

УДК 62.93

DOI: 10.24160/1993-6982-2019-6-50-57

Моделирование работы двигателя внутреннего сгорания на конвертерном газе

В.Я. Губарев, А.Ю. Спасибин

Впервые рассмотрена возможность утилизации конвертерного газа ПАО «НЛМК» в газопоршневых агрегатах.

Представлена существующая схема работы газоотводящего тракта конвертеров, и описан вариант модернизации газоотводящего тракта для сбора и очистки газа. Дан расчет работы двигателя внутреннего сгорания при работе на природном газе на номинальной нагрузке. Смоделирована работа двигателя на конвертерном газе, указаны сравнительные характеристики работы двигателя с колебаниями состава конвертерного газа.

Результаты моделирования показали, что состав газа существенно влияет на работу ДВС. Снижаются основные показатели работы, что указывает на необходимость внесения изменений в конструкцию двигателя. Моделирование колебаний состава конвертерного газа подтвердило, что на стационарном режиме работы наибольшее влияние на мощность двигателя оказывает оксид углерода, при этом увеличение доли водорода в смеси приводит к падению мощности. Сделан вывод о возможности утилизации химического потенциала конвертерного газа на газопоршневом агрегате применительно к конвертерному цеху ПАО «НЛМК».

Ключевые слова: конвертерный газ, двигатель, альтернативное топливо, утилизация, мощность.

Для цитирования: Губарев В.Я., Спасибин А.Ю. Моделирование работы двигателя внутреннего сгорания на конвертерном газе // Вестник МЭИ. 2019. № 6. С. 50—57. DOI: 10.24160/1993-6982-2019-6-50-57.

Simulating the Operation of an Internal Combustion Engine on Converter Waste Gas

V.Ya. Gubarev, A.Yu. Spasibin

The possibility of utilizing converter waste gas from the Novolipetsk Metallurgical Combine (NLMC) PJSC in gas-piston units is considered for the first time.

The existing process flow diagram illustrating operation of the gas exhaust duct of the converters is presented, and a version of modernizing the gas exhaust duct for collecting and purifying the gas is described. The operation of the internal combustion engine on natural gas at the nominal load is numerically analyzed. The operation of the engine on converter waste gas is simulated, and comparative characteristics of engine operation with fluctuations of the converter waste gas composition are presented.

The simulation results have shown that the composition of gas has a significant effect on the internal combustion engine operation. The main performance indicators are degraded, a circumstance that points to the need of making changes in the engine design. The results from simulating variations in the converter waste gas composition have shown that during steady-state operation, the content of carbon oxide has the strongest effect on the engine power output, and that increasing the fraction of hydrogen in the mixture entails a drop of power output. A conclusion has been drawn about the possibility of utilizing the converter waste gas chemical potential in a gas-piston unit as applied to the NLMC's converter department.

Key words: converter waste gas, engine, alternative fuel, utilization, power.

For citation: Gubarev V.Ya., Spasibin A.Yu. Simulating the Operation of an Internal Combustion Engine on Converter Waste Gas. Bulletin of MPEI. 2019;6:50—57. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2019-6-50-57.

Постановка проблемы

На сегодняшний день стратегической задачей любого промышленного предприятия является сокращение затрат на единицу продукции за счет внедрения экономически эффективных энергосберегающих технологий и повышения обеспеченности предприятия собственными энергоресурсами. Один из путей реализации данной стратегии — использование вторичных энергоресурсов (ВЭР), которые неизбежно возникают во многих энергоемких процессах. Черная металлургия — лидирующая отрасль промышленности по вовлечению вторичных энергоресурсов. Их суммарный выход в перерасчете на условное топливо составляет 30...50 млн т/год при максимально возможном показателе утилизации в 20 млн т [1].

На долю черной металлургии приходится от 40 до 80% горючих ВЭР, применяемых в промышленности [2]. Предприятия полного металлургического цикла на 60...70% покрывают свои потребности в топливе вторичными энергетическими ресурсами. Значительным резервом для энергосбережения в черной металлургии РФ считается использование газов сталеплавильных конвертеров, потенциал которого оценивается в размере 1,25 млн т.у.т. в год [3].

Один из крупнейших металлургических предприятий ПАО «НЛМК» обладает конвертерными цехами производительностью более 12 млн т стали в год [4]. Объем конвертерных газов оценивается в 600 млн нм^3 (из расчета 50 м^3 на 1 т выплавляемой стали) или 117 млн нм^3 в перерасчете на природный газ (при теплотворной способности последнего на уровне 40 МДж/ м^3).

