

УДК 669.162.23

ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛЕДОВАНИЕ БЛОКА ДОМЕННЫХ ВОЗДУХОНАГРЕВАТЕЛЕЙ И ОСОБЕННОСТИ ИХ РАБОТЫ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ ХОЛОДНОГО ДУТЬЯ

А. А. Буткарев¹, А. П. Буткарев¹, В. И. Диментьев²,
В. Ю. Батюшин², Ю. А. Шур²

¹ ОАО «ВНИИМТ» (г. Екатеринбург, Россия),

² ПАО «Алчевский металлургический комбинат» (г. Алчевск, Украина)

В результате промышленного обследования и теплотехнических расчетов определены режимы работы доменных воздухонагревателей при увеличении температуры холодного дутья с 60 до 200 °С доменной печи № 1 ПАО «Алчевский металлургический комбинат», связанном с планируемой заменой воздухоудных машин на оборудование фирмы «MAN-Turbo». Повышение температуры холодного дутья при одинаковой длительности цикла работы воздухонагревателей и максимальной температуре в поднасадочном пространстве приводит к необходимости снижения примерно на 10 % расхода газа в газовый период. При этом температура горячего дутья перед смесителем в конце дутьевого периода снижается с 1045 до 980 °С. Если же расход газа оставить соответствующим базовому режиму, то для снижения температуры в поднасадочном пространстве необходимо дутьевой период сократить примерно на 0,5 ч, что приведет к увеличению температуры горячего дутья перед смесителем в конце дутьевого периода с 1045 до 1092 °С.

Ключевые слова: доменные воздухонагреватели, увеличение температуры холодного дутья, теплотехнический расчет.

В настоящее время на многих металлургических предприятиях проводится модернизация оборудования. Одно из направлений модернизации — замена воздухоудных машин, формирующих холодное дутье в доменном производстве. При этом наряду с прочими техническими параметрами изменяется температура холодного дутья, подаваемого в доменные воздухонагреватели, которая может изменяться в пределах от 60 до 200 °С. Поэтому требуется определить, будет ли эффективно увеличение температуры холодного дутья и насколько изменится температура горячего дутья в условиях работы доменной печи № 1 ПАО АМК.

Цель работы — определить режимы работы доменных воздухонагревателей в случае повышения температуры холодного дутья с 60 до 200 °С доменной печи № 1 ПАО АМК, связанного с заменой воздухоудных машин на оборудование фирмы «MAN-Turbo».

Доменные воздухонагреватели (ДВН) печи № 1 объемом 3000 м³ выполнены с внешней камерой горения и с применением в высокотемпературных зонах насадки диносовых огнеупоров. Блок содержит четыре одинаковых (по проекту) воздухонагревателя, однако на момент исследования работал блок из трех воздухонагревателей № 1, 2, 4, а ДВН-3 находился на ремонте. Блок из трех ДВН работает в последовательном режиме, когда воздухонагреватели один за другим ставятся на дутье. Нормативная продолжительность газового периода 3 ч 20 мин, воздушного — 1 ч 40 мин. Продолжительность полного периода 5 ч. Фактическое время перекидки клапанов, как показал анализ информации КИП, — не более 20–25 мин. Температура горячего дутья 1030 °С при расходе 4800 нм³/мин.

Для отопления блока воздухонагревателей используется очищенный доменный газ в смеси с коксовым (калорийность 4070 ккал/м³) в соотношении 0,94:0,06

либо природным (калорийность 7870 ккал/м³) в соотношении 0,98:0,02. Калорийность смешанного газа — 947 и 890 ккал/м³ соответственно. Химический состав доменного газа, %: 18 — 20 СО; 17 — 20 СО₂; 1,8 — 4,7 Н₂, влажность 40 — 60 г/м³. Давление газа перед ДВН стабилизируется регулятором на уровне 7 — 8 кПа.

Окислитель (атмосферный воздух) подается централизованно с возможностью индивидуального регулирования подачи воздуха на каждый из воздухонагревателей. Давление воздуха, подаваемого на горение, составляет 8,5 — 9,0 кПа. Соотношение газ — воздух поддерживается автоматически на уровне 1,05 — 1,15.

Газ сжигается в керамической горелке конструкции ВНИИМТ, работающей на доменном газе в смеси с коксовым или природным, со следующими характеристиками:

Максимальный расход, нм³/ч:

топлива	60000
воздуха	70000

Давление перед горелкой, кПа:

топлива	7,0 — 8,0
воздуха	8,5 — 9,0

В настоящее время холодное дутье формируется двумя воздухоудными машинами ТВД № 4 и ЭВД № 5 производства Невского завода, г. Санкт-Петербург, и обеспечивает расход дутья 4500 — 5100 нм³/мин, давление холодного дутья 3,05 кгс/см², горячего 2,9 кгс/см². Температура холодного дутья составляет (в зависимости от времени года) 50 — 85 °С.

В качестве дутья используют атмосферный воздух, обогащенный кислородом (25,6 об. % О₂, 74,4 % N₂), содержание водяных паров соответствует окружающему воздуху (около 10 г/нм³). Холодное дутье, проходя через насадку воздухонагревателя, нагревается и обе-

спечивает температуру горячего дутья (после смесителя) 1030 °С, регулируемую подачей соответствующего количества холодного дутья в течение всего цикла. При этом положение исполнительного механизма изменяется от 0 (полностью закрыт) до 20 %.

