

УДК 662.6/9:536.7:669.162.21:669.184

А. Л. Чайка, А. Г. Чернятевич, А. А. Сохацкий, А. А. Москалина,
Т. С. Голуб, Л. С. Молчанов

**ВЛИЯНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ПЫЛЕУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА И
ПРИРОДНОГО ГАЗА В ДОМЕННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ НА
ЭКСЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ
«ДОМЕННАЯ ПЕЧЬ – КИСЛОРОДНЫЙ КОНВЕРТЕР»**

Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины

Аннотация. Целью работы является исследование влияния пылеугольного топлива на энергетические показатели технологической системы производства стали «доменная печь – кислородный конвертер». Выполнен анализ энергоиспользования в технологической системе за лучшие фактические периоды работы доменной печи (ДП) при применении только природного газа, ПУТ и совместного вдувания ПУТ с природным газом. Показано что технология применения ПУТ улучшает технико-экономические показатели и положительно влияет на распределение эксергетических потоков, эксергетические КПД и экологические показатели в системе «доменная печь – кислородный конвертер». Сопоставительный теплоэнергетический и эксергетический анализ фактических периодов применения ПУТ в количестве 135 кг/т чугуна в сравнении с вдуванием только природного газа в количестве 35 м³/т чугуна показал, что вдувание ПУТ приводит к уменьшению расхода кокса на ~25% за счет вдувания ПУТ. Эксергетический анализ прогнозных конвертерных плавок показал, что вдувание ПУТ в ДП приводит к уменьшению суммарной подводимой эксергии на ~7%, а в случае совместного применения ПУТ с природным газом эксергии уменьшаются на ~2%. Анализ эксергетических балансов конвертерной плавки показал, что изменение расхода ПУТ и природного газа в доменном производстве незначительно влияет на изменение эксергетических КПД (до 0,4%). В целом показано, что технология применения ПУТ улучшает технико-экономические показатели и положительно влияет на распределение эксергетических потоков, эксергетические КПД и экологические показатели в системе «доменная печь–кислородный конвертер».

Ключевые слова: доменная печь, кислородный конвертер, природный газ, пылеугольное топливо, эксергия, расход кокса

Ссылка для цитирования: Чайка А.Л. Влияние применения пылеугольного топлива и природного газа в доменном производстве на эксергетические показатели технологической системы «доменная печь–кислородный конвертер» / А.Л. Чайка, А.Г. Чернятевич, А.А. Сохацкий, А.А. Москалина, Т.С. Голуб, Л.С. Молчанов // «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – 2018. – Вып.32. – С.107-117.

Doi:

A.L. Chaika, A.G. Cherniatevych, A.A. Sokhatsky, A.A. Moskalina, T.S. Golub, L.S. Molchanov

Influence of the application of pulverized coal and natural gas in blast furnace on exergy indicators of technological system «blast furnace-oxygen converter»

*«Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – 2018. - Вып.32
«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2018. – Collection 32
«Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii». – 2018. – Vypusk 32*

Iron and Steel Institute named after Z.I. Nekrasov of the NAS of Ukraine

Abstract. The aim of the work is to study the effect of pulverized coal (PCI) on the energy indicators of the technological system of steel production «blast furnace-oxygen converter». The analysis of energy use in the technological system for the best actual periods of operation of the blast furnace (BF) using only natural gas, pulverized coal and co-injection of pulverized coal with natural gas is performed. It is shown that the technology of using PCI improves technical and economic indicators and has a positive effect on the distribution of exergetic flows, exergetic efficiency and environmental indicators in the system «blast furnace-oxygen converter». Comparative heat and energy and exergy analysis of actual pulverized coal consumption in the amount of 135 kg/t of pig iron compared to blowing only natural gas in the amount of 35 m³/t of pig iron showed that pulverized coal leads to a decrease in coke consumption by ~ 25% due to pulverized pulverized coal. An exergetic analysis of the predicted converter heats showed that the injection of pulverized coal to the pulpwood leads to a decrease in the total exergy supplied by ~7%, and in the case of co-application of pulverized coal with natural gas, the exergy decreases by ~ 2%. Analysis of the exergy balance of converter melting showed that a change in the consumption of pulverized coal and natural gas in the blast furnace production slightly affects the change in the exergetic efficiency (up to 0.4%). In general, it is shown that the technology of using PCI improves technical and economic indicators and positively affects the distribution of exergetic flows, exergetic efficiency and environmental indicators in the blast furnace – oxygen converter system.

