УДК 628.475.3 doi: 10.25750/1995-4301-2025-4-153-159

Установка для газификации углеродсодержащих отходов

© 2025. С. Н. Салтыкова, к. т. н., доцент, М. Ю. Назаренко, к. т. н., доцент,
Р. В. Козлов, магистр, А. Д. Коршунов, аспирант,
Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
199106, Россия, г. Санкт-Петербург, 21 линия В.О., д. 2,
e-mail: ssn_58@mail.ru

Процесс газификации углеродных материалов является особенно актуальным в России, где объём угольных отходов превышает 120 млн т. Цель данной работы состояла в разработке установки газификации углеродсодержащих отходов, работающей в режиме неподвижного слоя. Эксперименты по газификации образцов мелкой фракции каменного угля (1–2 мм) проводили с использованием в качестве газифицирующих агентов предварительно нагретого воздуха, паровоздушной смеси, воздуха с добавлением диоксида углерода. В работе использованы методы дифференциальной сканирующей калориметрии, термогравиметрического и хроматографического анализа. Добавки водяного пара и диоксида углерода позволили повысить теплоту сгорания и увеличить коэффицент полезного действия газификации до 54%. Определён рабочий режим газогенератора, обеспечивающий получение синтез-газа с теплотворной способностью 3,6 МДж/нм^3. Показано, что наибольшая эффективность газогенерации достигается в режиме паровоздушной газификации при добавке водяного пара в количестве 0,1 кг на 1 кг угля и при использовании в качестве газифицирующего агента воздуха с добавлением диоксида углерода в соотношении объёмов 100:5. Установлено, что увеличение добавок водяного пара и диоксида углерода сверх оптимальных количеств приводит к снижению эффективности процесса газификации. В процессе могут быть использованы отходы различных производств, включая нефтешламы, что определяет значимость газификации для эффективного управления углеродсодержащими отходами и для достижения более широких экологических и экономических целей.

Ключевые слова: каменный уголь, углеродсодержащие отходы, газификация, неподвижный слой, газогенератор, воздушное дутьё, паровоздушная газификация, газифицирующий агент.

Installation for gasification of carbon-containing wastes

© 2025. S. N. Saltykova ORCID: 0000-0002-3753-7675,
M. Yu. Nazarenko ORCID: 0000-0002-1684-4828,
R. V. Kozlov ORCID: 0009-0007-4833-6362,
A. D. Korshunov ORCID: 0009-0003-6138-2743,
Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University,
2, 21st line V.O., St. Petersburg, Russia, 199106,
e-mail: ssn_58@mail.ru

The process of carbonaceous materials gasification is especially relevant in Russia, where the volume of coal waste exceeds 120 million tons. A gasification installation for carbon-containing waste operating in the fixed-bed mode has been developed. Experiments on gasification of fine coal fraction samples (1–2 mm) were carried out using preheated air, a steam-air mixture, and air with added carbon dioxide as gasifying agents. The work used the methods of differential scanning calorimetry, thermogravimetric analysis, and chromatographic analysis. Additions of water vapor and carbon dioxide made it possible to increase the heat of combustion and increase the gasification efficiency to 54%. The operating mode of the gas generator was determined, ensuring the production of synthesis gas with a calorific value of 3.6 MJ/nm^3. It is shown that the highest efficiency of gas generation is achieved in the steam-air gasification mode with the addition of water vapor in the amount of 0.1 kg per 1 kg of coal and with the use of air as a gasifying agent with the addition of carbon dioxide in a volume ratio of 100:5. It is established that an increase in the addition of water vapor and carbon dioxide above the optimal amounts leads to a decrease in the efficiency of the gasification process. The process can use waste from various industries, including oil sludge, which determines its significance for the effective management of carbon-containing waste and for achieving broader environmental and economic goals.

Keywords: hard coal, carbon containing waste, gasification, fixed bed, gas generator, air blast, steam-air gasification, gasifying agent.

Процесс газификации углеродных материалов заключается во взаимодействии материала с воздухом или кислородом и паром с получением газообразного продукта. Получаемый синтез-газ, преимущественно состоящий из смеси водорода и монооксида углерода, может быть использован непосредственно в качестве топлива или в качестве сырья для синтеза другого газообразного или жидкого топлива или химикатов. Сырьём для процесса газификации может являться практически любой углеродсодержащий материал, в том числе отходы углей [1].

