведены с помощью физических методов измерений, таких как метод непосредственной оценки, контактный и бесконтактный методы, а также дифференциальный метод. Для расчета теплоты сгорания полученного генераторного газа использована методика из нормативного метода теплового расчета котельных агрегатов в соответствии с ГОСТ 31369-2021 (ISO 6976:2016). В качестве образца твердых отходов для проведения экспериментального исследования взята тара деревянная, утратившая потребительские свойства. Актуальность выбора данного вида сырья подтверждается статистическими данными, принятыми в соответствии с Территориальной схемой обращения с отходами Ростовской области, отражающей вид и количество отходов, поступающих на полигоны Ростовской области ежегодно.

Результаты. Разработана и создана установка газификации твердых бытовых и сельскохозяйственных отходов, конструктивные особенности которой обеспечивают наибольшую площадь взаимодействия углерода сырья и кислорода окислителя. Установлено, что теплота сгорания генераторного газа, полученного в разработанном газификаторе (7,85 МДж/м³), выше, чем теплота сгорания газа в классических газификаторах обращенного типа (5,40 МДж/м³).

Выводы. Проведенные экспериментальные исследования позволили получить генераторный газ с более высокой теплотой сгорания, чем в классическом реакторе обращенного типа. Созданная установка может рассматриваться как пилотный образец и имеет возможность масштабирования для внедрения на реальных объектах теплоэнергетики.

Ключевые слова: термическая газификация, твердые отходы, утилизация отходов, хроматографический анализ, газификатор обращенного типа

Roman Vladimirovich Bezuglov

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

The solid waste gasification plant

Abstract

Background. Currently, the disposal of household and agricultural waste involves either waste burial or incineration at waste incineration plants. Thus, it causes great harm for the environment, as well as high economic costs, both capital and operating, required for the destruction of waste. The few cases where energy is derived from waste still require huge capital and operating costs for the construction of separate waste recycling facilities. The author suggests using existing thermal power plants as facilities for the disposal of solid household and agricultural waste. Previously conducted numerical modeling of thermal destruction of waste, which revealed the optimal process parameters, is the basis for experimental studies of gasification in a reactor. The purpose of this study is to test the technology of thermal gasification of solid waste at optimal process parameters in a reactor of an improved design.

Materials and methods. Experimental studies of the reverse-type gasifier have been carried out using physical measurement methods such as a direct assessment method, contact and non-contact methods, and the differential method. To calculate the heat of combustion of the resulting generator gas, the author has used a technique of the standard

method for thermal calculation of boiler units in accordance with GOST 31369-2021 (ISO 6976:2016). Wooden containers that have lost their consumer properties have been taken as a sample of solid waste for the experimental study. The relevance of choosing this type of raw material is confirmed by statistical data approved in accordance with the Territorial Waste Management Scheme of the Rostov Region, defining the type and amount of waste arriving at landfills in the Rostov Region annually.

Results. An improved design of the solid waste gasifier has been developed and created, providing the largest area of interaction of the raw material carbon and the oxidizer oxygen. It has been established that the heat of combustion of the generator gas obtained in the developed gasifier ($7,85 \text{ MJ/m}^3$) is higher than the heat of combustion of gas in classical reverse-type gasifiers ($5,40 \text{ MJ/m}^3$).

Conclusions. The experimental studies conducted made it possible to obtain generator gas with a higher combustion heat than in a classic reverse-flow reactor. The developed plant can be considered as a pilot model and has the ability to be scaled up on an industrial scale at real-world power facilities.

Key words: thermal gasification, solid waste, waste disposal, chromatographic analysis, reverse-type gasifier

DOI: 10.17588/2072-2672.2025.2.012-017

Введение. На сегодняшний день при колоссальных объемах имеющихся и вновь образующихся твердых отходов лишь малая часть (менее 5 %) отправляется на вторичную переработку или каким-либо образом полезно утилизируется. В условиях современной гонки за энергоэффективностью крайне расточительно упускать возможность извлечения полезной энергии из такого ценного энергетического ресурса, как твердые органические отходы. Помимо экономического аспекта, существенным фактором является экологическая составляющая, заключающаяся в колоссальных выбросах вредных токсинов при таком обращении с отходами, как сжигание без применения устройств и технологий, улавливающих вредные вещества, либо хранение отходов на полигонах под открытым небом.

