

# ПО МАТЕРИАЛАМ 7-ГО ЕВРОПЕЙСКОГО КОНГРЕССА ПО АГЛОДОМЕННОМУ ПРОИЗВОДСТВУ

ISSN: 0368-0797. Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2017. Том 60. № 1. С. 80 – 85.  
© 2017. Курунов И.Ф.

УДК 669.1

## ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЭКСТРАКТИВНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ ЖЕЛЕЗА ГЛАЗАМИ ЕВРОПЕЙСКИХ МЕТАЛЛУРГОВ

Курунов И.Ф., д.т.н. профессор, главный доменщик (kurunov\_if@nlmk.ru)

ОАО «Новолипецкий металлургический комбинат»  
(398040, Россия, Липецк, пл. Металлургов, 2)

**Аннотация.** На состоявшемся 12 – 14 сентября 2016 г. в Линце 7-м Европейском конгрессе большое внимание было уделено перспективам развития металлургии железа. Схема доменная печь – кислородный конвертер по прогнозам остается основной технологией выплавки стали, уступая ведущую роль выплавке стали в электропечах, начиная с 60-х годов XXI века. Прогнозируется развитие водородной металлургии и появление промышленной технологии микробиологической ферментации металлургических газов с получением из них этанола и других химических продуктов.

**Ключевые слова:** доменная печь, кислородный конвертер, сталь, эмиссия CO<sub>2</sub>, электропечи, металлургические газы, губчатое железо, ферментация газа, этанол.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-1-80-85

12 – 14 сентября 2016 г. в Линце (Австрия) состоялся 7-й Европейский конгресс по аглодоменному производству, на котором в докладах на пленарном заседании и на секциях большое внимание было уделено эффективности работы современных доменных печей (ДП) и прогнозу развития сталеплавильного производства в ближайшие несколько десятков лет. Этот прогноз делается в свете соглашения о мерах по уменьшению изменения климата, подписанного на состоявшейся в 2015 г. Конференции ООН по изменению климата и возрастающих требований к металлургам по сокращению эмиссии парниковых газов с увеличением штрафных санкций.

За последние 250 лет расход энергии на выплавку чугуна в ДП сократился в 15 раз – с 300 до 20 ГДж/т, а в наиболее эффективно работающих печах этот расход составляет только 15 ГДж/т [1]. При этом вклад сталеплавильного производства в глобальную эмиссию CO<sub>2</sub>, образующегося из ископаемого углерода, составляет 7 %, из которых большинство приходится на производство чугуна в ДП [2]. По оценке германских экспертов, эффективность процесса во многих европейских ДП приблизилась к термодинамическому пределу [3, 4], что можно понимать как максимальное приближение к равновесному составу газа в реакции



определяющей необходимый расход восстановительного газа на восстановление железа. Разница в энергозатратах на выплавку чугуна (рис. 1) между эффективно работающей ДП и «идеальной» ДП, т. е. работающей без тепловых потерь и с достижением термодинами-

ческого равновесия в упомянутой реакции, составляет только 7 % [3].

В эффективно работающих ДП в пределах химически резервной зоны возможно достижение термодинамического равновесия в реакции восстановления вюстита. Данный факт был отмечен и ранее в работах специалистов школы профессора А. Риста [5]. В настоящее время практически во всех странах стабильную и эффективную, а значит и экономичную работу ДП доменщики обеспечивают, применяя кокс с высокой горячей прочностью (CSR не менее 65 %), высококачественные окатыши (прочность 200 – 250 кг/окатыш) и агломерат (LTB > 80 %). При таких материалах появляется реальная возможность создавать в печи физические условия для наиболее эффективного протекания тепло- и массообмена и, следовательно, достигать высокой эффек-