Кислородно-конвертерный процесс представляет собой один из переделов жидкого чугуна в сталь без затраты топлива путем продувки чугуна в конвертере технически чистым кислородом [5]. Данный процесс протекает 15...25 мин, в зависимости от емкости агрегата и марки выплавляемой стали остальная часть цикла плавки занимает 20...30 мин. Во время продувки в конвертере образуется значительное количество отходящих газов, которые, покидая конвертер, захватывают и уносят мелкодисперсные частицы оксидов железа, образующиеся в результате испарения железа и не успевшие осесть в шлаке. Средняя загрязненность таких газов составляет 10...120 г/ м^3 [6].

Состояние вопроса

В настоящее время проведено большое количество научных исследований в области использования нетрадиционного топлива для двигателей внутреннего сгорания (ДВС), работающих как на газовом, так и на жидком топливе. Большинство публикаций посвящено переводу двигателя на водород или биотопливо [7 — 9]. Есть данные о работе двигателей для выработки электроэнергии на генераторном газе и высококалорийных газах металлургического производства [8, 10]. Все они показали возможность использования двига-

телей на альтернативном топливе с понижением мощности при соответствующей перенастройке. Также имеются сведения по работе ДВС на низкокалорийных газах металлургического производства, таких как конвертерный и доменный [10], однако конкретных расчетов и анализов работы двигателя найти не удалось. В публикации [11] рассмотрен анализ теплофизических свойств альтернативных топлив для ДВС, при этом взято газовое топливо с высоким содержанием метана. Моделирование процесса работы газопоршневой установки, использующей конвертерный газ вместо природного, позволит оценить возможность использования конвертерного газа в ДВС для производства электроэнергии на металлургическом предприятии.

В некоторых источниках рассмотрены различные варианты утилизации химического потенциала конвертерного газа, например в [12, 13] предложено использовать газ для предварительного нагрева металлолома. Металлолом во время плавки работает в качестве охладителя, и его предварительный подогрев приводит к увеличению доли лома и уменьшению чугуна. Данный вариант может быть неэффективен из-за установки подогревателя в непосредственной близости от конвертера и увеличения доли металлолома в шихте. Это ведет к увеличению продолжительности плавки вследствие необходимости введения дополнительной операции подогрева лома и удлинения операции заливки чугуна (чугун следует заливать медленно, чтобы не вызывать выбросов, возможных в результате взаимодействия углерода чугуна с жидкими оксидами железа, образовавшимися во время подогрева). В источнике [14] предполагается использовать конвертерный газ для обжига известняка, при этом потенциал химической энергии газа зависит от расхода извести. Стоит также отметить, что процесс обжига должен совпадать с циклом плавки, что влечет дополнительные трудности в наладке процесса. В работе [15] предложена схема утилизации газа в топках регенераторов (типа доменных воздухонагревателей). Такая схема позволяет избежать установки газгольдера и системы дополнительного охлаждения газа, поскольку предусматривает сжигание «неостывшего» газа, однако многие регенераторы работают на доменном газе, которого на металлургическом предприятии в избытке. В [16, 17] конвертерный газ, предварительно очищенный и охлажденный, подается в газгольдер, откуда далее поступает в газопровод для последующей утилизации на газопотребляющих агрегатах. Этот вариант является одним из наиболее перспективных с энергетической точки зрения, хотя и один из самых затратных. В качестве газопотребляющего оборудования станции предпочтительнее использовать газопоршневой агрегат, наиболее маневренный, с высоким КПД (современные газовые двигатели достигают электрического КПД более 44%), по сравнению с традиционной паротурбинной станцией.

Цель настоящего исследования — оценка возможности использования химической энергии конвертерного газа металлургического производства для выработки электроэнергии на газопотребляющих агрегатах (ГПА) и анализ параметров его работы.

ПАО «НЛМК» утилизирует только физическое тепло конвертерного газа в котле-утилизаторе, в то время как химический потенциал остается неиспользуемым. Общая схема газоотводящего тракта конвертера представлена на рис. 1.

Отходящий из конвертера 1 газ через подвижный колокол 2, служащий для предотвращения смешивания воздуха и отходящих газов, поступает в кессон 3. Охлаждаясь в котле-утилизаторе 4, конвертерный газ поступает в скруббер 5 и затем в квенчер 6 для очистки от конвертерной пыли. Далее в циклонах 7 под действием центробежных сил из потока газа выводится влага вместе со смоченными укрупнившимися частицами пыли, после чего с помощью дымососа 8 газ подается на свечу дожигания 9. Такая система газоочистки называется мокрой. Перед дымососом отходящие газы после очистки имеют температуру 50...60 °С и запыленность около 0,05 г/м³ газа [18].

Для использования конвертерного газа в качестве топлива в режиме без дожигания для ГПА необходима более глубокая очистка и газгольдер для выравнивания колебаний выхода газа и его состава. На рисунке 2 изображена схема модернизации работы газоотводящего тракта для использования химического потенциала газа на ГПА.

Для оценки состава конвертерного газа проанализированы продувки трех конвертеров конвертерного

цеха № 2 ПАО «НЛМК». Средний состав конвертерного газа представлен в табл. 1.