Ниже описывается усовершенствованная конструкция установки газификации отходов с реактором обращенного типа, которая была разработана для проведения физического эксперимента термической газификации в неподвижном слое в целях получения генераторного газа.

В результате проведенного ранее численного моделирования процесса газификации твердых органических отходов получены режимные параметры (температура, коэффициент избытка агента, вид агента), при которых образуется генераторный газ с наиболее высокой теплотой сгорания [1]. На основе результатов численного моделирования была разработана конструкция установки газификации твердых отходов. При создании установки был усовершенствован известный тип газификатора обращенного типа [2]. Основными отличиями усовершенствованного газификатора являются расположение зоны газификации в центральной части реактора, а также возможность газификации биомассы и других органических отходов не только воздухом, но и дымовыми газами, а также обогащенным кислородом воздухом, техническим кислородом и паром. В связи с этим расширяются исследовательские возможности установки. Усовершенствованием разработанного газификатора отходов по сравнению

с существующими типами газификаторов является также место подачи окислителя – сверху, в отличие от места подачи от стенки в классических реакторах обращенного типа (рис. 1,а) и снизу – в реакторах прямого процесса (рис. 1,б). Такая организация схемы взаимодействия «окислитель-сырье» дает наибольшую площадь взаимодействия углерода сырья и кислорода окислителя, что, как в итоге покажут экспериментальные исследования, дает большую теплоту сгорания генераторного газа.

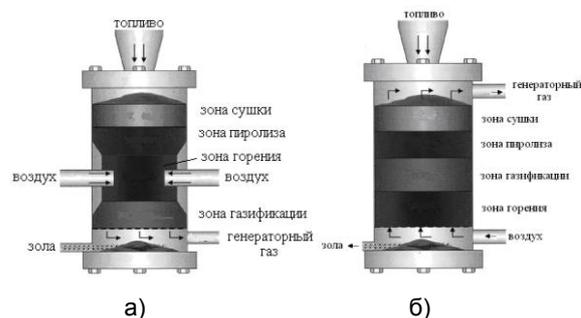


Рис. 1. Схемы подачи агента и выхода генераторного газа: а – классические газогенераторы обращенного процесса; б – газогенераторы прямого процесса

На рис. 2 представлена схема подачи агента и выхода генераторного газа, реализуемая в созданной установке газификации. Конструкция защищена патентом [3].

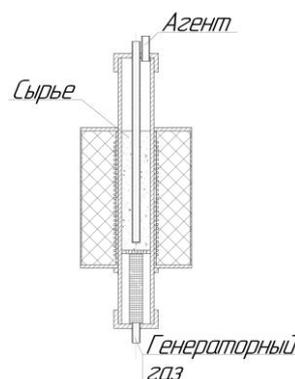


Рис. 2. Реактор газификатора установки газификации твердых отходов

В качестве образца отходов для испытания установки газификации твердых отходов были взяты отходы тары деревянной, утратившей потребительские свойства (далее – тара деревянная, код по Федеральному классификационному каталогу отходов (ФККО) 40414000 515).

Методы исследования. Для разработки установки газификации были проанализированы различные типы газификаторов [2, 4, 5] и по параметру большей теплоты сгорания получаемого газа был выбран именно обращенный тип (табл. 1). Обращенный процесс способствует меньшему образованию смол, что также является положительным фактором, поскольку не будет происходить засорения форсунок и каналов топливной системы.

При проведении экспериментальных исследований газификатора твердых отходов применены такие физические методы измерений, как метод непосредственной оценки, контактный и бесконтактный методы, а также дифференциальный метод.

В разработанном газификаторе газифицирующий агент подается в верхнюю часть, в которой и происходят окислительно-восстановительные реакции. Отбор образовавшихся газов осуществляется ниже подвода газифицирующего агента. Активная зона газификатора занимает часть от места подвода агента до колосниковой решетки, ниже которой расположен зольник с газоотборным патрубком.