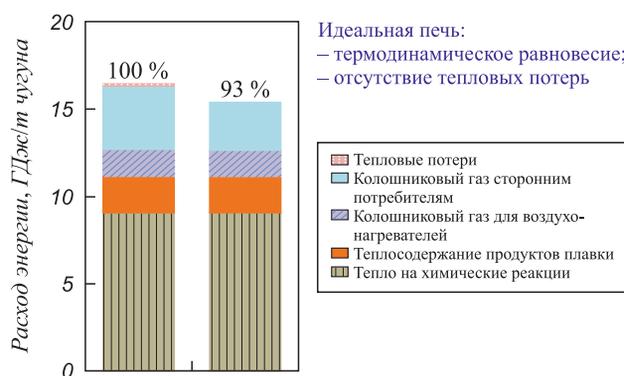


Рис. 1. Расход энергии на выплавку чугуна в доменной печи в реальных и идеальных условиях работы

Fig. 1. Energy consumption for cast iron smelting in blast furnace in actual and "ideal" operating conditions

тивности ее работы. Об этом свидетельствуют, в частности, показатели работы ДП ПАО «Новолипецкий металлургический комбинат» в широком диапазоне интенсивности плавки по кислороду, т. е. по количеству вдуваемого в печь с дутьем кислорода в единицу времени. Средняя степень приближения состава газа к равновесному в реакции (1) составляет в этих печах 97 – 98 % (рис. 2), достигая в отдельные месяцы 99 % и более [6].

Основное количество стали в мире (рис. 3) производится в кислородных конвертерах и эта ситуация, с учетом того, что более половины стали производится в Китае, сохранится в ближайшие десятилетия, а до-

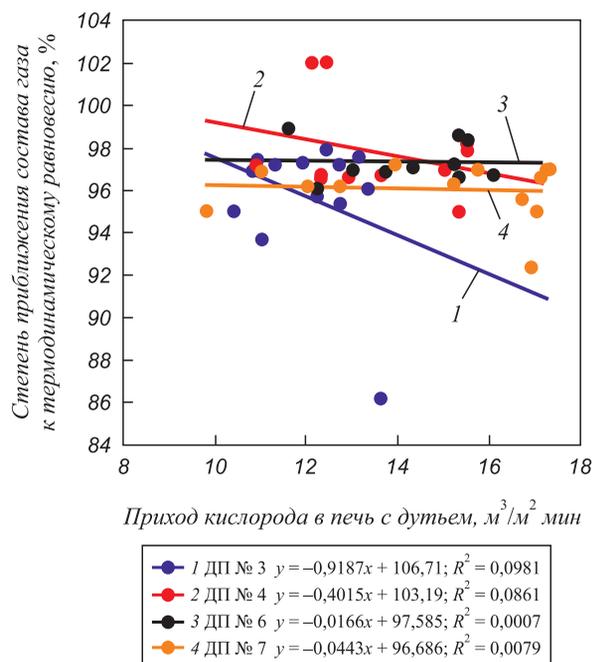


Рис. 2. Эффективность восстановления при различной интенсивности плавки

Fig. 2. Effectiveness of recovery at different smelting rate

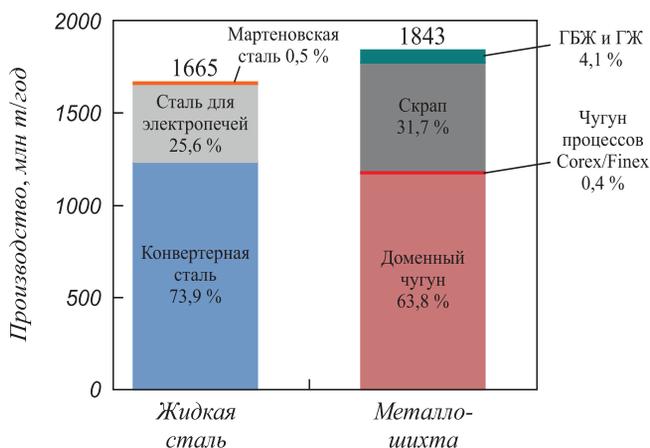


Рис. 3. Структура выплавляемой стали и металлошихты для ее выплавки

Fig. 3. Structure of smelted steel and metal charge for its smelting

менный чугун останется основным компонентом металлошихты для производства стали [3]. Но уже с середины XXI века прогнозируется увеличение доли электростали до 50 % и выше (рис. 4) и соответствующее уменьшение производства чугуна [7]. С учетом минимальных оставшихся резервов снижения энергозатрат на выплавку чугуна в ДП и, соответственно, минимальных возможностей снижения эмиссии CO<sub>2</sub> за счет этого, специалисты рассматривают и оценивают различные технологические схемы с участием существующих и перспективных новых технологий металлургии железа и утилизации углеродсодержащих вторичных энергоресурсов в доменном и сталеплавильном производствах.