Лидером в применении термохимической переработки угля является Китай. Самые крупные газифицирующие предприятия достигают выработки до 9300 МВт в производстве жидкого топлива путём газификации угля [2].

В то же время многочисленные исследования направлены на изучение возможности использования в процессе газификации различных углеродсодержащих отходов [3]. Вопросы переработки биомассы с использованием газификации рассмотрены в работе [4]. Исследования газификации биомассы показали возможность получения синтез-газа с теплотворной способностью 4,49–6,85 МДж/нм^3 [5]. При этом в составе синтез-газа CO, H_2, CH_4 и CO_2 находились в пределах (%): 16,29–17,62; 10,56–10,83; 5,96–7,40 и 17,96–18,35, соответственно [6].

В ряде других работ рассмотрена возможность применения газификации к материалам на основе нефти, таких как нефтяной кокс [7], отходы его производства и высокосернистый мазут [8], и к смесям угля и нефтяного кокса [9].

При переработке угольного сырья происходит накопление угольной пыли, углезольных отходов, увеличиваются выбросы углекислого газа [10, 11]. Всё это приводит к ухудшению экологической обстановки. В работах [12–14] проведён детальный анализ влияния перечисленных факторов на окружающую среду, здоровье людей и предложены способы по снижению их негативного влияния.

Наличие большого количества работ, посвящённых вопросам газификации углеродсодержащих материалов, указывает на актуальность данной тематики. С учётом особенности структуры российской экономики изучение возможности применения газификации к утилизации угольных отходов представляется актуальным направлением научных исследований. Действительно, объём угольных отходов в России на сегодняшний день оценивается в 120 млн т, и утилизация этих отходов имеет огромное значение, поскольку угольные отходы являются одним из основных источников загрязнения атмосферы, водоёмов и почвы [15, 16]. Экологическая эффективность применения паровоздушной газификации не вызывает сомнений [17]. Применение данной технологии позволит утилизировать эти отходы, превращая их в газообразные топлива и минимизируя выбросы вредных веществ, что, в свою очередь, положительно скажется на окружающей среде и здоровье человека.

Паровоздушная газификация угольных отходов позволит получать синтез-газ, который может быть использован для производства электричества и тепла, способствуя диверсификации источников энергии.

Переработка угольных отходов методом паровоздушной генерации может дать экономическую выгоду, так как позволит использовать отходы, которые ранее считались не перерабатываемыми, и это может привести к уменьшению затрат на захоронение отходов.

Целью настоящей работы является создание установки для газификации углеродсодержащих отходов и определение рациональных режимов работы воздушного газификатора.

Объекты и методы исследований

Объектом исследования в настоящей работе был выбран отсев каменного угля фракции 1–2 мм. Эксперименты по газификации этого материала были проведены с использованием в качестве газифицирующего агента: предварительно нагретого воздуха, смеси воздуха и диоксида углерода, паровоздушной смеси.

Технический анализ каменного угля выполняли по стандартным методикам: влажность – по ГОСТ 11014-2001, истинную плотность – по ГОСТ 2160-2015, зольность – ГОСТ 55661-2013, выход летучих веществ – по ГОСТ Р 55660-2013.

Свойства каменного угля определяли методами дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) и термогравиметрического анализа (ТГА).

Анализ генераторного газа выполняли с использованием хроматографического комплекса Хроматэк-Кристалл 5000/9000 (Россия). Анализ выполняли на двух колонках с катарометром в качестве детектора. Одна колонка – длиной 2 м, заполнена цеолитами CaA, температура 60 °C, расход газа-носителя – 30 мл/мин. Вторая колонка – длиной 1,5 м,

Таблица 1 / Table 1

Физические свойства каменного угля / Physical properties of coal

Свойства / Properties	Значения / Values
Влажность, % / Moisture content, %	4,51
Истинная плотность, г/см^3 / True density, g/cm^3	1,37
Зольность, % / Ash, %	11,52
Выход летучих веществ, % / Volatile content, %	19,32

заполнена пористым сорбентом полисорб-1, температура 40 °С, поток газа-носителя – 50 мл/мин.

Результаты и обсуждение

Измеренные физические свойства (влажность, истинная плотность, зольность, выход летучих веществ) каменного угля представлены в таблице 1.

По результатам термических анализов каменного угля получено значение теплотворной способности образца: $Q_н^р$=15990±150 кДж/кг.