Оценка проведена, исходя из моделирования процесса сбора конвертерного газа в газгольдер с помощью трехходового клапана, прекращающего подачу газа в газгольдер при понижении содержания CO менее 35% или повышении O₂ более 2%.

Для исследования выбран газовый поршневой агрегат фирмы Caterpillar G 3600 TA.

Основные параметры работы газопоршневого агрегата Caterpillar G 3600 TA [19]

Мощность на маховике двигателя, кВт	206
Электрическая мощность, кВА/кВт	200/160
Номинальная скорость вращения, об/мин	1500
Тип	четырёхтактный
Количество цилиндров	6
Наддув	один с последующим охлаждением
Объем воздуха на образование смеси, нм ³ /ч	890
Расход топлива, нм ³ /ч	56,8

На первом этапе выполнен расчет ДВС на природном газе для определения основных параметров работы двигателя. Приняты следующие допущения:

- реальный процесс сгорания заменен идеальным (подводом теплоты по изохоре и изобаре);
- процессы сжатия и расширения происходят по политропам с постоянным показателем;
- работа процессов газообмена равна нулю, замыкание цикла осуществляется по изохоре в конце расширения.

Остальные параметры цикла (степень сжатия, коэффициент избытка воздуха, зависимость теплоемкост-

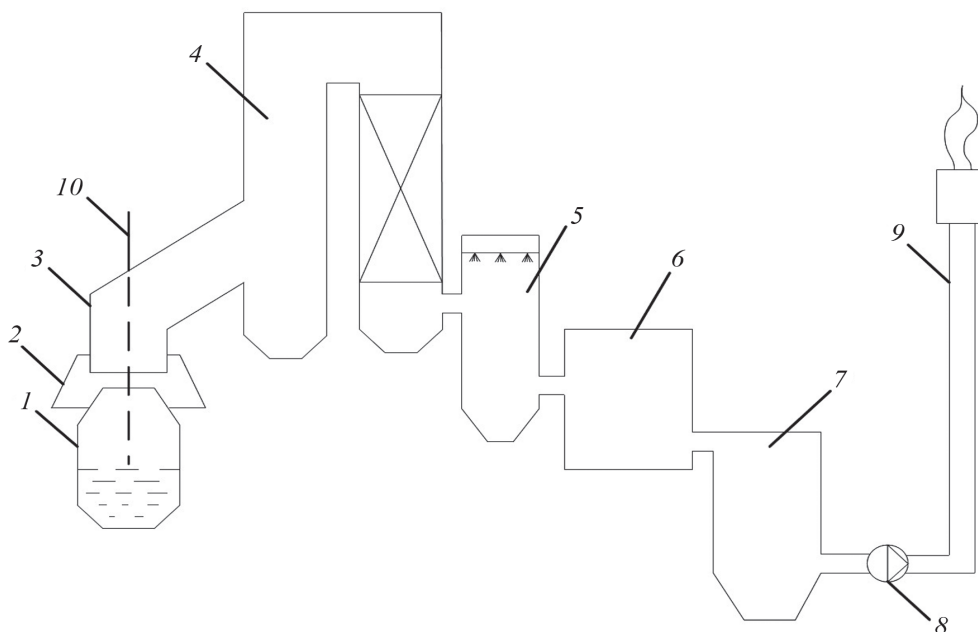


Рис. 1. Схема газоотводящего тракта

1 — конвертер; 2 — подвижный колокол; 3 — кессон; 4 — котел-утилизатор; 5 — скруббер; 6 — квенчер; 7 — циклоны; 8 — дымосос; 9 — свеча дожигания; 10 — водохлаждаемая фурма

