

О. А. Евтехова (✉), К. Т. Н. И. А. Прибытков, К. Т. Н. К. С. Шатохин

ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСЦ», Москва, Россия

УДК 662.765

ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЕРЕРАБОТКИ ОТХОДОВ УГЛЕБОГАТИТЕЛЬНЫХ ФАБРИК

Проанализированы химический состав и количество отходов углеобогачительных фабрик. Проведено изучение основных характеристик газифицирующего газа при различных условиях сжигания топлива. Дана оценка влияния содержания углерода в отходах на основные характеристики процесса газификации. Проведен анализ влияния различных свойств образующегося в результате газификации газа на теплотехнические показатели процесса его сжигания для нужд потребителя. Исследования проводились на основании программы расчета процесса горения топлива, газификации отходов и дожигания продуктов газификации. Исследования показали, что газификация — наиболее перспективный способ использования отходов углеобогачительных фабрик по сравнению со сжиганием. При выборе наиболее эффективного способа использования химической энергии углеродосодержащих отходов необходимо учитывать такие факторы, как: содержание углерода в отходах, температура подогрева воздуха горения, соотношение N_2 и O_2 в воздухе.

Ключевые слова: углеродосодержащие отходы, газификация углей, химическая энергия углеродосодержащих отходов.

Растущая экономика любой страны требует возрастающего количества энергии, в том числе и тепловой [1, 2]. Дефицит тепловой энергии главным образом может быть покрыт двумя путями: рациональным и эффективным использованием уже имеющихся запасов и разработкой альтернативных источников [3–16]. Одним из путей решения проблемы дефицита энергии является использование техногенных отходов как одного из видов вторичных энергетических ресурсов [5, 17]. В металлургическом комплексе страны к ним относятся теплота охлаждающей воды, теплота охлаждающегося металла, физическая теплота технологических газов и др. [15].

Несмотря на развитие ядерной энергетики и прогресс в использовании возобновляемых источников энергии, нефть, газ и уголь остаются доминирующими источниками энергии, питающими мировую экономику, на которые приходится более трех четвертей общего объема поставок энергии к 2035 г. (по сравнению с 85 % в 2015 г.) [4]. Россия занимает второе место по запасам угля в мире после США. На нее приходится около 18 % мировых запасов [14]. По состоянию на

01.01.2019 г. добычу угля в Российской Федерации осуществляли 166 угольных предприятий, в том числе 57 шахт и 109 разрезов [10]. Совокупная производственная мощность на конец октября 2019 г. по добыче угля составляет 359,1 млн т [11]. В России преимущественно добывают каменный уголь. Почти весь коксующийся уголь, добываемый в РФ, обогащается.

Согласно проекту программы развития угольной промышленности России, на период до 2035 г. планируется увеличение объемов угледобычи. Доля угля, подлежащего обогащению, также должна возрасти. Результатом работы предприятий углеобогащения будет образование более 240 млн т отходов обогащения [12]. Углеобогачительные предприятия страны располагаются в различных регионах, за свой период работы ими накоплено более 20 млрд т отходов углеобогащения [13]. Большая часть твердых отходов размещается в отвалах, остальные отходы — это мелкодисперсные шламы.

Отходы углеобогащения представлены обычно в виде кусков крупностью 8–80 мм [8]. Наибольшее количество углерода (10–30 %) содержится в отходах флотации [7]. Содержание углерода в отходах гравитационного обогащения класса 1–13 мм может достигать 15 %, а в отходах класса 13–150 мм — 4–7 % [5]. Анализ отходов углеобогачительных фабрик показал, что они содержат до 20 % углеродосодержащих веществ и могут представлять собой сырье, пригодное для использования с энергетической точки зрения [8].



О. А. Евтехова

E-mail: olechka-evtekhova@yandex.ru

Для более эффективного использования химической энергии отходов углеобогачительных фабрик их следует не сжигать, а газифицировать диоксидом углерода с получением горючих газов — оксида углерода и водорода [9, 13].