Методом дифференциальной термогравиметрии определены три характерных участка изменения массы образца с локальными минимумами. При температуре около 100 °С происходит потеря физической влаги материалом. В интервале температур от 400 до 800 °С наблюдается окисление угля. Участок кривых с температурой около 800 °С соответствует разложению карбоната кальция.

На основе данных термогравиметрического анализа было сделано заключение, что разрабатываемый газогенератор должен обеспечивать температуру процесса не менее 800 °С.

Данные термогравиметрического анализа показывают, что образец каменного угля имеет влажность ~4,3±0,1%; потеря массы образца составила ~83,2±0,2%. Полученные данные согласуются с результатами лабораторных испытаний каменного угля.

Исследование процесса газификации каменного угля проводили на установке периодического действия (рис. 1). Установка состоит из теплоизолированной цилиндрической шахты из нержавеющей стали (высота 350 мм, внутренний диаметр 118 мм), установленной на металлической подставке. Шахта закрыта металлической крышкой с отверстиями для

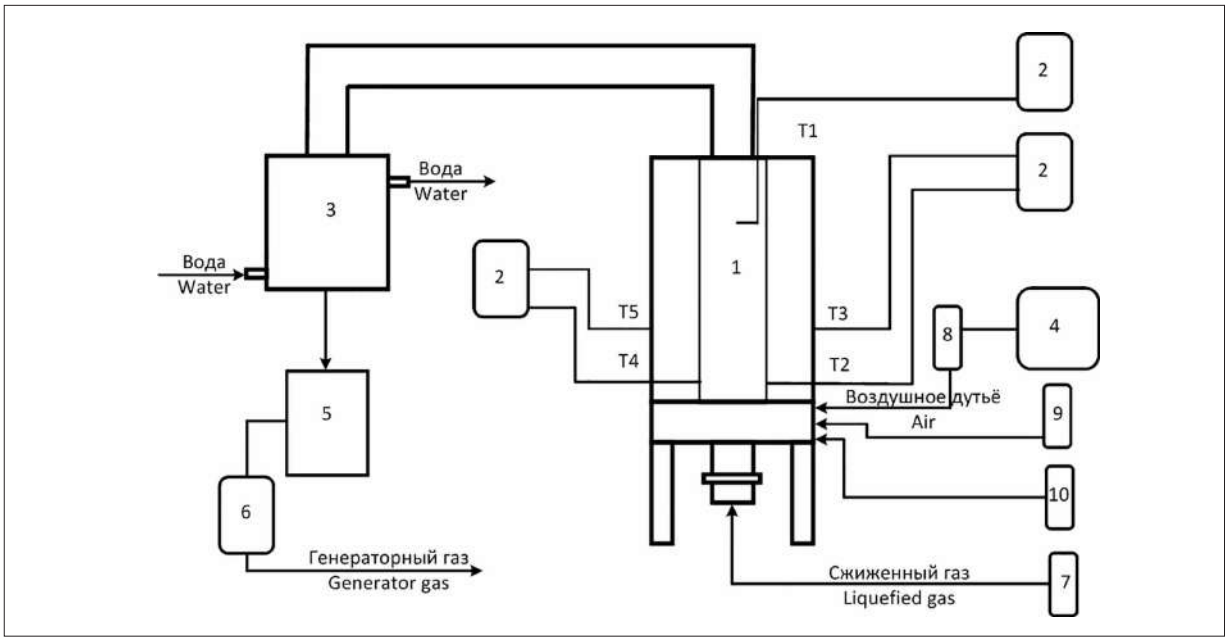

Рис. 1. Принципиальная схема установки газификации: 1 – реактор; 2 – двухканальный измеритель; 3 – охлаждаемый фильтр грубой очистки; 4 – воздуходувка с регулятором напряжения; 5 – щелочная очистка; 6 – дифференциальный манометр; 7 – цанговый баллон со сжиженным газом; 8 – калорифер; 9 – парогенератор; 10 – баллон CO_2; T1, T2, T4 – платина-платинородиевые термопары; T3, T5 – хромель-алюмелевые термопары / **Fig. 1.** Schematic diagram of a gasification installation: 1 – reactor; 2 – two–channel meter; 3 – cooled coarse filter; 4 – blower with voltage regulator; 5 – alkaline purification; 6 – differential pressure gauge; 7 – collet tank with liquefied gas; 8 – heater; 9 – steam generator; 10 – CO_2 cylinder; T1, T2, T4 – platinum-platinum-rhodium thermocouples; T3, T5 – chromel-alumel thermocouples