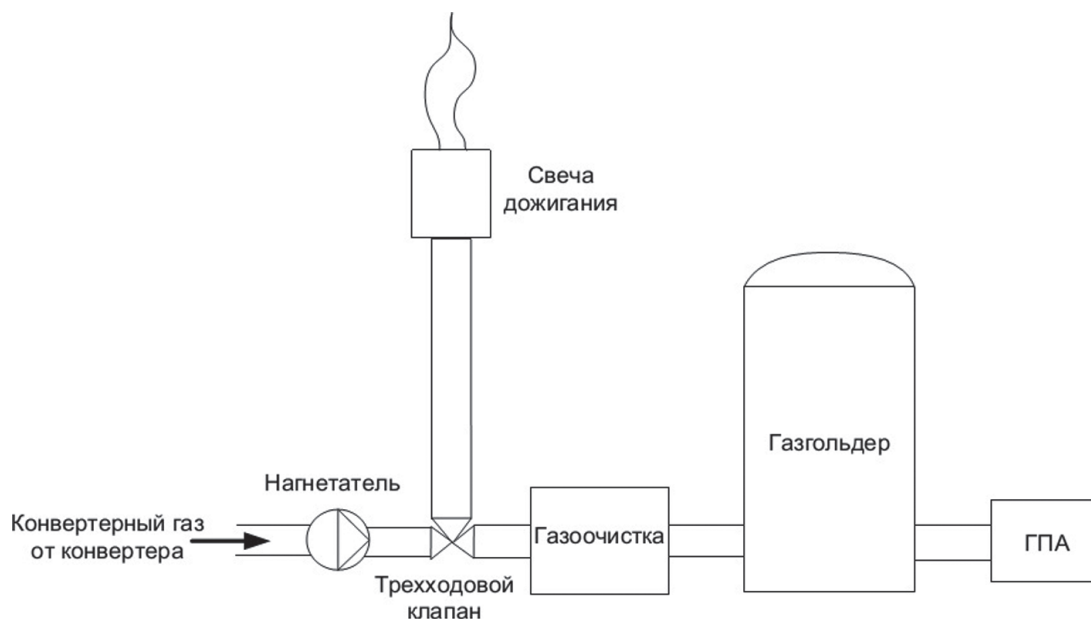


Рис. 2. Схема модернизации газоотводящего тракта

Таблица 1

Объемные доли компонентов конвертерного газа

Угарный газ CO	Водород H	Углекислый газ CO ₂	Азот N ₂	Аргон Ar	Кислород O ₂
52	1	20,5	26	0,5	0

Таблица 2

Объемные доли компонентов природного газа

Метан CH ₄	Этан C ₂ H ₆	Пропан C ₃ H ₈	Бутан C ₄ H ₁₀	Тяжелые углеводороды C ₅ H ₁₂	Углекислый газ CO ₂	Азот N ₂
98,9	0,29	0,16	0,05	—	0,4	0,2

ти рабочего тела от температуры и др.) соответствуют реальному циклу.

Тепловой расчет делали только для номинального режима работы двигателя при наивыгоднейших условиях протекания рабочего процесса, поэтому, при отсутствии оговорок, все численные значения параметров рабочего процесса относятся к номинальному режиму. Расчетный цикл ДВС состоит из пяти последовательно протекающих процессов: наполнения, сжатия, сгорания топлива, расширения и выпуска. Соответственно, в этом порядке и выполнялась основная часть теплового расчета [20, 21]. Необходимым дополнением к нему считается определение параметров рабочего тела в системе наддува и показателей агрегатов наддува.

Для расчета использован состав природного газа, приведенный в табл. 2 [22]

При расчете эффективного давления учитывали давление механических потерь и среднее эффективное давление P_3 :

$$P_m = a_m + b_m v_{п.ср};$$

$$P_3 = P_i - P_m,$$

a_m, b_m — экспериментальные величины; $a_m = 0,049$; $b_m = 0,0152$ [23]; $v_{п.ср}$ — скорость поршня, м/с.

Расхождение между расчетным (1171,5 кПа) и действительным (1129 кПа) значениями эффективного давления составила менее 4%.

Мощность двигателя определили по формуле:

$$N = \frac{V_h P_e i n}{30\tau},$$

где V_h — рабочий объем цилиндра, м³; i — количество цилиндров; n — номинальная частота вращения, об/мин; τ — тактность двигателя.

По аналогии выполнен перерасчет двигателя внутреннего сгорания при работе на конвертерном газе. При этом конструктивно двигатель не меняли, все параметры настройки работы агрегата остались прежними, включая коэффициент избытка воздуха. При расчете учитывали изменение соотношения топливо – воздух, а так же плотность смеси и показатель политропы.

При расчете системы наддува на конвертерном газе предполагалось, что газ будет охлаждаться до той же температуры, что и при работе на природном газе. Степень повышения давления наддува уменьшится на 3% при использовании конвертерного газа из-за более плотной смеси.

При переводе двигателя на конвертерный газ среднее индикаторное давление упало на 22% (рис. 3), а среднее эффективное давление на 26%. Мощность двигателя из-за менее калорийной смеси снизилась на 26% (рис. 4).

Расчетные данные показывают падение основных характеристик двигателя при переводе его на конвертерный газ, что вызвано менее калорийной смесью по сравнению с природным газом. Тем не менее, даже при переводе двигателя в режим работы на конвертерном газе можно прогнозировать его работу с потерей 1/3 мощности.

Проведенный анализ работы ДВС показал возможность эксплуатации его на конвертерном газе. Однако, из-за неравномерности состава конвертерного газа, была смоделирована смесь с колебаниями CO и H₂ (как горючих компонентов) и N₂ (как негорючего).

Зависимость мощности двигателя от колебания состава газа представлена на рис. 5.

Итоги анализа доказали, что в пределах колебания CO (48...56%) и H₂ (0...1,4%) наиболее чувствительное влияние оказывает оксид углерода. Увеличение доли водорода в смеси приводит к падению мощности ДВС. Колебания CO на 8% меняют мощность двигателя на 5%.