Keywords: blast furnace, oxygen converter, natural gas, pulverized coal, exergy, coke consumption

For citation: Chaika A.L. Influence of the application of pulverized coal and natural gas in blast furnace on exergy indicators of technological system «blast furnace-oxygen converter» / A.L. Chaika, A.G. Cherniatevych, A.A. Sokhatsky, A.A. Moskalina, T.S. Golub, L.S. Molchanov // «*Fundamental'nye i prikladnye problemy černoј metallurgii*». – 2018. – Vypusk 32. – P.107-117. (In Russ.).

Doi:

О. Л. Чайка, А. Г. Чернятевич, О. А. Сохацький, А. О. Москалина, Т. С. Голуб, Л. С. Молчанов

Вплив застосування пилувугільного палива та природного газу в доменному виробництві на ексергетичні показники технологічної системи «доменна піч – кисневий конвертер»

Інститут чорної металургії ім.З.І.Некрасова НАН України

Анотація. Метою роботи є дослідження впливу пилувугільного палива (ПВП) на енергетичні показники технологічної системи виробництва стали «доменна піч-кисневий конвертер». Виконано аналіз енерговикористання в технологічній системі за кращі фактичні періоди роботи доменної печі (ДП) при застосуванні тільки природного газу, ПВП і спільного вдування ПВП з природним газом. Показано що технологія застосування ПВП покращує техніко-економічні показники і позитивно впливає на розподіл ексергетичної потоків, ексергетичної ККД і екологічні показники в системі «доменна піч-кисневий конвертер». Порівняльний теплоенергетичний і ексергетичний аналіз фактичних періодів застосування ПВП в кількості 135 кг / т чавуну в порівнянні з вдуванням тільки природного газу в кількості 35 м³ / т чавуну показав, що вдування ПВП

приводить до зменшення витрат коксу на $\sim 25\%$. Ексергетичний аналіз прогнозних конвертерних плавок показав, що вдування ПВП в ДП приводить до зменшення сумарної ексергії на $\sim 7\%$, а в разі спільного застосування ПВП та природного газу втрати ексергії зменшуються на $\sim 2\%$. Аналіз ексергетичної балансів конвертерної плавки показав, що зміна витрати ПВП і природного газу в доменному виробництві незначним чином впливає на зміну ексергетичного ККД (до $0,4\%$). В цілому показано, що технологія застосування ПВП покращує техніко-економічні показники і позитивно впливає на розподіл ексергетичної потоків, ексергетичного ККД і екологічні показники в системі «доменна піч-кисневий конвертер».

Ключові слова: доменна піч, кисневий конвертер, природний газ, пиловугільне паливо, ексергія, витрати коксу

Посилання для цитування: Чайка А.Л. Влияние применения пылеугольного топлива и природного газа в доменном производстве на эксергетические показатели технологической системы «доменная печь-кислородный конвертер» / А.Л. Чайка, А.Г. Чернятевич, А.А. Сохацкий, А.А. Москалина, Т.С. Голуб, Л.С. Молчанов // «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии». – 2018. – Вып.32. – С.107-117.

Doi:

Введение. Применение пылеугольного топлива (ПУТ) и природного газа отдельно и совместно, в доменном производстве, приводит к изменению показателей тепловой работы доменной печи (ДП) и ее эксергетических показателей, что может сказываться на энергопотреблении при производстве стали в технологической цепи «доменная печь – кислородный конвертер» [1-5].

Целью работы является исследование влияния пылеугольного топлива на энергетические показатели технологической системы производства стали «доменная печь – кислородный конвертер».

Поэтому выполнено составление и расчет тепловых и эксергетических балансов доменной плавки, конвертерной плавки и системы «доменная печь-кислородный конвертер» за лучшие фактические периоды работы ДП при применении отдельно природного газа, ПУТ и совместного применения ПУТ с природным газом (табл. 1-3, рис. 1).

Изложение основных результатов исследования.