Оценка энергоэффективности использования углерода отходов углеобогачительных фабрик проводилась расчетами трех процессов: сжигания исходного топлива, газификации углеводородсодержащих отходов и дожигания образовавшегося в результате газификации газа. При этом переменными влияющими факторами являлись: содержание углерода в отходах, температура подогрева воздуха горения, степень обогащения

воздуха горения кислородом. Указанные факторы изменялись в следующих пределах:

- содержание углерода в отходах от 5 до 20 %;
- температура подогрева воздуха горения от 20 до 500 °С;
- соотношение $N_2 : O_2 = 3,762, 3, 2,3, 1,86$.

Кроме того, дополнительно рассчитывали химический состав продуктов сгорания топлива, энтальпию продуктов сгорания, calorиметрическую температуру горения топлива, низшую рабочую теплоту сгорания топлива, объем газа, получаемого при газификации единицы сырья. Также были получены химический состав газа после газификации, объем этого газа, энтальпия газа.

Учитывая низкое содержание углерода в отходах и, следовательно, низкий потенциал отходов с точки зрения теплового эффекта реакции горения углерода (в отличие от газификации), была принята следующая схема газификации отходов — теплота в зоне газификации генерировалась за счет сжигания дополнительного топлива в отдельной зоне. Носителями этой теплоты выступали высокотемпературные продукты сгорания CO_2, H_2O, N_2 .

В качестве газифицирующих газов были выбраны продукты сгорания двух газообразных топлив: естественного топлива — природного газа Саратовского месторождения и искусственного — доменного газа. В природном газе основным горючим компонентом является метан CH_4 и небольшое содержание углеводородов. В доменном газе, наоборот, углеводородов содержится минимальное количество, а основным источником газифицирующего агента является CO и небольшое количество водорода.

Процесс газификации отходов углеобогачительных фабрик определяется в первую очередь температурой газифицирующих агентов [18, 19]. На рис. 1 показана зависимость calorиметрической температуры продуктов сгорания двух топлив от степени обогащения воздуха, идущего на горение топлив, кислородом и температуры подогрева этого воздуха.

Доменный газ даже при большой степени обогащения и высокой температуре подогрева воздуха не обеспечивает высокий температурный уровень газификации.

На рис. 2 показаны результаты расчета необходимого количества отдельных составляющих в газифицирующем газе для газификации 1 кг отходов углеобогачительных фабрик в зависимости от содержания углерода в этих отходах.

С увеличением содержания углерода количество газифицирующих агентов, требуемое для полной газификации 1 кг сырья, возрастает практически по линейному закону. Результатом процесса газификации отходов углеобогачительных фабрик являются газы, содержащие горючие компоненты CO_2 и H_2 . Количество образующихся горючих CO_2 и H_2 в расчете на 1 кг исходного сырья при различной концентрации углерода в нем показано на рис. 3.