Выводы

Конвертерный газ обладает высоким потенциалом применения в качестве топлива в ДВС, но для этого необходима его стабилизация по составу и выходу. Решением является установка газгольдера, при этом для снижения запыленности дополнительно необходима газоочистка. При переводе двигателя внутреннего сгорания на конвертерный газ следует учитывать снижение эффективной мощности на 25...30%. Колебания состава газа незначительно влияют на основные показатели двигателя, однако повышение содержания водорода в газе приводит к падению его мощности. Двигатель способен утилизировать при 100% нагрузке не более 300 м³/ч конвертерного газа с выработкой электроэнергии порядка 119 кВт.

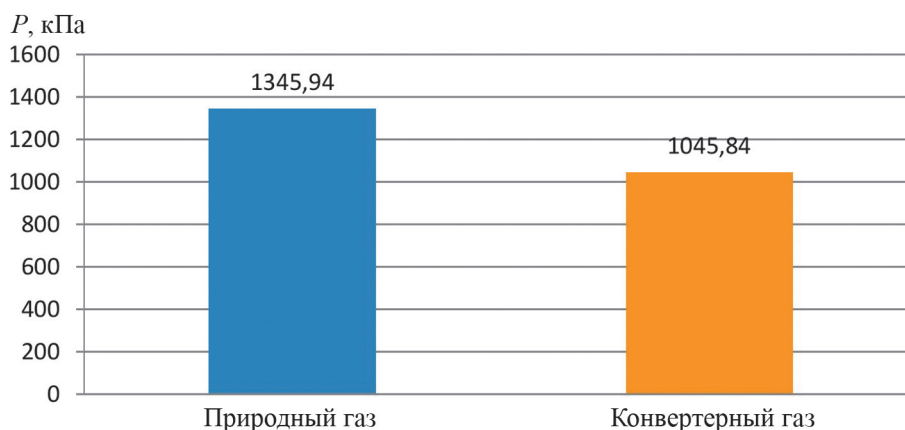


Рис. 3. Среднее индикаторное давление двигателя в зависимости от топлива

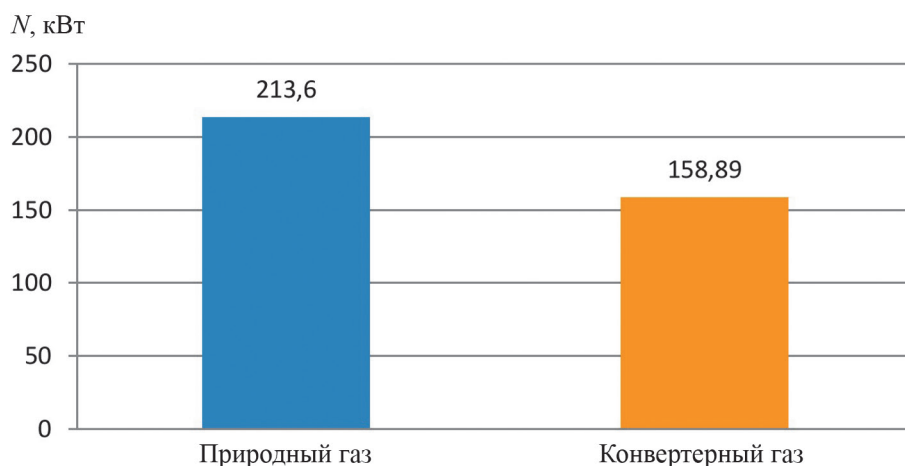


Рис. 4. Мощность двигателя в зависимости от топлива

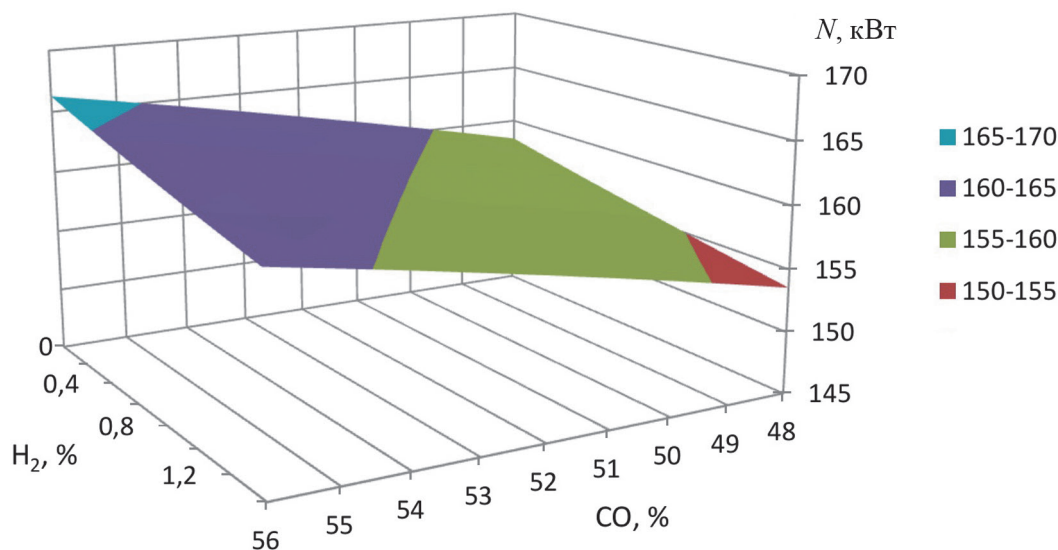


Рис. 5. Мощность двигателя в зависимости от колебания состава конвертерного газа

Для улучшения основных характеристик ДВС требуется дополнительная настройка и адаптация. Ввиду более низкой теплотворной способности газозооной смеси в камере сгорания приходится прокачивать больший объем газа в двигатель для достижения той же мощности, что, в свою очередь, требует адаптации турбокомпрессора. Поскольку конвертерный газ с высоким содержанием окиси углерода горит очень медленно, дополнительно необходима настройка системы сжигания топлива в двигателе (изменение формы поршней, степени сжа-

тия), которая позволит сделать процесс горения более эффективным и надежным.

С точки зрения конвертерного производства ПАО «НЛМК» установка газопоршневой станции (даже с более мощными агрегатами) нерентабельна за счет большого количества двигателей для утилизации всего потенциала конвертерного газа КЦ-2. Предпочтительнее совмещение ее с традиционной ТЭЦ (котел – турбина). С учетом бесперебойной работы двигателя на переменных нагрузках имеется потенциал уменьшения объема газольдера за счет частичного поглощения колебаний газа газопоршневой станцией.

Литература

References

1. Курзанов С.Ю. Повышение энергетической эффективности сталеплавильного производства на основе использования конвертерных газов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: Изд-во МЭИ, 2011.