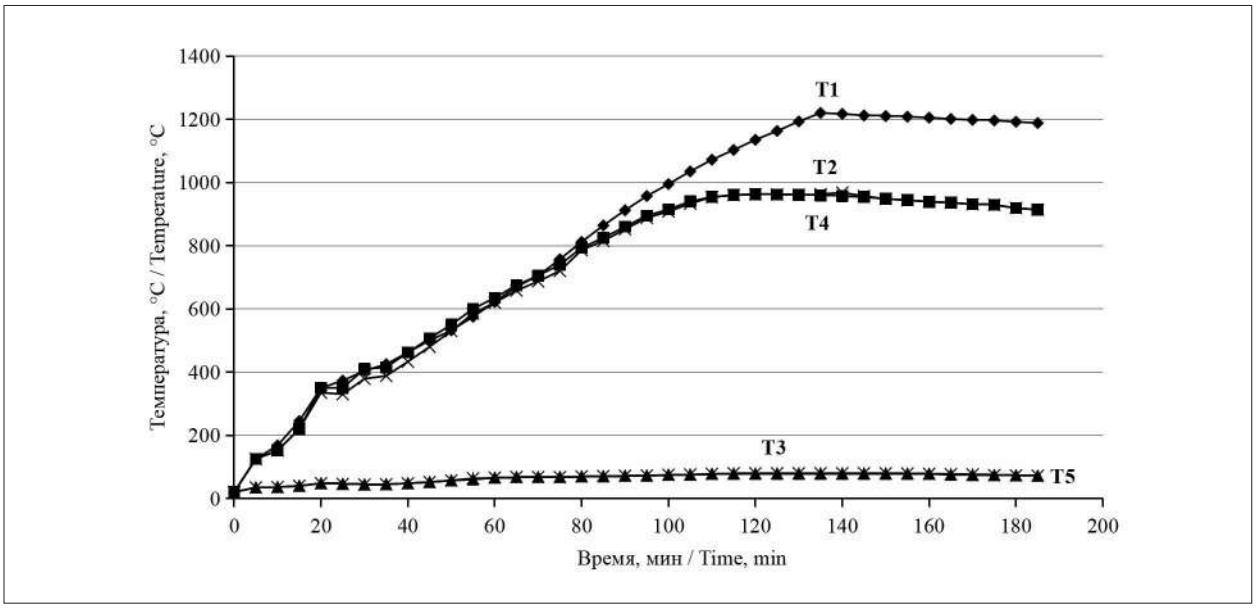

Рис. 2. Температура зон шахты газогенератора при газификации каменного угля на воздушном дутье (T1–T5 – температуры, измеренные термопарами, указанными на принципиальной схеме установки)
Fig. 2. Temperature of the gas generator shaft zones during air-blast coal gasification (T1–T5 – temperatures measured by thermocouples indicated on the schematic diagram of the installation)

загрузки твёрдого сырья и крепления термопары. Под шахтой установлен бункер, выполненный из нержавеющей стали и служащий для сбора золы и принудительной подачи воздуха для поддержания физико-химических процессов – воздушного дутья [18].

В нижней части цилиндрической шахты расположена колосниковая решётка (диаметр 118 мм, толщина 3,0 мм) из нержавеющей стали. Для измерения температур в шахте и теплоизоляции установлены платина-платинородиевые и хромель-алюмелевые термопары в изолирующих кожухах. В качестве теплоизоляционного материала для шахты газогенератора использовано керамическое огнеупорное волокно Cerablanket Maftec 1600.

Опыты по газификации проводили с использованием отсева каменного угля (1–2 мм) в режиме неподвижного слоя. Масса загрузки составляла 425 г, высота слоя загрузки – 5,5 см. В качестве газифицирующего агента использовали воздух, который перед подачей в газогенератор проходил через калорифер, где нагревался до температуры 120–125 °C. Расход воздуха составлял 3,5 л/мин.

В начале каждого опыта проводили частичный прогрев шахты и поджог шихты с помощью открытого пламени газовой горелки. По истечении 15 мин прогрева подача сжиженного газа прекращалась, и в шахту начинали подавать воздушное дутьё.

В качестве базового эксперимента был реализован процесс газификации с использованием предварительно нагретого воздушного дутья без каких-либо добавок. На рисунке 2 представлена зависимость изменения температур в различных зонах газогенератора при испытаниях установки на воздушном дутье.