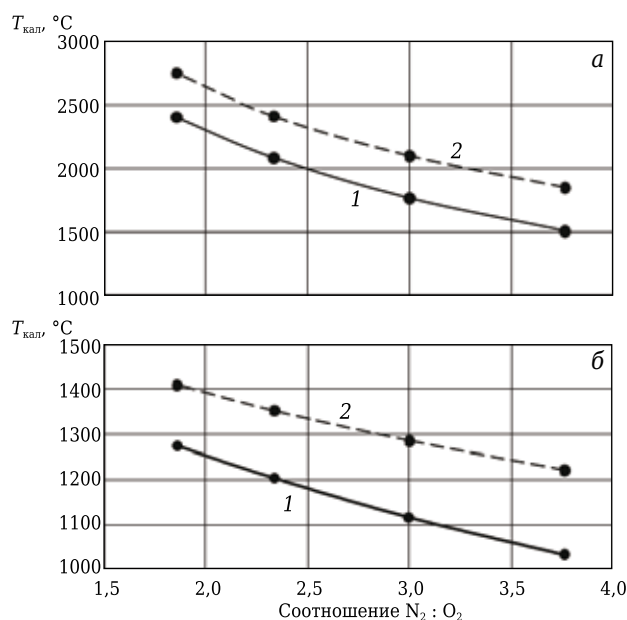


Рис. 1. Изменение calorиметрической температуры горения природного газа (а) и доменного газа (б) в зависимости от степени обогащения воздуха кислородом при подогреве воздуха до 500 °С (1) и без подогрева (2)

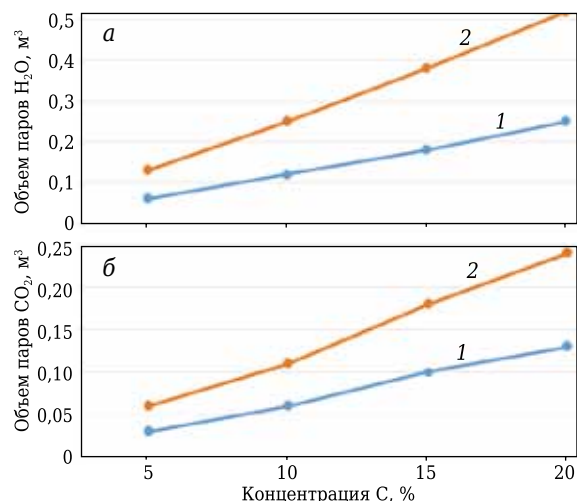


Рис. 2. Изменение объема паров воды (а) и углекислого газа (б) в зависимости от концентрации углерода в сырье: 1 — природный газ; 2 — доменный газ

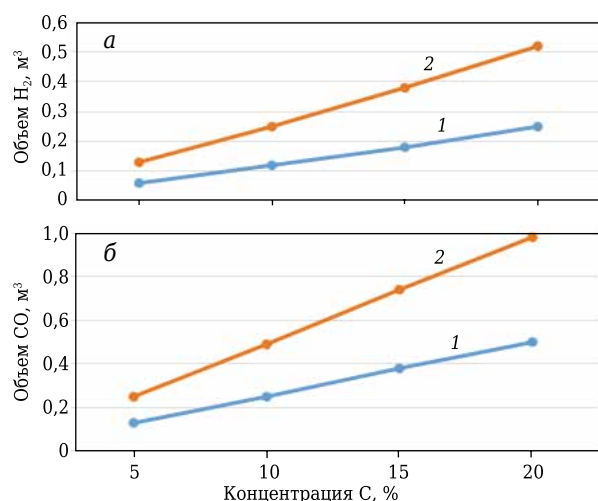


Рис. 3. Изменение объема водорода (а) и углекислого газа (б) в зависимости от концентрации углерода в сырье: 1 — природный газ; 2 — доменный газ

Как было отмечено ранее, реакции, протекающие при газификации, являются эндотермическими, что оказывает существенное влияние на температуру газовых составляющих и твёрдого остатка. На рис. 4, а показана зависимость температуры газов по окончании газификации отходов углеобогащительных фабрик при различном содержании углерода в исходном сырье при использовании двух видов топлива.

Следует отметить, что общий уровень температуры газов существенно ниже calorиметрической температуры горения природного и доменного газов. Изменение степени обогащения воздуха горения кислородом в пределах $N_2 : O_2 = 3,762, 3, 2,3, 1,86$ не приводит к существенному повышению температуры образующихся в процессе газификации газов (рис. 4, б).

Объяснением этого может служить более сильная роль твёрдого остатка с точки зрения теплового баланса процесса газификации по сравнению с эффектом сокращения количества азота как балластного газа при обогащении воздуха кислородом.