2. Лотош В.Е. Утилизация вторичных энергетических ресурсов // Ресурсосберегающие технологии. 2003. № 9. С. 3—18.
3. Агапитов Е.Б., Максимов А.А. Разработка схемы комбинированного производства газообразного топлива на основе конвертерного газа с целью сбережения энергетических ресурсов металлургического производства // Вопросы технических наук: новые подходы в решении актуальных проблем: Сборник науч. трудов Междунар. науч.-практ. конф. Казань, 2014.
4. Группа НЛМК — повысить мощности КЦ-2 на 19% [Электрон. ресурс] www.nlmk.com/ru/media-center/news-groups/nlmk-group-to-boost-capacity-of-steelmaking-shop-2-at-lipetsk-site-by-19-/?from=en (дата обращения 18.04.2018).
5. Расщупкин В.П., Корытов М.С. Производство стали. Методика выплавки. Омск: СибАДИ, 2007.

1. Kurzanov S.Yu. Povyshenie Energeticheskoy Effektivnosti Staleplavil'nogo Proizvodstva na Osnove Ispol'zovaniya Konverternykh Gazov: Avtoref. Dis. ... Kand. Tekhn. Nauk. M.: Izd-vo MEI, 2011. (in Russian).
2. Lotosh V.E. Utilizatsiya Vtorichnykh Energeticheskikh Resursov. Resursosberegayushchie Tekhnologii. 2003;9:3—18. (in Russian).
3. Agapitov E.B., Maksimov A.A. Razrabotka Skhemy Kombinirovannogo Proizvodstva Gazoobraznogo Topлива na Osnove Konverternogo Gaza s Tsel'yu Sberezheniya Energeticheskikh Resursov Metallurgicheskogo Proizvodstva. Voprosy Tekhnicheskikh Nauk: Novye Podkhody V Reshenii Aktual'nykh Problem: Sbornik Nauch. Trudov Mezhdunar. Nauch.-prakt. Konf. Kazan', 2014. (in Russian).
4. Gruppya NLMK — Povyisit' Moshchnosti KTS-2 na 19% [Elektron. Resurs] www.nlmk.com/ru/media-center/news-groups/nlmk-group-to-boost-capacity-of-steelmaking-shop-2-at-lipetsk-site-by-19-/?from=en (Data Obrashcheniya 18.04.2018). (in Russian).
5. Rasshchupkin V.P., Korytov M.S. Proizvodstvo Stali. Metodika Vyplavki. Omsk: SibADI, 2007. (in Russian).

6. **Линчевский Б.В., Соболевский А.Л., Кальменев А.А.** *Металлургия черных металлов*. М.: Metallurgiya, 1986.

7. **Ларионов Л.Б., Буряев М.К.** Расчет процесса сгорания биогаза в газовом двигателе с искровым зажиганием, конвертированного из дизеля с наддувом // *Вестник СВФУ*. 2015. Т. 12. № 1. С. 52—58.