Эксергетический баланс доменной печи. Влияние применения только природного газа ($35 \text{ м}^3/\text{т}$ чугуна), ПУТ ($135 \text{ кг}/\text{т}$ чугуна) и совместного вдувания ПУТ с природным газом ($100 \text{ кг}/\text{т}$ и $35 \text{ м}^3/\text{т}$ соответственно) на технико-экономические и эксергетические показатели ДП за ее лучшие фактические периоды работы приведены в таблице 1 и на рисунке 1.

Сопоставительный теплоэнергетический и эксергетический анализ фактических периодов применения ПУТ в количестве $135 \text{ кг}/\text{т}$ чугуна (период 2 табл. 1) в сравнении с вдуванием только природного газа в количестве $35 \text{ м}^3/\text{т}$ чугуна (период 1 табл. 1) на технико-экономические и эксергетические показатели ДП показал, что вдувание ПУТ приводит к:

- увеличению производительности печи на ~20% за счет увеличения расхода дутья и содержания в нем кислорода;
- уменьшению расхода кокса на ~25% за счет вдувания ПУТ;
- уменьшению расхода условного и суммарного топлива на ~5÷6%;
- уменьшению выхода ВЭР потребителям на ~15%;
- уменьшению финансовых затрат на топливо до 38\$/т чугуна за счет меньшей стоимости ПУТ;
- уменьшению подводимой эксергии на ~10% за счет уменьшения удельного расхода дутья и меньшей химической эксергии ПУТ в сравнении с природным газом;
- уменьшению потерь эксергии на ~35% в том числе за счет меньшей химической эксергии ПУТ (31,5 МДж/кг) в сравнении с природным газом (42 МДж/м³ ≈ 53,8 МДж/кг) на ~70%;
- увеличению эксергетических КПД на 4÷5%;
- сохранению показателя экологемкости на постоянном уровне и улучшению показателей ресурсоемкости (-5%) и коэффициента экологичности (+5%);

Таблица 1 – Техничко-экономические и эксергетические показатели ДП при применении ПУТ и природного газа

| Периоды | Размерность | 1 | 2 | 3 |
|---|----------------------|-------|-------|-------|
| расход ПУТ | кг/т | 0 | 135 | 100 |
| расход природного газа | м ³ /т | 35 | 0 | 35 |
| Техничко-экономические показатели: | | | | |
| производительность печи | т чугуна/сут | 3605 | 4280 | 4560 |
| расход кокса | кг/т | 543 | 400 | 404 |
| расход условного топлива | кг/т | 583 | 552 | 551 |
| расход суммарного топлива | кг/т | 571 | 536 | 525 |
| выход ВЭР потребителям | кг/т | 98 | 82 | 82 |
| финансовые затраты на топливо | \$/т чугуна | 216 | 178 | 179 |
| Параметры чугуна: | | | | |
| Температура чугуна | °С | 1475 | 1475 | 1475 |
| Химический состав чугуна: | | | | |
| Si | % | 0,75 | 0,71 | 0,78 |
| Mn | % | 0,17 | 0,12 | 0,11 |
| P | % | 0,075 | 0,060 | 0,056 |
| C | % | 4,59 | 4,11 | 4,36 |
| S | % | 0,016 | 0,015 | 0,014 |
| Параметры шихты: | | | | |
| доля агломерата/окатышей | % | 66/34 | 65/35 | 67/33 |
| содержание Fe в ЖРЧ шихты | % | 55,4 | 56,2 | 56,8 |
| Параметры дутья: | | | | |
| - расход | нм ³ /мин | 3710 | 3640 | 3975 |
| - температура | °С | 1080 | 1082 | 1073 |
| - содержание кислорода в дутье | % | 20,9 | 23,2 | 22,7 |
| Параметры колошниковога газа: | | | | |