Среди рассмотренных технологий доменной плавки (вдувание ПУТ, природного газа, водорода, загрузка горячбрикетированного железа (ГБЖ)) минимальные суммарные энергозатраты обеспечивает технология с вдуванием ПУТ, а минимальную суммарную эмиссию CO<sub>2</sub> – технология с вдуванием водорода (рис. 5), полу-

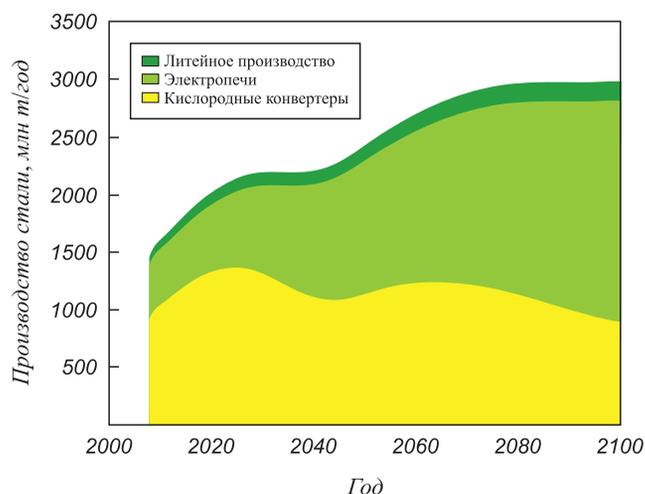


Рис. 4. Прогноз динамики структуры выплавляемой стали в мире

Fig. 4. Forecast of dynamics of smelted steel structure in the world

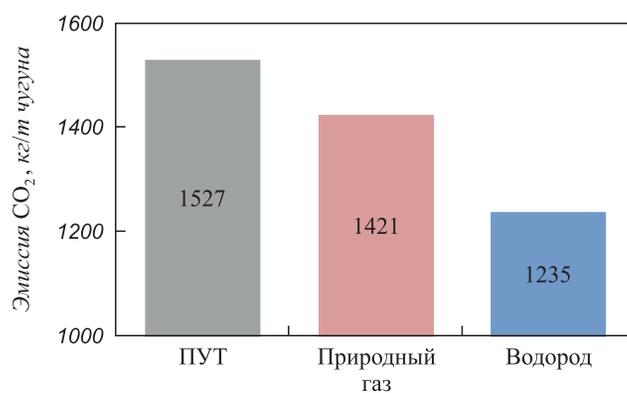


Рис. 5. Эмиссия CO<sub>2</sub> на 1 т чугуна при вдувании в доменную печь ПУТ, природного газа и водорода

Fig. 5. CO<sub>2</sub> emissions per ton of cast iron while blowing of pulverized coal, natural gas and hydrogen into the blast furnace

чаемого путем электролиза воды за счет электроэнергии из безуглеродистых (вода, солнце, ветер, геотермальные источники, атомная энергетика, биоорганическая энергетика) ее источников [3]. В Евросоюзе прирост производства электроэнергии с 2013 г. осуществляется только за счет безуглеродистых источников (рис. 6) и ожидается, что через 30 лет, благодаря этому, водородная металлургия железа может стать реальностью [4].

Небольшие резервы по снижению энергозатрат на выплавку стали и эмиссии CO<sub>2</sub> на интегрированном металлургическом заводе могут дать технологические схемы, объединяющие энергетическими и материальными потоками ДП с агрегатами прямого получения железа и или бескоксовой выплавки чугуна. Так, симбиоз коксодоменного производства и производства

губчатого железа процессами Midrex, HYL и другими (рис. 7) с использованием 100 % коксового газа для металлзации окатышей и с применением их в электропечи по расчету увеличивает выплавку стали на 17 %, снижает суммарные энергозатраты на 3 % и эмиссию CO<sub>2</sub> на 10 % с учетом компенсации замены в прокатном производстве коксового газа природным [4].