8. **Карташевич А.Н., Малышкин П.Ю., Плотников С.А., Зубакин А.С.** Исследования работы двигателя на альтернативных топливах // *Вестник Белорусской гос. сельскохозяйственной академии*. 2016. № 4. С. 115—117

9. **Левтеров А.М., Левтерова Л.И., Гладкова Н.Ю.** Использование альтернативных топлив в транспортных ДВС // *Автомобильный транспорт*. 2010. № 27. С. 61—64.

10. **Европейский** опыт утилизации сбросного энергopotentialsia промышленных газов [Электрон. ресурс] www.cogeneration.com.ua/ru/analytics/special-gas/hydrogen-utilization (дата обращения 21.06.2019).

11. **Мысник М.И., Свистула А.Е.** Анализ теплотехнических свойств альтернативных топлив для двигателей внутреннего сгорания // *Ползуновский вестник*. 2009. № 1—2. С. 37—43.

12. **Гичев Ю.А.** Проектно-конструкторские решения по использованию конвертерного газа для нагрева металлолома // *Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии*. 2013. № 5. С. 54—59.

13. **Куземко Р.Д., Сущенко А.В.** Улучшение теплового баланса конвертерной плавки за счет регенерации теплоты отходящих газов // *Вестник Приазовского гос. техн. ун-та. Серия «Технические науки»*. 1998. № 6. С. 62—69.

14. **Гичев Ю.А., Запотоцкая А.Ю.** Технические решения и эффективность использования конвертерного газа для обжига известняка // *Международные конференции: литье, металлургия. Запорожье: Запорожская торгово-промышленная палата*, 2015.

15. **Максимов А.А., Агапитов Е.Б.** Совершенствование энергоэффективной схемы утилизации конвертерного газа // *Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве: Сборник докл. IV Всерос. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых с междунар. участием*. Екатеринбург: Изд-во УрФУ, 2015. С. 101—105.

16. **Дремов А.Н., Гридин С.В.** Использование газов сталеплавильных конвертеров в качестве вторичных энергоресурсов // *Металлургия XXI столетия глазами молодых: Сборник докл. Всеукр. науч.-практ. конф. студентов*. Донецк: Изд-во ДонНТУ, 2013. С. 143—144.

17. **Сталинский Д.В. и др.** Пути повышения эффективного использования вторичных энергоресурсов (топливных газов) металлургического производства // *Экология и промышленность*. 2010. № 3. С. 71—75.

18. **Баптизмаиский В.И., Меджибожский М.Я., Охотский В.Б.** *Конвертерные процессы производства стали. Теория, технология, конструкции агрегатов*. Киев: Высшая школа, 1984.

6. **Linchevskiy B.V., Sobolevskiy A.L., Kal'menev A.A.** *Metallurgiya Chernykh Metallov*. M.: Metallurgiya, 1986. (in Russian).

7. **Larionov L.B., Buraev M.K.** Raschet Protsessa Sgoraniya Biogaza v Gazovom Dvigatеле s Iskrovym Zazhiganiem, Konvertirovannogo iz Dizelya s Nadduvom. *Vestnik SVFU*. 2015;12;1:52—58. (in Russian).

8. **Kartashevich A.N., Malyshekin P.Yu., Plotnikov S.A., Zubakin A.S.** Issledovaniya Raboty Dvigatelya na Alternativnykh Toplivakh. *Vestnik Belorusskoy Gos. Sel'skokhozyaystvennoy Akademii*. 2016;4:115—117 (in Russian).

9. **Levterov A.M., Levterova L.I., Gladkova N.Yu.** Ispol'zovanie Alternativnykh Topliv v Transportnykh DVS. *Avtomobil'nyy transport*. 2010;27:61—64. (in Russian).

10. **Evropeyskiy** Opyt Utilizatsii Sbrovnogo Energo-potentsiala Promyshlennykh Gazov [Elektron. Resurs] www.cogeneration.com.ua/ru/analytics/special-gas/hydrogen-utilization (Data Obrashcheniya 21.06.2019). (in Russian).

11. **Mysnik M.I., Svistula A.E.** Analiz Teplofizicheskikh Svoystv Alternativnykh Topliv Dlya Dvigatoley Vnutrennego Sgoraniya. *Polzunovskiy Vestnik*. 2009;1—2: 37—43. (in Russian).

12. **Gichev Yu.A.** Proektno-konstruktorskie Resheniya po Ispol'zovaniyu Konverternogo Gaza dlya Nagreva Metalloloma. *Sovremennaya Nauka: Issledovaniya, Idei, Rezul'taty, Tekhnologii*. 2013;5:54—59. (in Russian).

13. **Kuzemko R.D., Sushchenko A.V.** Uluchshenie Teplovogo Balansa Konverternoy Plavki za Schet Regeneratsii Teploty Otkhodyashchikh Gazov. *Vestnik Priazovskogo Gos. Tekhn. Un-ta. Seriya «Tekhnicheskie Nauki»*. 1998;6:62—69. (in Russian).