| | | | | | |
|---|-----|--------------------|-------|-------|-------|
| - выход сухого газа | | м ³ /т | 2090 | 1765 | 1810 |
| - теплота сгорания | | кДж/м ³ | 3465 | 3525 | 3455 |
| - степень использования газа | | % | 40,1 | 42,5 | 44,6 |
| Выход шлака | | кг/т | 465 | 390 | 360 |
| Эксергетический баланс: | | | | | |
| Приход эксергии | | | | | |
| термическая* эксергия дутья | | МДж/т | 1580 | 1305 | 1343 |
| Природный газ | физ | МДж/т | 5 | 0 | 5 |
| | хим | МДж/т | 1450 | 29 | 1460 |
| Химические эксергии: | | | | | |
| - кокса; | | МДж/т | 17800 | 13102 | 13215 |
| - ПУТ; | | МДж/т | 0 | 4263 | 2940 |
| - железорудных материалов | | МДж/т | 497 | 496 | 501 |
| - известняка; | | МДж/т | 8 | 1 | 2 |
| Всего приход эксергии | | МДж/т | 21340 | 19195 | 19465 |
| Термическая эксергия продуктов плавки: | | | | | |
| чугун | физ | МДж/т | 894 | 894 | 894 |
| | хим | МДж/т | 8148 | 8134 | 8138 |
| шлак | физ | МДж/т | 621 | 519 | 481 |
| | хим | МДж/т | 218 | 197 | 179 |
| колошниковый газ | физ | МДж/т | 510 | 457 | 478 |
| | хим | МДж/т | 7086 | 6097 | 6120 |
| колошниковый пыль | физ | МДж/т | 3 | 4 | 5 |
| | хим | МДж/т | 364 | 539 | 691 |
| Всего эксергия продуктов плавки | | МДж/т | 17845 | 16840 | 16985 |
| Потери эксергии | | МДж/т | 3495 | 2355 | 2480 |
| Эксергетические КПД: | | | | | |
| термодинамическое совершенство доменного процесса | | % | 83,6 | 87,7 | 87,3 |
| технологический КПД | | % | 42,4 | 47,0 | 46,4 |
| обобщенный КПД производства чугуна | | % | 55,6 | 59,3 | 58,5 |
| Экологические показатели: | | | | | |
| экологоемкость | | доли | 0,07 | 0,06 | 0,06 |
| ресурсоемкость | | доли | 1,31 | 1,25 | 1,27 |
| коэффициент экологичности | | доли | 0,71 | 0,75 | 0,74 |

* сумма физической и химической эксергий

Сопоставительный теплоэнергетический и эксергетический анализ фактических периодов совместного применения ПУТ в количестве 100 кг/т чугуна с природным газом в количестве 35 м³/т чугуна (период 3 табл. 1) в сравнении с вдуванием только ПУТ в количестве 135 кг/т чугуна (период 2 табл. 1) на технико-экономические и эксергетические показатели доменного цеха показал, что вдувание ПУТ приводит к:

- увеличению производительности печи на ~7% за счет увеличения расхода дутья и содержания в нем кислорода;

«Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – 2018. - Вып.32
«Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2018. – Collection 32
«Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii». – 2018. – Vypusk 32

- уменьшению расхода суммарного топлива на ~2%;
- сохранению выхода ВЭР потребителям;