Комбинация ДП и агрегата Finex (рис. 8) по расчету позволяет сократить расход угля на 40 кг/т чугуна и эмиссию CO<sub>2</sub> на 100 кг/т стали. В этой схеме часть металлзованной (на 50 – 70 %) руды из агрегата Finex загружается в ДП, а жидкий чугун из агрегата Finex поступает вместе с доменным чугуном в конвертер. Значительное сокращение эмиссии CO<sub>2</sub> и энергозатрат на выплавку стали обеспечивает технология металли-

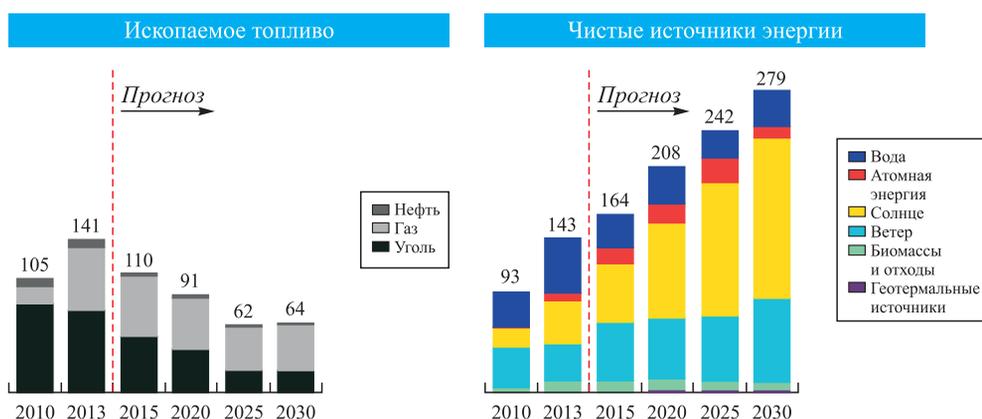


Рис. 6. Прогноз развития безуглеродной энергетики в Европе

Fig. 6. Forecast of development of carbon-free energy in Europe

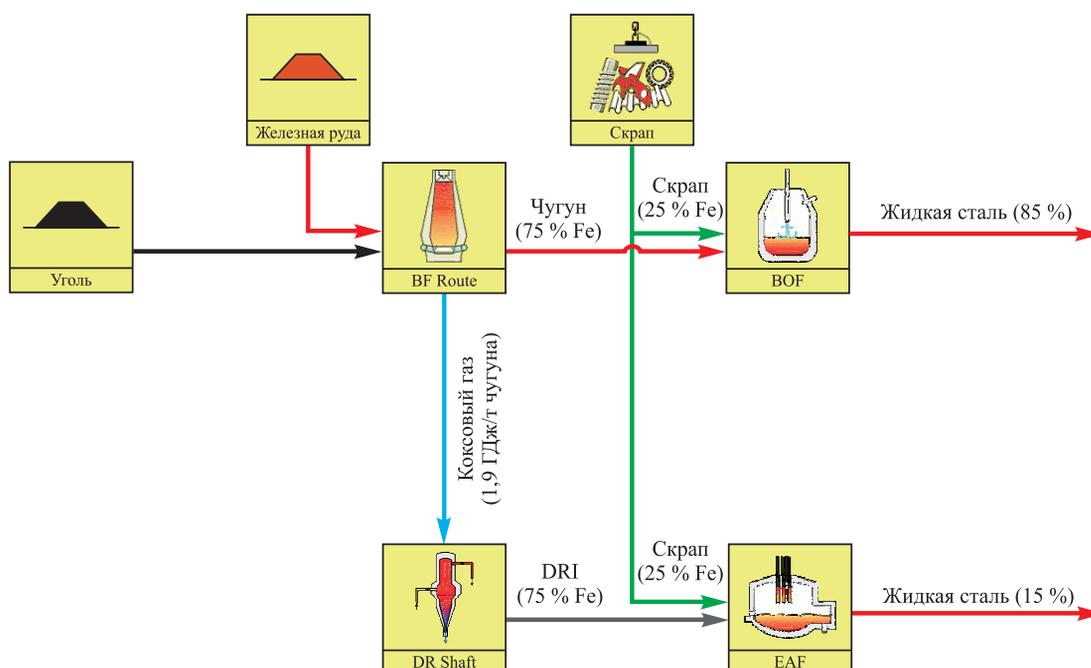


Рис. 7. Комбинация коксодоменного производства и прямого получения железа на интегрированном заводе