Зоны сухой перегонки и подсушки в данном типе газификатора располагаются выше активной зоны, поэтому влага топлива и смолы не выходят из газификатора, минуя активную зону. Проходя через зону с высокой температурой, продукты сухой перегонки подвергаются разложению, в результате чего количество смол в выходящем из генератора газе незначительно, что выгодно отличает этот тип газификатора от других типов, в частности, прямого и поперечного типов.

Результаты исследования. Установка газификации изготовлена в соответствии с чертежами, полученными в ходе эскизного проектирования. Фото установки представлено на рис. 3. Разработка велась с учетом упрощения конструкции для удобства изготовления и снижения затрат на производство, а также с учетом минимального изменения существующих конструкций котельных установок, в которые планируется внедрять данный вид газификаторов для утилизации отходов на существующих теплоэлектростанциях [6, 7].



Рис. 3. Установка газификации твердых отходов

Работа установки газификации в составе испытательного стенда осуществляется по принципиальной схеме, представленной на рис. 4. Путем открытия верхней крышки в реактор на металлическую сетку засыпают твердые отходы, измельченные до фракции 2–3 мм. Наличие верхней крышки, размер которой соответствует диаметру самого реактора, позволяет легко и без риска налипания засыпать широкий спектр органических отходов влажностью до 40 % [8].

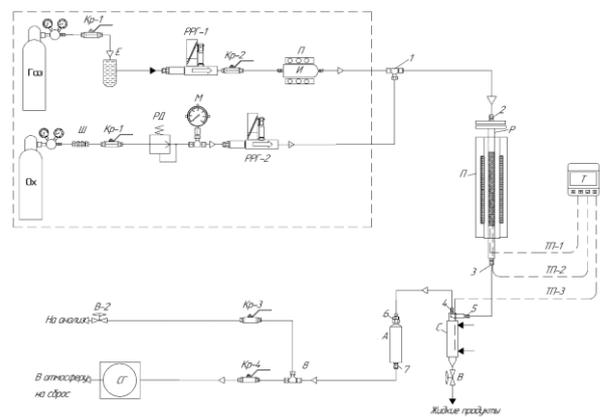


Рис. 4. Принципиальная схема работы установки газификации в составе испытательного стенда

Таблица 1. Справочные данные по составу генераторных газов при прямом и обратном процессах газификации древесины

Процесс	CO	H ₂	CH ₄	CO ₂	N ₂	смолы г/м ³	Q _{нр} МДж/м ³
	% (об.)						
Обратный	29,0	15,4	1,6	6,6	47,2	0,36	5,4
Прямой	16,4	11,3	2,2	13,2	57	50–100	4,0

Затем верхнюю крышку закручивают и через подводящую трубку подают окислитель. В качестве окислителя может выступать как воздух, так и практически любой газифицирующий агент – кислород, водяной пар, дымовые газы, воздух, обогащенный кислородом, а также комбинация этих газифицирующих агентов. Окислитель, проходя через твердые отходы, преобразуется в генераторный газ, проходит через сетку и перфорированную трубку, после чего выходит через отводящую трубку, вставленную в нижнюю крышку. Через подводящую трубку на нихромовую нить, намотанную на жаропрочную диэлектрическую подкладку, подают напряжение, отчего температура внутри реактора поднимается и начинается процесс газификации твердых отходов. При этом теплота за счет наличия теплоизоляции, находящейся в цилиндрическом корпусе, практически не теряется в окружающую среду. Для мониторинга температуры внутри реактора в карман термопары помещены датчики температуры. После окончания процесса газификации твердых отходов на нихромовую нить прекращают подачу напряжения, откручивают нижнюю крышку и путем ссыпания опустошают реактор от зольного остатка. Цикл замыкается.

Созданная установка может рассматриваться как пилотный образец и имеет возможность для масштабирования в промышленных масштабах на реальных объектах энергетики.

Проведенные в [1] численные исследования выявили оптимальные параметры термической газификации. Оптимальным температурным интервалом газификации можно считать диапазон 800–900 °С. До этих значений температуры степень конверсии сырья меньше 100 %, т. е. окисляется не весь углерод. В диапазоне выше 800–900 °С влияние температуры существенно снижается, горючих веществ (водород, монооксид углерода, метан) практически не добавляется и доля балласта (азот, углекислый газ, пар) практически не падает.