Максимальная температура, достигнутая в реакторе, составила 1220 °C. После достижения максимальной температуры были взяты пробы отходящего газа для определения состава хроматографическим методом. Газ, полученный в результате воздушной газификации отсева каменного угля, имел следующий состав (%): N_2 – 63,2; O_2 – 6,3; CO – 18,4; H_2 – 8,5; CO_2 – 2,2; H_2O – 1,4. Газ такого состава имеет низшую теплоту сгорания $Q_н^р$=3,3 МДж/нм^3.

Эффективность термохимической переработки отсевов каменного угля в газообразное топливо оценивали по коэффициенту полезного действия (КПД) газификации, который определяется как доля теплоты сгорания газифицированного топлива, перешедшая в теплоту сгорания полученного газа:

$$\eta = \frac{G_Г \sum Q_i y_i}{Q_T} \cdot 100\% \qquad (1)$$

где $G_г$ – выход газа на 1 кг топлива, кг/кг; Q_i – теплота сгорания i-го горючего компонента газа, Дж/кг; y_i – массовая доля i-го горючего компонента; $Q_т$ – теплота сгорания топлива, Дж/кг.

Коэффициент полезного действиия воздушной газификации отсева каменного угля составил 47,2%.

Известно, что основными экзотермическими реакциями, протекающими в газогенераторе, являются следующие:

$C + O_2 = CO_2$ (2)

$C + 0{,}5O_2 = CO$ (3)

$CO + 0{,}5O_2 = CO_2$ (4)

Также имеют место эндотермические реакции:

$C + H_2O = CO + H_2$ (5)

$C + 2H_2O = CO_2 + H_2$ (6)

$CO_2 + H_2 = CO + H_2O$ (7)

При паровоздушной газификации получают развитие реакции (5) и (6), что должно приводить к повышению энергетического потенциала продуктов газификации.

Для определения влияния водяного пара на процесс газификации была проведена серия опытов на описанной выше лабораторной установке с подключением к ней парогенератора. Количество подаваемого пара регулировали изменением электрической мощности парогенератора. В ходе испытаний подача водяного пара в газогенератор составляла от 0,1 до 0,4 кг на 1 кг отсева каменного угля.

Пробы генераторного газа отбирали по той же методике, по которой производили отбор в базовом варианте, и определяли их состав на хроматографе. Результаты испытаний приведены на рисунке 3.

При изменении количества подаваемого водяного пара от 0,1 до 0,4 кг на 1 кг топлива содержание H_2O в генераторном газе увеличилось с 1,3 до 3,1%, доля O_2 оставалась практически на одном уровне – 6,2–6,1%, содержание N_2 сократилось с 61,9 до 61,1%.

Проведённые испытания показывают, что паровоздушная газификация позволяет достичь более высокого выхода оксида углерода по сравнению с базовым вариантом – воздушной газификацией – при незначительном снижении выхода водорода. Суммарным эффектом обеих тенденций является увеличение теплоты сгорания генераторного газа $Q^p_н$ до 3,6 МДж/нм^3 и увеличение КПД газификации до 52,6%. Такие показатели были достигнуты при подаче водяного пара в количестве 0,2 кг на 1 кг отсева каменного угля. При дальнейшем увеличении подачи пара наблюдалось снижение эффективности процесса газификации.

В следующей серии опытов в качестве газифицирующего агента применяли смесь подогретого воздуха и диоксида углерода. Объём подаваемого в газогенератор диоксида углерода составлял от 5 до 20% объёма воздуха при нормальных условиях. Диоксид углерода подавался из газового баллона через редуктор, и его расход контролировался по расходомеру. Также, как и в предыдущей серии опытов, осуществлялся отбор проб генераторного газа с последующим анализом хроматографическим методом. Результаты, полученные в этой серии опытов, приведены на рисунке 4.