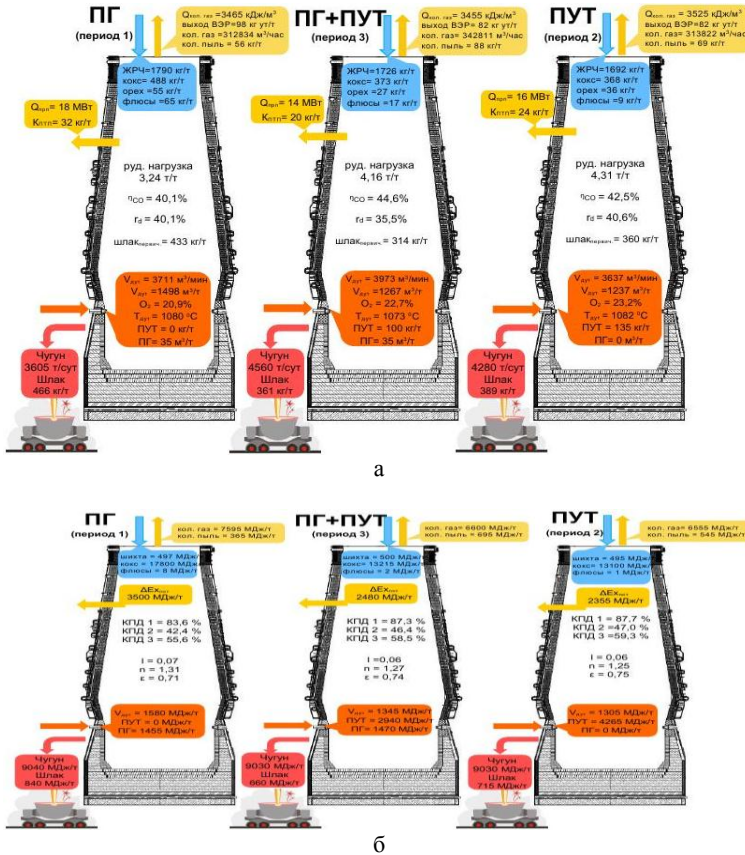


Рисунок 1 – Технико-экономические (а) и энергетические показатели (б) ДП при применении ПУТ и природного газа

- увеличению подводимой эскергии на ~1÷2% за счет большей химической эскергии природного газа в сравнении с ПУТ;
- увеличению потерь эскергии на ~5% в том числе за счет большей химической эскергии природного газа в сравнении с ПУТ (≈53,8 МДж/кг и 31,5 МДж/кг соответственно);
- уменьшению эскергетических КПД на ~0,4÷0,9%;
- сохранению экологических показателей на постоянном уровне.

Эскергетический баланс конвертера. Прогнозный эскергетический баланс конвертера емкостью 350 т по фактическим данным работы ДП

«Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – 2018. - Вып.32
 «Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2018. – Collection 32
 «Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii». – 2018. – Vypusk 32

при отдельном применении природного газа, ПУТ и совместного вдувания ПУТ с природным газом приведен в таблице 2.

Таблица 2 – Прогнозный эксергетический баланс конвертерного цеха

| Периоды работы ДП | | Размерность | 1 | 2 | 3 |
|---|----------------------------|-------------------|------|------|------|
| Расход ПУТ в ДП | | кг/т | 0 | 135 | 100 |
| Расход природного газа в ДП | | м ³ /т | 35 | 0 | 35 |
| Температура чугуна | на выпуске с ДП | °С | 1475 | 1475 | 1475 |
| | перед заливкой в конвертер | °С | 1375 | 1375 | 1375 |
| Доля чугуна в конвертере | | % | 83,5 | 87,0 | 84,8 |
| Материальный баланс: | | | | | |
| Удельные расходы материалов (кг/т жидкой стали): | | | | | |
| чугуна | кг/т стали | 834 | 868 | 847 | |
| лома | кг/т стали | 246 | 213 | 234 | |
| плавикового шпата | кг/т стали | 3,3 | 3,3 | 3,3 | |
| извести | кг/т стали | 77 | 74 | 80 | |
| миксерного шлака | кг/т стали | 0,8 | 0,9 | 0,8 | |
| футеровки | кг/т стали | 2,7 | 2,7 | 2,7 | |
| кислорода | м ³ /т стали | 51 | 48 | 50 | |
| Образуется продуктов плавки (кг/т жидкой стали): | | | | | |
| конечного шлака | кг/т стали | 121 | 116 | 124 | |
| отходящих газов | м ³ /т стали | 75 | 75 | 75 | |
| потери железа со шлаком в виде корольков и газами в виде пыли | кг/т стали | 41 | 40 | 41 | |
| Эксергетический баланс: | | | | | |
| Приход эксергии: | | | | | |
| чугун | физ | МДж/т | 678 | 705 | 688 |
| | хим | МДж/т | 6822 | 6973 | 6879 |
| миксерный шлак | физ | МДж/т | 1 | 1 | 1 |
| | хим | МДж/т | 0,4 | 0,5 | 0,5 |
| кислород | физ | МДж/т | 12 | 11 | 12 |
| | хим | МДж/т | 6 | 6 | 6 |
| Химические эксергии: | | | | | |
| лом | МДж/т | 1808 | 1622 | 1723 | |
| известь | МДж/т | 128 | 124 | 133 | |
| плавиковый шпат | МДж/т | 3 | 3 | 3 | |
| футеровка | МДж/т | 5 | 5 | 5 | |
| Всего приход эксергии | МДж/т | 9464 | 9451 | 9451 | |
| Термическая* эксергия продуктов плавки: | | | | | |
| сталь | МДж/т | 7785 | 7789 | 7793 | |
| шлак | МДж/т | 255 | 246 | 262 | |
| отходящие газы | МДж/т | 893 | 893 | 893 | |
| окислы железа пыли | МДж/т | 19 | 19 | 19 | |
| корольки шлака | МДж/т | 74 | 71 | 75 | |
| выносы | МДж/т | 86 | 85 | 86 | |