В табл. 2 приведены результаты численного моделирования отходов тары деревянной при температуре 800 °С [1].

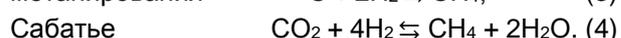
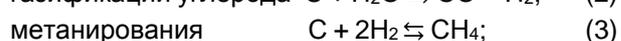
Таблица 2. Параметры процесса газификации при температуре 800 °С

Параметры газификации		Параметры сухого генераторного газа			
Окислитель	α	V , м ³ /кг	сумма горючих, %	H ₂ /CO	Q_n , МДж/м ³
Воздух	0,2	1,90	62,89	0,93	6,99
	0,3	2,12	52,37	0,96	5,54
	0,4	2,33	39,60	0,97	4,34
40 % O ₂	0,2	1,55	76,15	0,92	8,53
	0,3	1,61	65,92	0,94	7,28
	0,4	1,65	55,94	0,95	6,14
95 % O ₂	0,2	1,33	88,06	0,91	9,92
	0,3	1,29	81,69	0,93	9,07
	0,4	1,23	74,30	0,95	8,18

Теоретическая теплота сгорания находится в пределах 4,3–10,0 МДж/м³ и зависит только от концентрации кислорода в окислителе. Введение в окислитель водяного пара приводит к незначительному снижению теплоты сгорания, при этом влияет только на отношение H₂/CO. Чем больше отношение H₂O/C_s, тем больше отношение H₂/CO и при H₂O/C_s = 0,98 H₂/CO = 1,97–2,04, что соответствует требованиям к синтез-газу при производстве синтетических углеводородов методом Фишера–Тропша [9, 10].

С точки зрения генерации топливного газа оптимальным окислителем является воздух, обогащенный кислородом (40 % O₂) при коэффициенте избытка агента $\alpha = 0,2–0,3$. Теплота сгорания генераторного газа в этих условиях составляет 7,3–8,6 МДж/м³ [1].

В реакторе установки газификации происходят четыре основные реакции:



Обсуждение результатов экспериментальных исследований. После засыпания отходов в реактор и закручивания верхней крышки реактора с помощью контроллера «Термодат» задается требуемая температура процесса газификации, начинается нагрев реактора. При этом поток газа после реактора направлен на счетчик газа для фиксации объема выделяющихся паров и выхода летучих в процессе нагрева сырья. Нагрев реактора занимает в среднем 70–80 минут. После достижения требуемой температуры подается окислитель в количестве, необходимом для обеспечения требуемого коэффициента избытка агента $\alpha = 0,2–0,4$. Был взят именно такой диапазон α ввиду того, что при $\alpha = 0,1$ не обеспечиваются условия экзотермичности реакции – при таком α требуется подвод теплоты извне. При $\alpha = 0,5$ наблюдается слишком высокая доля балластных негорючих газов (азота и двуокиси углерода), ввиду чего нецелесообразно проводить газификацию при значениях α , больших, чем $\alpha = 0,4$. При газификации сырья в течение 20 минут производится замер объема выходящего газа. Далее поток генераторного газа после реактора направляется на анализ – на газовый хроматограф «Кристаллюкс-4000М».

Газификация образца твердых органических отходов (тары деревянной) массой 20 г производилась при температуре $t = 800$ °С и давлении $p_r = 1$ атм. В качестве газифицирующего агента использован воздух с коэффициентом избытка $\alpha = 0,2$ и расходом 7 дм³/ч. Режимные параметры процесса газификации соответствуют полученным ранее в результате численного моделирования параметрам [1].

В установке на примере отходов тары деревянной получен генераторный газ следующего состава: H_2 – 13,37 %; N_2 – 43,82 %; CO_2 – 12,75 %; CH_4 – 11,25 %; CO – 18,81 %. Низшая рабочая теплота сгорания полученного генераторного газа составила $Q_{нр} = 7,85$ МДж/м³. Расчет теплоты сгорания генераторного газа произведен по ГОСТ 31369-2021 (ISO 6976:2016), использована методика из нормативного метода теплового расчета котельных агрегатов [11]. Анализ результатов испытаний установки показывает, что термическая газификация твердых отходов протекает с образованием преимущественно водорода, метана и оксида углерода, которые являются горючими компонентами.