При изменении доли CO_2 в смеси с подогретым воздухом с 5 до 20% содержание H_2O в генераторном газе увеличилось с 1,3 до 3,5%,

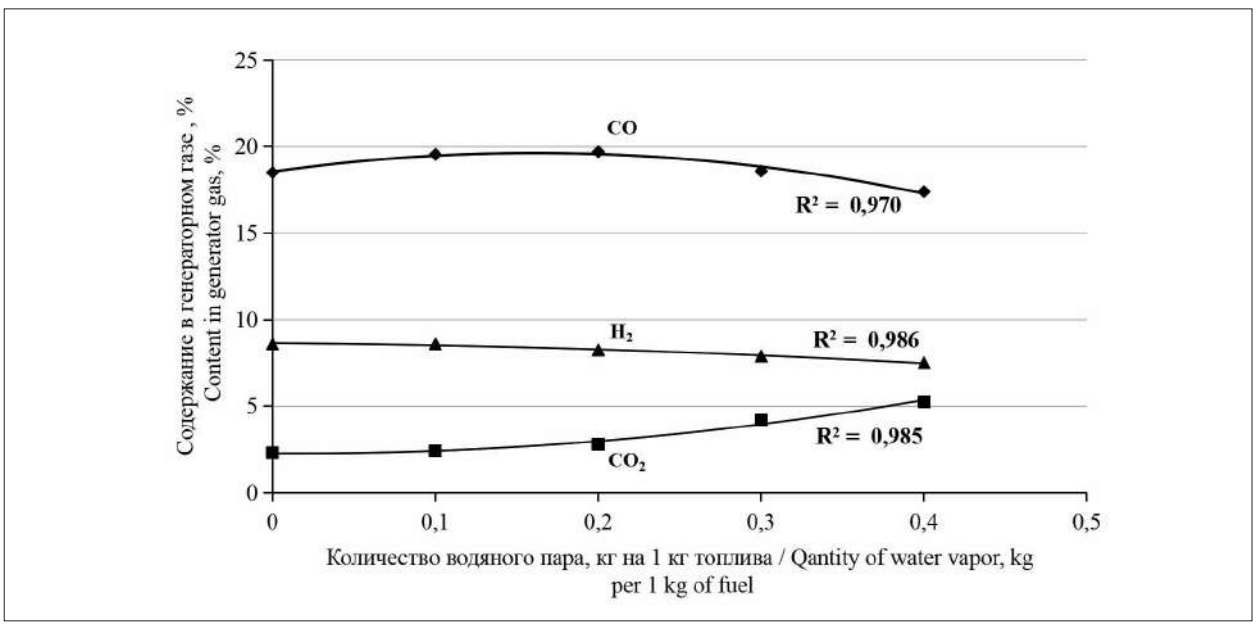

Рис. 3. Изменение состава газа при паровоздушной газификации отсева каменного угля
Fig. 3. Gas content at steam-air gasification of hard coal screenings