14. **Gichev Yu.A., Zapototskaya A.Yu.** Tekhnicheskie Resheniya i Effektivnost' Ispol'zovaniya Konverternogo Gaza dlya Obzhiga Izvestnyaka. *Mezhdunarodnye Konferentsii: Lit'e, Metallurgiya. Zaporozh'e: Zaporozhskaya Torgovo-promyshlennaya Palata*, 2015. (in Russian).

15. **Maksimov A.A., Agapitov E.B.** Sovershenstvovanie Energoeffektivnoy Skhemy Utilizatsii Konverternogo Gaza. *Teplotekhnika i Informatika v Obrazovanii, Nauke i Proizvodstve: Sbornik Dokl. IV Vseros. Nauch.-prakt. Konf. Studentov, Aspirantov i Molodykh Uchenykh s Mezhdunar. Uchastiem*. Ekaterinburg: Izd-vo UrFU, 2015:101—105. (in Russian).

16. **Dremov A.N., Gridin S.V.** Ispol'zovanie Gazov Staleplavil'nykh Konverterov v Kachestve Vtorichnykh Energoresursov. *Metallurgiya XXI Stoletiya Glazami Molodykh: Sbornik Dokl. Vseukr. Nauch.-prakt. Konf. Studentov*. Donetsk: Izd-vo DonNTU, 2013:143—144. (in Russian).

17. **Stalinskiy D.V. i dr.** Puti Povysheniya Effektivnogo Ispol'zovaniya Vtorichnykh Energoresursov (Toplivnykh Gazov) Metallurgicheskogo Proizvodstva. *Ekologiya i Promyshlennost'*. 2010;3:71—75. (in Russian).

18. **Baptizmaiskiy V.I., Medzhibozhskiy M.Ya., Okhotskiy V.B.** *Konverternye Protsessy Proizvodstva Stali. Teoriya, Tekhnologiya, Konstruktsii Agregatov*. Kiev: Vysshaya Shkola, 1984. (in Russian).

19. **Руководство** по ремонту двигателей Caterpillar [Электрон. ресурс] www.truckmanualshub.com/caterpillar-workshop-manuals-pdf (дата обращения 21.06.2019).

20. **Кулманаков С.П., Кулманаков С.С.** Тепловой расчет ДВС. Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2014.

21. **Шароглазов Б.А., Шишков В.В.** Поршневые двигатели: теория, моделирование и расчет процессов. Челябинск: Издат. центр ЮУрГУ, 2011.

22. **Ситтинг М.** Процессы окисления углеводородного сырья. М.: Химия, 1970.

23. **Калимуллин Р.Ф., Горбачев С.В., Филиппов А.А.** Тепловой расчет автомобильных газовых двигателей: методические указания к курсовому проектированию. Оренбург: Изд-во ГОУ ОГУ, 2007.

19. **Rukovodstvo** po Remontu Dvigatelye Caterpillar [Elektron. Resurs] <https://truckmanualshub.com/caterpillar-workshop-manuals-pdf> (Data Obrashcheniya 21.06.2019). (in Russian).

20. **Kulmanakov S.P., Kulmanakov S.S.** Teplovoy Raschet DVS. Barnaul: Izd-vo AltGTU, 2014. (in Russian).

21. **Sharoglazov B.A., Shishkov V.V.** Porshnevye Dvigateli: Teoriya, Modelirovanie i Raschet Protsessov. Chelyabinsk: Izdat. Tsentr YUUrGU, 2011. (in Russian).

22. **Sitting M.** Protsessy okisleniya uglevodorodnogo syr'ya. M.: Khimiya, 1970. (in Russian).

23. **Kalimullin R.F., Gorbachev S.V., Filippov A.A.** Teplovoy Raschet Avtomobil'nykh Gazovykh Dvigatelye: Metodicheskie Ukazaniya k Kursovomu Proektirovaniyu. Orenburg: Izd-vo GOU OGU, 2007. (in Russian).

Сведения об авторах:

Губарев Василий Яковлевич — кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедрой промышленной теплоэнергетики Липецкого государственного технического университета, Липецк, e-mail: gv_lipetsk@rambler.ru

Спасибин Антон Юрьевич — аспирант кафедры промышленной теплоэнергетики Липецкого государственного технического университета, Липецк, e-mail: isabi1@rambler.ru

Information about authors:

Gubarev Vasilii Ya. — Ph.D. (Techn.), Professor, Head of Industrial Heat Dept., Lipetsk State Technical University, Lipetsk, e-mail: gv_lipetsk@rambler.ru

Spasibin Anton Yu. — Ph.D.-student of Industrial Heat Dept., Lipetsk State Technical University, Lipetsk, e-mail: isabi1@rambler.ru

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interests: the authors declare no conflict of interest

Статья поступила в редакцию: 08.05.2019

The article received to the editor: 08.05.2019