На рис. 5 показаны результаты расчета энтальпии газов, образующихся в результате протекания двух процессов: 1 — сжигание отходов углеобогащительных фабрик как низкосортного топлива; 2 — сжигание как топлива газов, образующихся в результате газификации отходов.

Газификация отходов является более энергоэффективным процессом с точки зрения их утилизации. Кроме того, использование отходов как топлива (без газификации) требует дополнительных операций, а именно размельчения до пылевидного состояния, смешения пылевидного топлива с воздухом, обеспечения больших величин коэффициента избытка воздуха и др. Использование отходов углеобогащительных фабрик путем их газификации является более перспективным по сравнению с их сжиганием.

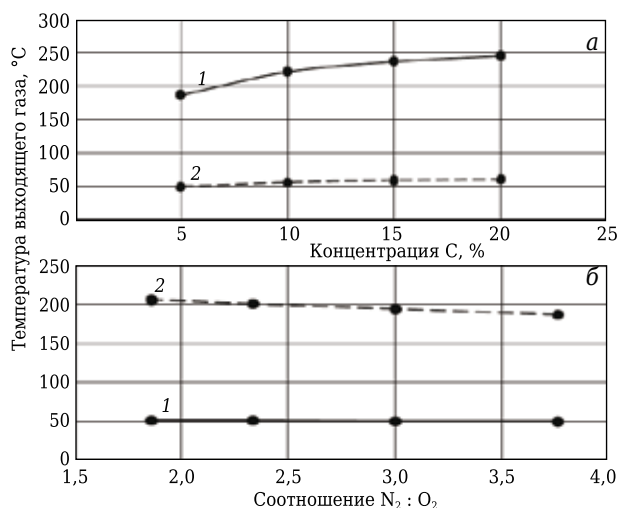


Рис. 4. Изменение температуры выходящего после газификации газа в зависимости от концентрации углерода в сырье (а) и степени обогащения топлива кислородом (б): 1 — природный газ; 2 — доменный газ

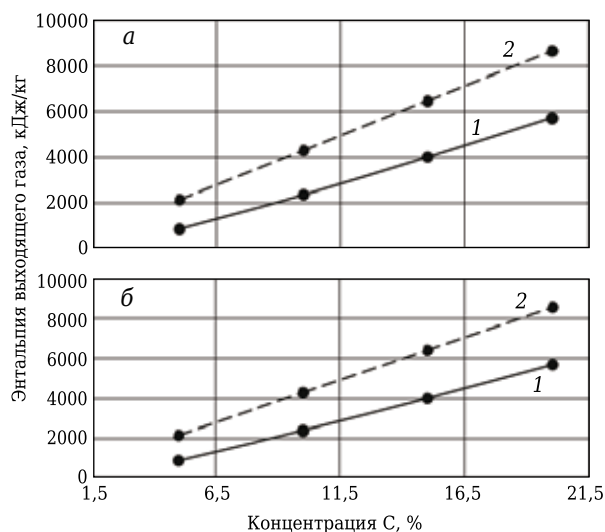


Рис. 5. Изменение энтальпии выходящего газа после сжигания сырья (1) и после дожига газа, полученного после газификации (2), в зависимости от концентрации углерода в сырье: а — природный газ; б — доменный газ

брик путем их газификации является более перспективным по сравнению с их сжиганием.

Библиографический список

1. Аналитический центр при Правительстве Российской Федерации. ТЭК России, Москва, 2015. — С. 1–64.
2. https://www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_shablon.php?id=3932; Ростепло, Газификация угля: возврат в прошлое или шаг в будущее?
3. <https://www.imemo.ru/files/File/ru/conf/2019/21012019/21012019-Prezent-01.pdf>; ИМЭМОРАН, World Economic Situation and Prospects 2019.
4. <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/energy-outlook/>

bp-energy-outlook-2017.pdf; BP Global. «BP Energy Outlook» 2017.

5. <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2019-full-report.pdf>; BP Statistical Review of World Energy, 2019.