| | | | | |
|---|-------|------|------|------|
| Всего эскергия продуктов плавки | МДж/т | 9112 | 9103 | 9128 |
| Потери эскергии | МДж/т | 352 | 348 | 323 |
| Эскергетические КПД: | | | | |
| термодинамическое совершенство конвертерного процесса | % | 96,3 | 96,3 | 96,6 |
| технологический КПД | % | 82,3 | 82,4 | 82,5 |
| Экологические показатели: | | | | |
| экологоемкость | доли | 0,16 | 0,16 | 0,16 |
| ресурсоемкость | доли | 1,22 | 1,21 | 1,21 |
| коэффициент экологичности | доли | 0,69 | 0,69 | 0,69 |

* сумма физической и химической эскергий

Эскергетический анализ прогнозных конвертерных плавков показал, что в случае применения ПУТ в доменном производстве в сравнении с вдвумением только природного газа:

- уменьшаются потери эскергии на $\sim 1 \div 2\%$;
- сохраняется термодинамическое совершенство конвертерного процесса;
- увеличивается технологический КПД на $\sim 0,1\%$;
- сохраняются на постоянном уровне экологические показатели;

Эскергетический анализ прогнозных конвертерных плавков показал, что в случае применения совместного применения ПУТ с природным газом в доменном производстве в сравнении с вдвумением только ПУТ:

- уменьшаются потери эскергии на $\sim 8\%$;
- увеличивается термодинамическое совершенство конвертерного процесса на $\sim 0,3\%$;
- увеличивается технологический КПД на $\sim 0,1\%$;
- сохраняются на постоянном уровне экологические показатели;

С использованием составленных эскергетических балансов по доменной печи и конвертеру выполнен их синтез и составлен эскергетический баланс системы «доменная печь – кислородный конвертер» который приведен в таблице 3.

Таблица 3 – Эскергетический баланс системы «доменная печь – кислородный конвертер»

| Периоды работы ДП | | Размерность | 1 | 2 | 3 |
|---|----------------------|-------------------|-------|-------|-------|
| расход ПУТ в ДП | | кг/т | 0 | 135 | 100 |
| расход природного газа в ДП | | м ³ /т | 35 | 0 | 35 |
| Температура чугуна | выпуск из ДП | °С | 1475 | 1475 | 1475 |
| | загрузка в конвертер | °С | 1375 | 1375 | 1375 |
| Приход термической эскергии*, МДж/т стали: | | | | | |
| дутье | | МДж/т | 1321 | 1135 | 1139 |
| природный газ | | МДж/т | 1217 | 25 | 1244 |
| кокс | | МДж/т | 14870 | 11393 | 11203 |
| ПУТ | | МДж/т | 0 | 3707 | 2492 |
| железорудных материалов | | МДж/т | 415 | 431 | 425 |
| известняк | | МДж/т | 7 | 1 | 2 |
| миксерный шлак | | МДж/т | 2 | 2 | 2 |

| | | | | |
|---|-------|-------|-------|-------|
| кислород | МДж/т | 18 | 17 | 18 |
| лом | МДж/т | 1808 | 1622 | 1723 |
| известь | МДж/т | 128 | 124 | 133 |
| плавиковый шпат | МДж/т | 3 | 3 | 3 |
| футеровка | МДж/т | 5 | 5 | 5 |
| Всего приход эксергии | МДж/т | 19795 | 18465 | 18387 |
| Термическая эксергия продуктов плавки*, МДж/т стали: | | | | |
| доменный шлак | МДж/т | 701 | 622 | 559 |
| доменный газ | МДж/т | 6346 | 5699 | 5594 |
| пыль в доменном газе | МДж/т | 306 | 472 | 590 |
| сталь | МДж/т | 7785 | 7789 | 7793 |
| конвертерный шлак | МДж/т | 255 | 246 | 262 |
| отходящие газы | МДж/т | 893 | 893 | 893 |
| окислы железа пыли | МДж/т | 19 | 19 | 19 |
| корольки шлака | МДж/т | 74 | 71 | 75 |
| выносы | МДж/т | 86 | 85 | 86 |
| Всего эксергии продуктов плавки | МДж/т | 16465 | 15895 | 15870 |
| Потери эксергии | МДж/т | 3330 | 2570 | 2515 |
| Эксергетические КПД: | | | | |
| термодинамическое совершенство | % | 83,2 | 86,1 | 86,3 |
| технологический КПД | % | 39,3 | 42,2 | 42,4 |
| Экологические показатели**: | | | | |
| экологоемкость | доли | 0,17 | 0,18 | 0,19 |
| ресурсоемкость | доли | 1,40 | 1,37 | 1,37 |
| коэффициент экологичности | доли | 0,60 | 0,60 | 0,60 |