Fig. 7. Combination of coke and blast furnace production and direct ironmaking at integrated plant

зации руды водородом, полученным за счет возобновляемых источников энергии, с последующей загрузкой горячего губчатого железа в электросталеплавильную печь (рис. 9). Обе части этой технологической схемы уже отработаны [4].

Революционная технология, обеспечивающая значительное снижение эмиссии  $\text{CO}_2$  и повышение эффективности сталеплавильного производства разрабатывается компаниями Lanza Tech (США) и Primetals (Австрия) [8]. Суть технологии заключается в микробиологической ферментации (бактериальное брожение) углеродсодержащих отходящих металлургических газов (рис. 10) с получением этанола и других химических продуктов. В 2012 г. компания Lanza Tech успешно запустила две полупромышленных установки по превращению колошниковых газов агрегата COREX и ДП, а также конвертерного газа в этанол на заводах Baosteel и Shougang в Китае.

Для исследований и дальнейшей разработки технологии в рамках программы EU2020 совместно с компанией ArcelorMittal реализуется проект «Горизонт 2020 «Steelanol», нацеленный на производство 47 000 т этанола в год. На проект выделен грант на сумму 10,2 млн евро. Цель проекта – во второй половине 2017 г. запустить первый крупномасштабный реактор и выйти на полную мощность в 2019 г. [8].

По сравнению со сжиганием в котлах тепловых электростанций, технология Lanza Tech вдвое эффективнее превращает металлургические газы в энергию (рис. 11) и обеспечивает при этом снижение выбросов  $\text{NO}_x$  и  $\text{SO}_x$  на 85 % и  $\text{CO}_2$  на 30 – 50 %.

**Выводы.** Черная металлургия является источником эмиссии порядка 7 %  $\text{CO}_2$ , образующегося из ископаемого углерода. Подавляющая часть этой эмиссии приходится на агло-коксо-доменное производство, продукция которого составляет более 60 % металлошихты для