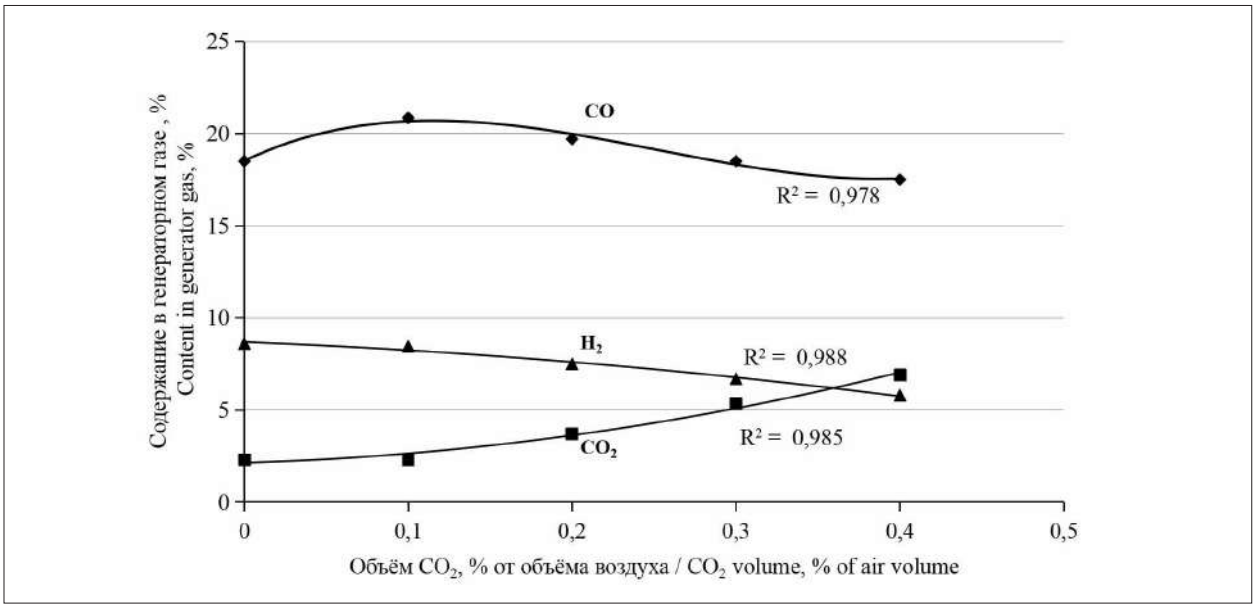

Рис. 4. Изменение состава газа при газификации отсева каменного угля смесью воздуха и диоксида углерода
Fig. 4. Gas content during gasification of hard coal screenings with a mixture of air and carbon dioxide

доля N_2 снизилась с 61,3 до 60,3%, а O_2 – с 6,1 до 6,0%.

Изменение состава генераторного газа в этой серии опытов имеет значительное сходство с данными, полученными при паровоздушной газификации. Применение смеси воздуха и диоксида углерода в качестве газифицирующего агента позволило повысить теплоту сгорания генераторного газа до 3,6 МДж/нм^3 и КПД газификации до 54%. Наиболее высокая эффективность процесса достигнута при добавлении к воздуху 5% об. диоксида углерода.

Данные по составу и теплотворной способности синтез-газа, вырабатываемого при разном составе газифицирующего агента, показывают, что при газификации отсева каменного угля имеется возможность достаточно гибко использовать данную технологию в зависимости от поставленной задачи. Введение в состав газифицирующего агента водяного пара или диоксида углерода обеспечивает по сравнению с воздушной газификацией более высокую эффективность процесса, снижение выбросов и повышение гибкости в использовании топлива. Диоксид углерода, как добавка к воздуху при газификации, в некоторых случаях может быть получен из промышленных выбросов или других источников отходов. Это позволяет снизить использование природных ресурсов, использовать CO_2 в цикле их переработки и сократить выбросы парниковых газов.

По результатам проведённых испытаний в работе газогенератора были отмечены некоторые недостатки, связанные с конструкцией его элементов.

Остаток на колосниковой решётке во всех опытах представлял собой углезольную смесь, материал в различных зонах решётки был озолён неоднородно. На некоторых участках было отмечено спекание озолённого материала, что, по-видимому, было вызвано наличием легкоплавких соединений в составе золы каменного угля. Также было отмечено, что под действием подаваемого воздуха происходило перемещение угольной засыпки по колосниковой решётке, в результате чего наблюдалась неравномерность слоя угля. Это могло приводить к нарушению равномерного распределения воздуха по колосниковой решётке и по слою углеродного материала. Некоторое изменение системы подачи воздуха позволит улучшить его распределение по колосниковой решётке, что, в свою очередь, даст возможность повысить эффективность процесса газификации угольных отсевов.

Заключение

Полученные в ходе экспериментов данные показали принципиальную возможность газификации мелких фракций каменного угля в газогенераторе с неподвижным слоем.

Определены основные параметры рабочих режимов газогенератора. Показано, что наи-

большая эффективность газогенерации достигается в режиме паровоздушной газификации при добавке водяного пара в количестве 0,1 кг на 1 кг угля и при использовании в качестве газифицирующего агента воздуха с добавлением диоксида углерода в соотношении объёмов 100:5. В ходе газификации получен синтез-газ с теплотворной способностью 3,5–3,6 кДж/нм^3, при этом достигнут КПД газификации 52,6–54,0%. Уменьшение расхода водяного пара и диоксида углерода выше указанных величин снижает эффективность процесса газификации отсева каменного угля (1–2 мм) в газогенераторе с неподвижным слоем.

Намечены необходимые изменения в конструкции газогенератора для более равномерного распределения воздуха по колосниковой решётке.

References

1. Zhuikov A.V., Matiushenko A.I. Methods for producing and practical use of synthesis gas (review) // J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol. 2020. V. 13. No. 4. P. 383–405 (in Russian). doi: 10.17516/1999-494X-0232

2. Loginov D.A., Islamov S.R. Thermal processing of high-volatile coal // Coke and Chemistry. 2021. V. 64. No. 4. P. 148–152. doi: 10.3103/S1068364X21040050

3. Barbanel P.F., Kuznetsova A.P., Saltykova S.N. Advantages of gasification process as a way to solve the problem of waste accumulation // Researcher of the Year 2020: Sbornik statey III Mezhdunarodnogo nauchno-issledovatelskogo konkursa. Petrozavodsk: International Center for Scientific Partnership "New Science", 2020. P. 135–140 (in Russian).