* сумма физической и химической эксергий

Сопоставительный эксергетический анализ применения ПУТ в сравнении с вдуванием только природного газа в доменном производстве на эксергетические показатели системы «доменная печь–кислородный конвертер» показал, что вдувание ПУТ приводит к:

- уменьшению подводимой эксергии на ~7%;
- уменьшению потерь эксергии на ~24% (760 МДж/т стали), что эквивалентно уменьшению расхода условного топлива на ~26 кг у.т./т стали;
- увеличению термодинамического совершенства на ~3%;
- увеличению технологического КПД на ~3%;
- увеличению экологоемкости на ~5÷10%;
- уменьшению показателя ресурсоемкости на ~2%;
- сохранению коэффициента экологичности.

Сопоставительный эксергетический анализ применения ПУТ совместно с природным газом в сравнении с вдуванием только ПУТ в доменном производстве на эксергетические показатели системы «доменная печь – кислородный конвертер» показал, что совместное вдувание ПУТ с природным газом приводит к:

- уменьшению подводимой эксергии на ~0,5%;

- уменьшению потерь эксергии на ~2% (55 МДж/т стали), что эквивалентно уменьшению расхода условного топлива на ~2 кг у.т./т стали;
- увеличению термодинамического совершенства и технологического КПД на ~0,2%;
- увеличению экологоемкости на ~5%;
- сохранению показателей ресурсоемкости и коэффициента экологичности на постоянном уровне.

Выводы. Выполнен анализ энергоиспользования в технологической системе «доменная печь – кислородный конвертер» за лучшие фактические периоды ДП при применении в доменном производстве только природного газа, только ПУТ и совместного вдувания ПУТ с природным газом.

Сопоставительный анализ фактических периодов применения только ПУТ в доменном производстве (135 кг/т чугуна) в сравнении с вдуванием только природного газа (35 м³/т) показал, что вдувание ПУТ приводит к:

- увеличению производительности печи на ~20%;
- уменьшению расхода кокса на ~25%;
- уменьшению расхода суммарного и условного топлив на 5÷6%;
- увеличению эксергетических КПД на 4÷5%;
- улучшению показателей ресурсоемкости (-5%) и коэффициента экологичности (+5%), сохранению на постоянном уровне показателя экологоемкости.

Сопоставительный анализ применения ПУТ совместно с природным газом в доменном производстве (100 кг/т и 35 м³/т соответственно) в сравнении с вдуванием только ПУТ в количестве 135 кг/т показал, что совместное вдувание ПУТ с природным газом приводит к:

- увеличению производительности печи на ~7%;
- уменьшению расхода суммарного топлива на ~2%;
- уменьшению эксергетических КПД на 0,4÷0,9%;
- сохранению экологических показателей на постоянном уровне.

Анализ эксергетических балансов конвертерной плавки показал, что изменение расхода ПУТ и природного газа в доменном производстве незначительно влияет на изменение эксергетических КПД (до 0,4%).

Сопоставительный эксергетический анализ применения ПУТ в сравнении с вдуванием только природного газа в доменном производстве на эксергетические показатели системы «доменная печь – кислородный конвертер» показал, что вдувание ПУТ приводит к:

- уменьшению подводимой эксергии на ~7%;
- уменьшению потерь эксергии на ~24% (760 МДж/т стали), что эквивалентно уменьшению расхода условного топлива на ~26 кг у.т./т стали;
- увеличению эксергетических КПД на ~3%;
- ухудшению показателя экологоемкости (+5÷10%), улучшению показателя ресурсоемкости (+2%) и сохранению на постоянном уровне коэффициента экологичности.