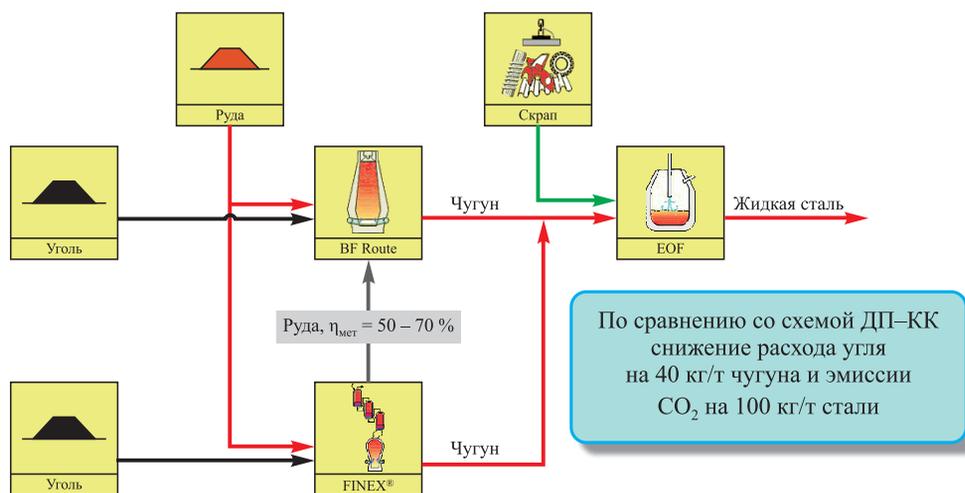


Рис. 8. Комбинация доменной печи и агрегата Finex на интегрированном заводе

Fig. 8. Combination of blast furnace and Finex unit at integrated plant

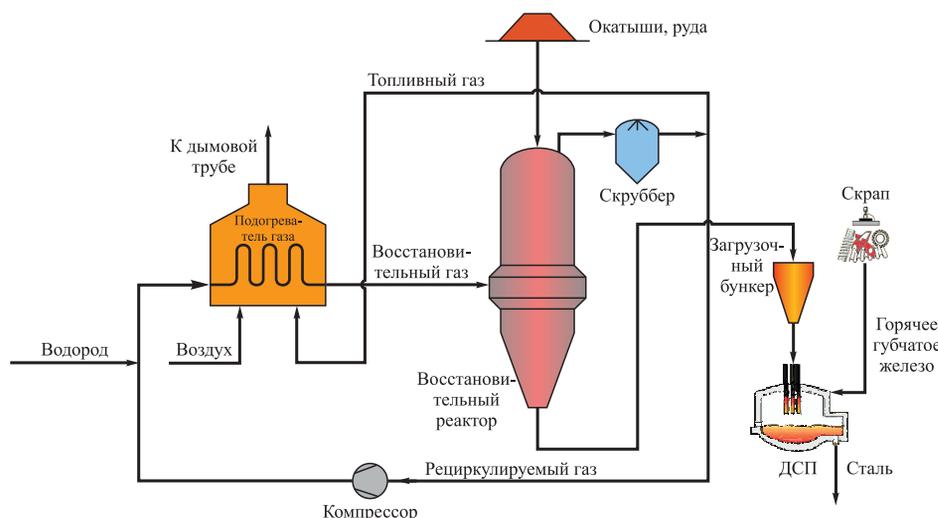


Рис. 9. Технологическая схема водородной металлургии

Fig. 9 Technological scheme of hydrogen metallurgy

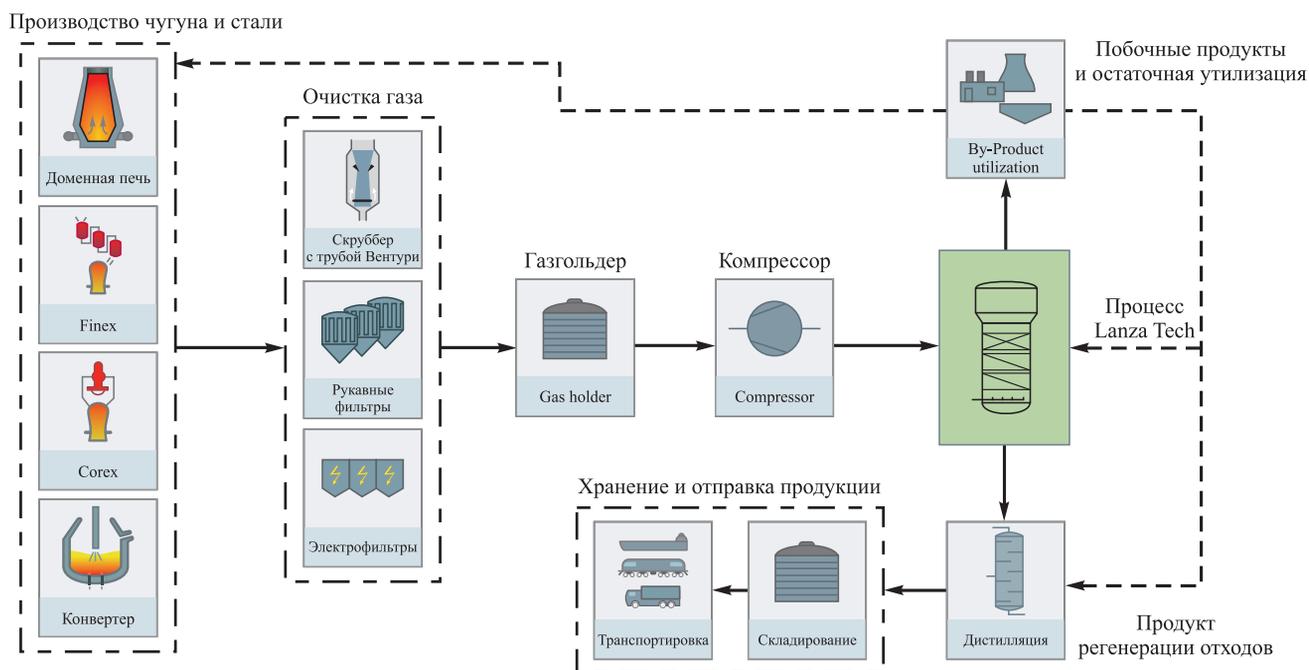


Рис. 10. Технологическая схема производства этанола из металлургических газов

Fig. 10. Technological scheme of ethanol production from metallurgical gases

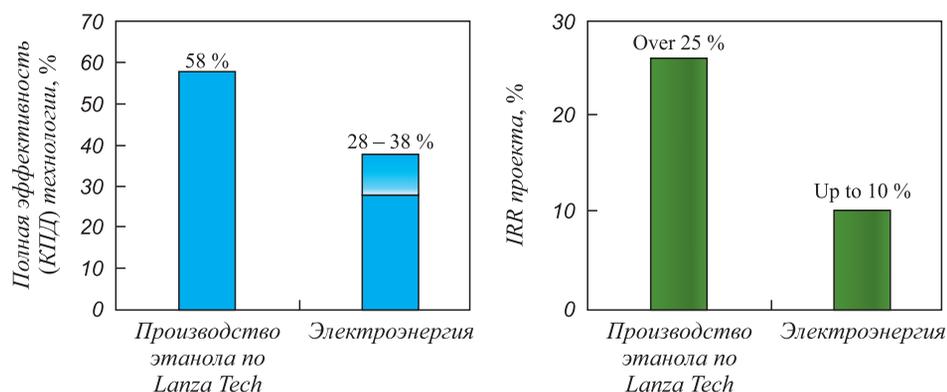


Рис. 11. Эффективность двух технологий утилизации металлургических газов

Fig. 11. Effectiveness of two technologies of metallurgical gas recycling

выплавки стали. Достигнутая эффективность процесса на многих доменных печах близка к термодинамическому пределу и оставшиеся ресурсы снижения эмиссии  $\text{CO}_2$  за счет повышения эффективности доменной плавки и сокращения расхода топлива незначительны и не могут обеспечить выполнение требований к черной металлургии по снижению выбросов парниковых газов. Среди рассмотренных технологических схем, нацеленных на повышение энергетической и экологической эффективности сталеплавленного производства, в первую очередь проблему значительного снижения выбросов  $\text{CO}_2$  решает водородная металлургия железа при условии получения водорода с использованием электроэнергии, производимой за счет безуглеродных и возобновляемых источников энергии. Перспективной технологией, обеспечивающей энергоэффективную

утилизацию доменного и конвертерного газов и сокращение выбросов как парниковых, так и кислотообразующих газов, является разрабатываемая компаниями Lanza Tech и Primetals технология микробиологической ферментации этих газов с получением этанола и других химических продуктов.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Barbara Rammer, Robert Millner, Christian Boehm. Comparing the  $\text{CO}_2$  emission of different ironmaking rout // Proceedings of the 7th European Coke and Ironmaking Congress – ECIC 2016. P. 284 – 291.
2. Adeline Morcel, Lena Sundqvist Okvist, Joel Orre etc. Low  $\text{CO}_2$  ironmaking in the blast furnace // Proceedings of the 7th European Coke and Ironmaking Congress – ECIC 2016. P. 274 – 283.
3. Peter Schmoele. The blast furnace – fit for future? // Proceedings of the 7th European Coke and Ironmaking Congress – ECIC 2016. P. 3 – 12.