4. Madadian E., Lefsrud M., Perez Lee C.A., Roy Y. Green energy production: the potential of using biomass gasification // Journal of Green Engineering. 2014. V. 4. P. 101–116. doi: 10.13052/jge1904-4720.421

5. Jager N., Conti R., Neumann J., Apfelbacher A., Daschner R., Binder S., Hornung A. Thermo-catalytic reforming of woody biomass // Energy Fuels. 2016. V. 30. No. 10. P. 7923-7929. doi: 10.1021/acs.energyfuels.6b00911

6. Gupta S., Gupta G.K., Mondal M.K. Slow pyrolysis of chemically treated walnut shell for valuable products: effect of process parameters and in-depth product analysis // Energy. 2019. V. 181. P. 665–676. doi: 10.1016/j.energy.2019.05.214

7. Cousins A., McCalden D.J., Hughes R.W., Lu D.Y., Anthony E.J. Entrained-flow gasifier fuel blending studies at pilot scale // The Canadian Journal of Chemical Engineering. 2008. V. 86. No. 3. P. 335–346. doi: 10.1002/cjce.20058

8. Datta S., Saxena V.K., Chavan P.D., Sahu G., Saha S., Dutta P., Sarkar P. Gasification of coal and press mud blends in fluidised bed gasifier // International Journal of Oil, Gas and Coal Technology. 2018. V. 19. No. 2. P. 248–262. doi: 10.1504/IJOGCT.2018.094556

9. Kopylov V.V. Gasification of condensed fuels: a retrospective review, current state of affairs and development prospects. Moskva: Infra-engineering, 2012. 505 p. (in Russian).

10. Kornev A.V., Spitsyn A.A., Korshunov G.I., Bazhenova V.A. Preventing dust explosions in coal mines: methods and current trends // Mining Inf. Anal. Bull. 2023. No. 3. P. 133–149 (in Russian). doi: 10.25018/0236_1493_2023_3_0_133

11. Rodionov V.A., Tursenev S.A., Skripnik I.L., Ksenofontov Yu.G. The results of the study of the kinetic parameters of spontaneous combustion of coal dust // Journal of Mining Institute. 2020. V. 246. P. 617–622 (in Russian). doi: 10.31897/PMI.2020.6.3

12. Chukaeva M.A., Matveeva V.A., Sverchkov I.P. Complex processing of high-carbon ash and slag wastes // Journal of Mining Institute. 2022. V. 253. P. 97–104 (in Russian). doi: 10.31897/PMI.2022.5

13. Raikova S.V., Gusev Yu.S., Mazilov S.I., Pozdnyakov M.V., Komleva N.E., Mikerov A.N. Effects of atmospheric air pollutants on human health (overview) // Theoretical and Applied Ecology. 2023. No. 4. P. 6–15 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2023-4-006-020

14. Nepsha F.S., Varnavskiy K.A., Voronin V.A., Zaslavskiy I.S., Liven A.S. Integration of renewable energy at coal mining enterprises: problems and prospects // Journal of Mining Institute. 2023. V. 261. P. 455–469 (in Russian).

15. Kondratev S.A., Khamzina T.A. Assessment of collecting activity of physically sorbed reagents on the example of easily floatable coking coal sludge // Journal of Mining Institute. 2022. V. 256. P. 549–559. doi: 10.31897/PMI.2022.52

16. Reshetnyak V.N., Zakrutkin V.E., Gibkov E.V. Integral assessment of river sediments technogenic contamination within Eastern Donbass coal-mining area // Theoretical and Applied Ecology. 2022. No. 4. P. 80–87 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-4-080-087

17. Umar H.A., Sulaiman S.A., Said M.A., Gungor A., Ahmad R.K., Inayat M. Syngas production from gasification and co-gasification of oil palm trunk and frond using a down-draft gasifier // Int. J. Energy Res. 2021. V. 45. P. 8103–8115. doi: 10.1002/er.6345

18. Saltykova S.N., Karapetyan K.G., Kozlov R.V., Nazarenko M.Yu., Korshunov A.D. Method for gasification of carbon-containing solid fuel // Patent RU 2821504 C1. Application: 2024104144/04, 19.02.2024. Date of publication: 25.06.2024. Bull. 18 (in Russian).