Сопоставительный эксергетический анализ применения ПУТ совместно с природным газом в сравнении с вдуванием только ПУТ в доменном производстве на эксергетические показатели системы «доменная печь – кислородный конвертер» показал, что вдувание ПУТ с природным газом приводит к:

- уменьшению подводимой эксергии на $\sim 0\pm 1\%$;
- уменьшению потерь эксергии на $\sim 2\%$ (55 МДж/т стали), что эквивалентно уменьшению расхода условного топлива на ~ 2 кг у.т./т стали;
- незначительному увеличению эксергетических КПД на $\sim 0,2\%$;
- ухудшению показателя экологоемкости ($+5\%$), сохранению показателей ресурсоемкости и коэффициента экологичности на постоянном уровне.

Библиографический список

1. *Большаков В.И.* Опыт и перспективы применения пылеугольного топлива в доменном производстве Украины / Большаков В.И., Чайка А.Л., Лебедь В.В., Сохацкий А.А. // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2015. – № 2. – С. 6-11.
2. *Исследование* влияния химического состава пылеугольного топлива на тепловые и эксергетические показатели доменной плавки / А.Л. Чайка, А.А. Сохацкий, А.А. Москалина, Б.В. Корнилов, К.С. Цюпа, В.Ю. Шостак // *Экология и промышленность*. – 2017. – № 3-4. – С. 76-84.
3. *Полный энергетический баланс* доменной плавки с применением ПУТ в условиях Украины / А.Л. Чайка, А.А. Сохацкий, А.А. Москалина, Б.В. Корнилов, В.Ю. Шостак, К.С. Цюпа, Р.В. Авдеев // *Теория и практика металлургии*. – 2017. – № 3-4. – С. 5-9.
4. *Домна в энергетическом измерении* / Бородулин А.В., Горбунов А.Д., Романенко В.И., Суцев С.П. – Днепродзержинск: ДГДУ, 2006. – 542 с.
5. *Exergy analysis of charcoal charging operation of blast furnace* / H. Nogami, J. Yagi, R.S. Sampaio // *ISIJ International*, Vol. 44 (2004), № 10, PP. 1646-1652.

Reference

1. *Bol'shakov V.I.* Opyt i perspektivy primeneniya pyleugol'nogo topliva v domennom proizvodstve Ukrainy / Bol'shakov V.I., Chayka A.L., Lebed' V.V., Sokhatskiy A.A. // *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'*. – 2015. – № 2. – С. 6-11.
2. *Issledovaniye vliyaniya khimicheskogo sostava pyleugol'nogo topliva na teplovyie i eksergeticheskiye pokazateli domennoy plavki* / A.L. Chayka, A.A. Sokhatskiy, A.A. Moskalina, B.V. Kornilov, K.S. Tsyupa, V.YU. Shostak // *Ekologiya i promyshlennost'*. – 2017. – № 3-4. – С. 76-84.
3. *Polnyy energeticheskiy balans domennoy plavki s primeneniyyem PUT v usloviyakh Ukrainy* / A.L. Chayka, A.A. Sokhatskiy, A.A. Moskalina, B.V. Kornilov, V.YU. Shostak, K.S. Tsyupa, R.V. Avdeyev // *Teoriya i praktika metallurgii*. – 2017. – № 3-4. – С. 5-9.
4. *Domna v energeticheskom izmerenii* / Borodulin A.V., Gorbunov A.D., Romanenko V.I., Sushchev S.P. – Dneprodzerzhinsk: DGDU, 2006. – 542 s.
5. *Exergy analysis of charcoal charging operation of blast furnace* / H. Nogami, J. Yagi, R.S. Sampaio // *ISIJ International*, Vol. 44 (2004), № 10, PP. 1646-1652.

Статья поступила в редакцию сборника 02.11.2018 года, прошла внутреннее и внешнее рецензирование (Протокол заседания редакционной коллегии сборника №1 от 26 декабря 2018 года) Рецензенты: д.т.н., проф. А.О.Еремин; к.т.н. А.Е.Меркулов

«Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – 2018. - Вып.32 «Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy». – 2018. – Collection 32 «Fundamental'nye i prikladnye problemy černoj metallurgii». – 2018. – Vypusk 32