Погрешность эксперимента, рассчитанная в соответствии с ГОСТом¹, составила $\delta_{экс} = 7,50$ %, погрешность определения состава генераторного газа составила $\delta_{гг} = 7,36$ %.

В табл. 3 дается сравнение компонентного состава и теплоты сгорания генераторного газа, полученного из отходов древесины в классическом реакторе обращенного типа [2] и в предлагаемом нами реакторе.

Таблица 3. Компонентный состав генераторного газа при газификации древесных отходов

Конструкция реактора	CO	H ₂	CH ₄	CO ₂	N ₂	Q _{нр} , МДж/м ³
	% (об.)					
Классический реактор	29,0	15,4	1,6	6,6	47,2	5,4
Экспериментальный реактор	18,81	13,37	11,25	12,75	43,82	7,85

Анализируя данные табл. 3, можно отметить существенное различие процентной составляющей основных горючих компонентов CO и CH₄ для разных конструкций реакторов. Увеличение доли метана в генераторном газе (11,25 % по сравнению с 1,6 %) приводит к повышению теплоты его сгорания с 5,4 до 7,85 МДж/м³.

Выводы. Разработанная установка газификации твердых бытовых и сельскохозяйственных отходов, конструктивные особенности которой обеспечивают наибольшую площадь взаимодействия углерода сырья и кислорода окислителя, способствует повышению теплоты сгорания генераторного газа.

Теплота сгорания генераторного газа, полученного в разработанном газификаторе (7,85 МДж/м³), выше, чем теплота сгорания газа в классических газификаторах обращенного типа (5,40 МДж/м³).

Созданная установка может рассматриваться как пилотный образец и имеет возможность масштабирования для внедрения на реальных объектах теплоэнергетики.

Список литературы

1. **Численное** моделирование газификации твердых отходов / Р.В. Безуглов, В.Б. Ильин, В.В. Папин, Р.Е. Яковенко // Вестник ЮУрГУ. Сер. Энергетика. – 2025. – Т. 23, № 1.
2. **Алешина А.С., Сергеев В.В.** Газификация твердого топлива: учеб. пособие. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. – 202 с.
3. **Пат. № 230856** Российская Федерация МПК F23G 5/24, C10J 3/20. Газификатор отходов: № 2024130066/12(066352): заявл. 04.10.2024; опубл. 23.12.2024 / Р.В. Безуглов, В.В. Папин, Н.А. Ведмичев, Д.А. Пономарев, Д.А. Пономарев, А.Д. Попова. – Бюл. № 36.
4. **Канторович Б.В.** Введение в теорию горения и газификация твердого топлива. – М.: Metallurgizdat, 1961. – 355 с.
5. **Knoef H.A.M.** Gasification of biomass & waste – practical experience // Proc. of III International Slovak Biomass Forum, 3–4 February 2003. – Bratislava, 2003. – P. 41–44.
6. **Исследование** процесса выработки электрической энергии от генераторного газа, полученного путем переработки твердых отходов / Р.В. Безуглов, В.Ю. Воловиков, В.В. Папин и др. // Известия вузов. Электромеханика. – 2024. – № 4(62). – С. 75–81.
7. **Эксергетический** анализ работы парового котла на продуктах газификации твердых отходов / Р.В. Безуглов, В.В. Папин, Н.А. Ведмичев и др. // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2024. – Т. 16, № 3(63). – С. 62–75.
8. **Basu P.** Biomass Gasification and Pyrolysis: practical design and theory // Academic Press, 30 Corporate drive, Burlington, USA, page 365.
9. **Tandem** catalytic approaches for CO₂ enriched Fischer-Tropsch synthesis / Rubén Blay-Roger, Muhammad Asif Nawaz, Francisco M. Baena-Moreno, Luis F. Bobadilla, Tomas R. Reina, Jos A. Odriozola // Progress in Energy and Combustion Science. – 2024. – Vol. 103. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2024.101159>.
10. **Переработка** углей и природных органических веществ в синтетические углеводороды. Ч. 7. Получение углеводородов моторных фракций из древесины сосновых пород / В.Б. Ильин, Г.Б. Нарочный, Р.Е. Яковенко и др. // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Сер.: Технические науки. – 2019. – № 1(201). – С. 88–93.
11. **Каган Г.М.** Тепловой расчет котлов (Нормативный метод). – 3-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Изд-во НПО ЦКТИ, 1998. – 256 с.