4. Johannes Schenk, Hans Bodo Lungen. Evaluation of the capabilities of direct and smelting reduction processes to enhance the energy efficiency and to reduce the CO<sub>2</sub> emission of the steel production in Europe // Proceedings of the 7th European Coke and Ironmaking Congress – ECIC 2016. P. 13 – 23.
5. Peacy J.G., Davenport W.G. The iron blast furnace-theory and practice. Pergamon Press. Oxford, 1979. – 297 p.
6. Filatov S., Kurunov I., Tihonov D. Reserves for rising the efficiency of blast furnace process // Proceedings of the 7th European Coke and Ironmaking Congress – ECIC 2016. P. 184 – 191.
7. Thomas Buergler, Irmela Kofler. Direct reduction technology as a flexible tool to reduce CO<sub>2</sub> intensity of iron and steelmaking // Proceedings of the 7th European Coke and Ironmaking Congress – ECIC 2016. P. 266 – 273.
8. Allexander Fleischandlerl, Tobias Plattner, Prabhakar Nair, Carl Wolf. The circular economy: carbon recycling and the iron industry // Proceedings of the 7th European Coke and Ironmaking Congress – ECIC 2016. P. 332 – 341.

Поступила 29 ноября 2016 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2017. VOL. 60. NO. 1, pp. 80–85.

## PROSPECTS OF IRON EXTRACTIVE METALLURGY DEVELOPMENT THROUGH THE EYES OF EUROPEAN STEELMAKERS

Based on the materials of the 7<sup>th</sup> European Sintering & Ironmaking Congress

*I.F. Kurunov*

JSC “Novolipetsk Metallurgical Plant”, Lipetsk, Russia

**Abstract.** At the European congress held on September 12-14, 2016 in Linz major attention was given to the prospects of iron metallurgy development. The flow “blast furnace – basic oxygen furnace” is expected to remain the main steelmaking process giving way to steelmaking in electrical furnaces starting from 1960s. Development of hydrogen metallurgy and occurrence of industrial microbial fermentation of metallurgical gases with subsequent production of ethanol and other chemical products from them are forecast.

**Keywords:** blast furnace, basic oxygen furnace, steel, CO<sub>2</sub> emission, electrical furnaces, metallurgical gases, sponge iron, gas fermentation, ethanol.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-1-80-85

### REFERENCES

1. Barbara Rammer, Robert Millner, Christian Boehm. Comparing the CO<sub>2</sub> emission of different ironmaking rout. *Proceedings of the 7th European Coke and Ironmaking Congress – ECIC 2016*, pp. 284–291.
2. Adeline Morcel, Lena Sundqvist Okvist, Joel Orre, Bo Bjorkman, Per Lagrerwall. Low CO<sub>2</sub> ironmaking in the blast furnace. *Proceedings of the 7th European Coke and Ironmaking Congress – ECIC 2016*, pp. 274–283.
3. Peter Schmoele. The blast furnace – fit for future? *Proceedings of the 7th European Coke and Ironmaking Congress – ECIC 2016*, pp. 3–12.
4. Johannes Schenk, Hans Bodo Lungen. Evaluation of the capabilities of direct and smelting reduction processes to enhance the energy efficiency and to reduce the CO<sub>2</sub> emission of the steel production in Europe. *Proceedings of the 7th European Coke and Ironmaking Congress – ECIC 2016*, pp. 13–23.
5. Peacy J.G., Davenport W.G. *The iron blast furnace-theory and practice*. Pergamon Press. Oxford, 1979, 297 p.
6. S. Filatov, I. Kurunov, D. Tihonov. Reserves for rising the efficiency of blast furnace process. *Proceedings of the 7th European Coke and Ironmaking Congress – ECIC 2016*, pp. 184–191.
7. Thomas Buergler, Irmela Kofler. Direct reduction technology as a flexible tool to reduce CO<sub>2</sub> intensity of iron and steelmaking. *Proceedings of the 7th European Coke and Ironmaking Congress – ECIC 2016*, pp. 266–273
8. Allexander Fleischandlerl, Tobias Plattner, Prabhakar Nair, Carl Wolf. The circular economy: carbon recycling and the iron industry. *Proceedings of the 7th European Coke and Ironmaking Congress – ECIC 2016*, pp. 332–341.

### Information about the author:

*I.F. Kurunov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Blast Furnaceman*  
(kurunov\_if@nlmk.ru)

Received November 29, 2016