6. **Панова, В. Ф.** Отходы углеобогащения как сырье для получения строительных материалов / В. Ф. Панова, С. А. Панов // Вестник СибГИУ. — 2015. — № 2 (12). — С. 71–75.

7. **Панова, В. Ф.** Техногенные продукты как сырье для стройиндустрии / В. Ф. Панова. — Новокузнецк : СибГИУ, 2009. — 244 с.

8. **Дворкин, О. Л.** Строительные материалы из отходов промышленности : учебно-справочное пособие / О. Л. Дворкин, Л. И. Дворкин. — Ростов на Дону : Феникс, 2007. — 368 с.

9. **Панишев, Н. В.** Перспективы утилизации хвостов углеобогащения и твердых отходов тепловых электростанций / Н. В. Панишев, В. А. Бигеев, Е. С. Галулина // Теория и технология металлургического производства. — 2015. — № 2 (17). — С. 69–77.

10. <https://minenergo.gov.ru/node/433>; Министерство энергетики РФ. Об отрасли. Основные показатели.

11. <https://minenergo.gov.ru/activity/statistic> ; Министерство энергетики РФ. Статистика.

12. <http://butane.chem.uiuc.edu/pshapley/environmental/15/1.html>; University of Illinois at Urbana-Champaign, Coal Gasification.

13. https://www.usea.org/sites/default/files/102013_Challenges%20and%20opportunities%20for%20coal%20gasification%20in%20developing%20countries_ccc225.pdf ; IEA Clean Coal Centre, Challenges And Opportunities For Coal Gasification In Developing Countries, CCC/225, 2013.

14. <https://oilprice.com/Energy/Coal/Carbon-Hysteria-And-The-Benefits-Of-Coal-Gasification.html>; oilprice, Carbon Hysteria and The Benefits of Coal Gasification.

15. **Gregurek, Dean.** The Minerals, Metallurgy: Energy and Environmental Issues, Metals & Materials Society / Dean Gregurek, Zhiwei Peng, Phillip J. Mackey and Christine Wenzl.

16. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK44142/> ; The National Center for Biotechnology Information, Carbon Management: Implications for R&D in the Chemical Sciences and Technology : A Workshop Report to the Chemical Sciences Roundtable.

17. <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/carbon-based-fuel>; Sciencedirect, Carbon-Based Fuel.

18. **Гафуров, Н. М.** Современные методы газификации угля / Н. М. Гафуров, Р. Ф. Хисматуллин // Международный научный журнал «Инновационная Наука». — 2016. — № 5. — С. 60, 61.

19. **Пряткина, В. С.** Газификация угля и ее применение в энергетике / В. С. Пряткина, А. А. Белов, В. В. Иванов [и др.] // Изв. вузов. Северо-Кавказский регион. — 2018. — № 3. — С. 42–47.

20. <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-coal-gasification>; energy.gov, Hydrogen Production: Coal Gasification. ■

Получено 27.12.19

© О. А. Евтехова, И. А. Прибытков,
К. С. Шатохин, 2020 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ



Открыт прием заявок для участия в отборе программы «УМНИК» (Фонда содействия инновациям) на площадке НИТУ «МИСиС». Станьте победителем и получите 500 тысяч рублей в течение 2-х лет на развитие своей идеи. (Участник может стать победителем программы «УМНИК» только один раз вне зависимости от места выступления и конкретного проекта). К участию в отборе программы «УМНИК» до-

пускаются граждане Российской Федерации возрастом от 18 до 30 лет включительно, у которых имеется в разработке собственный научно-инновационный проект.

Заявку на участие в конкурсе можно оставить на сайте <https://umnik.fasie.ru/> до 25.10.2020.

Куратор программы «УМНИК» в НИТУ «МИСиС»
Емелина Надежда Борисовна
Тел. +7 (926) 569-31-35
e-mail: nadyafx@mail.ru