References

1. Bezuglov, R.V., Il'in, V.B., Papin, V.V., Yakovenko, R.E. Chislennoe modelirovanie gazifikatsii tverdykh otkhodov [Numerical modeling of solid waste gasification]. *Vestnik YuUrGU. Seriya Energetika*, 2025, vol. 23, no. 1.

¹ ГОСТ Р 8.563 – 2009 Методики (методы) измерений.

2. Aleshina, A.S., Sergeev, V.V. *Gazifikatsiya tverdogo topliva* [Solid fuel gasification]. Saint-Petersburg: Izdatel'stvo Politehnicheskogo universiteta, 2010. 202 p.

3. Bezuglov, R.V., Papin, V.V., Vedmichev, N.A., Ponomarev, D.A., Ponomarev, D.A., Popova, A.D. *Gazifikator otkhodov* [Waste Gasifier]. Patent RF, no. 230856, 2024.

4. Kantorovich, B.V. *Vvedenie v teoriyu goreniya i gazifikatsiya tverdogo topliva* [Introduction to the Theory of Combustion and Gasification of Solid Fuel]. Moscow: Metallurgizdat, 1961. 355 p.

5. Knoef, H.A.M. Gasification of biomass & waste – practical experience. Proc. of III International Slovak Biomass Forum, 3–4 February 2003. Bratislava, 2003, pp. 41–44.

6. Bezuglov, R.V., Volovikov, V.Yu., Papin, V.V., Belov, A.A., Dyakonov, E.M., Mikhailov, V.V. Issledovanie protsessa vyrabotki elektricheskoy energii ot generatornogo gaza, poluchennogo putem pererabotki tverdykh otkhodov [Study of the process of electric energy generation from generator gas obtained by processing solid waste]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika*, 2024, no. 4(62), pp. 75–81.

7. Bezuglov, R.V., Papin, V.V., Vedmichev, N.A., Zhitnikov, S.V., Annenkov, R.A., Volovikov, V.Yu. Eksperimentalnyy analiz raboty parovogo kotla na

produktakh gazifikatsii tverdykh otkhodov [Exergy analysis of the operation of a steam boiler on solid waste gasification products]. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*, 2024, vol. 16, no. 3(63), pp. 62–75.

8. Basu, P. *Biomass Gasification and Pyrolysis: practical design and theory*. Academic Press, 30 Corporate drive. Burlington, USA, p. 365.

9. Rubén Blay-Roger, Muhammad Asif Nawaz, Francisco M. Baena-Moreno, Luis F. Bobadilla, Tomas R. Reina, Jos A. Odriozola. Tandem catalytic approaches for CO₂ enriched Fischer-Tropsch synthesis. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2024, vol. 103. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2024.101159>.

10. Il'in, V.B., Narochnyy, G.B., Yakovenko, R.E., Zubenko, A.F., Savostyanov, A.A. Pererabotka ugley i prirodnykh organicheskikh veshchestv v sinteticheskie uglevodorody. Chast' 7. Poluchenie uglevodorodov motornykh fraktsiy iz drevesiny sosnovykh porod [Processing of coals and natural organic substances into synthetic hydrocarbons. Part 7. Obtaining hydrocarbons of motor fractions from pine wood]. *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskiy region. Seriya: Tekhnicheskie nauki*, 2019, no. 1(201), pp. 88–93.

11. Kagan, G.M. *Teplovoy raschet kotlov (Normativnyy metod)* [Thermal calculation of boilers (Normative method)]. Saint-Petersburg: Izdatel'stvo NPO TsKTI, 1998. 256 p.