Прямые участки воздухопровода горячего дутья доменной печи № 1 футерованы огнеупорами: МКВ-72 (0,2 и 0,113 м); КЛ (1,3 – 0,114 м); ШЛ (1,0 – 0,114 м); асбестовый картон (0,05 м). Внутренний диаметр 1,6 м, наружный — 2,8 м. Длина воздухопровода горячего дутья от смесителя до ДВН-1 — 6,5 м; до ДВН-2 — 19,3 м; до ДВН-3 — 32,8 м и до ДВН-4 — 44,8 м.

В газовый период регулируются:

температура дыма на выходе из насадки — количеством воздуха и газа, либо временем газового периода;

температура купола — соотношением расходов воздуха и газа, либо соотношением богатого и бедного газов;

расход воздуха на горение — воздушным дросселем;

расхода газа — газовым дросселем.

В дутьевой период регулируются:

расход дутья (с турбовоздуходувной машины);

температура горячего дутья — дроссельным клапаном;

давление горячего дутья (с турбовоздуходувной машины).

предусмотрены контуры регулирования (стабилизация) параметров:

«Давление газа» (работает в автоматическом режиме);

«Температура горячего дутья»;

«Расход газа на каждый ДВН».

Для управления и регулирования технологического процесса используются исполнительные механизмы МЭО-630 для регулирования:

давления чистого газа на блок ДВН;

расхода газа на каждый ДВН;

расхода воздуха горения на каждый ДВН.

Реализация задач оптимального управления работой блока доменных воздухонагревателей с использованием математических моделей не предусмотрена. Входные и выходные режимные параметры технологического процесса получения горячего дутья в доменных воздухонагревателях вследствие внешних возмущений непрерывно изменяются. Поэтому для оценки эффективности управления процессом и использования скрытых резервов эффективности их необходимо исследовать. Для исследования был выбран период с 9 по 12 августа 2013 г., как наиболее характерный.

Колебания химического состава и теплотворной способности доменного газа. Колебания калорийности доменного газа, подаваемого на ДВН доменной печи № 1, составили 554 – 855 (35 %), в среднем 748 ккал/м³. Такие большие колебания калорийности доменного газа в условиях ПАО АМК можно компенсировать путем изменения подачи количества коксового или природного газа при формировании смешанного газа, подаваемого на отопление ДВН. В противном случае это будет приводить к изменению температуры продуктов сгорания и, соответственно, температуры купола в газовый период.

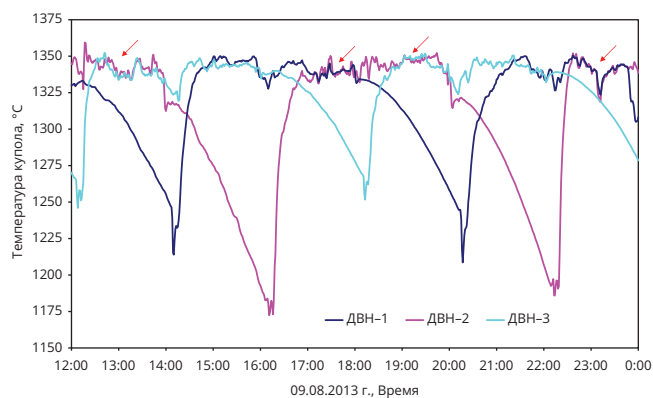


Рис. 1. Температура купола ДВН

Последовательный режим работы блока из трех ДВН, когда одновременно в газовом режиме находятся два воздухонагревателя, позволяет оценить разницу в температурах их купола в один и тот же момент времени, которая может быть следствием разного соотношения газ – воздух и, соответственно, неоптимального избытка воздуха горения, необходимого для сжигания смешанного газа текущего химического состава. На рис. 1 видно (красные стрелки), насколько мала разница температур купола воздухонагревателей, одновременно работающих в газовом периоде, и высокая корреляция температур, что является свидетельством качественного поддержания соотношения газ – воздух на разных воздухонагревателях блока.

Данный вывод можно было бы подтвердить, сравнив качество поддержания соотношения газ – воздух по отдельным воздухонагревателям на основе информации по индивидуальным расходам воздуха и газа на отдельный воздухонагреватель, однако такая информация, несмотря на ее высокую важность, отсутствует. Поэтому использовали величину общего расхода газа на блок в целом. Следует также отметить достаточно высокое качество регулирования максимальной температуры купола, которая практически не превышала предельную 1350 °С, и одновременное падение температуры ДВН-1 и ДВН-2, начиная с 23.00. Это, по-видимому, вызвано снижением калорийности доменного газа, что привело к кратковременному снижению температуры купола с 1350 до 1325 °С. Таким образом, повышение эффективности системы стабилизации калорийности смешанного газа, подаваемого на отопление блока ДВН, является одним из резервов увеличения температуры горячего дутья. Отметим, что увеличение температуры купола на каждые 10 °С в газовый период (или снижение колебаний температуры), приводит к увеличению температуры горячего дутья примерно на 8 °С.

Анализ температуры отходящих газов в поднасадочном пространстве. Максимальные температуры отходящих газов в течение цикла работы (в конце газового периода) по разным воздухонагревателям за период с 9 до 12 августа 2013 г. представлены на рис. 2 и 3, а максимальные, минимальные и средние значения, а также разница между максимальным и минимальным значением составили:

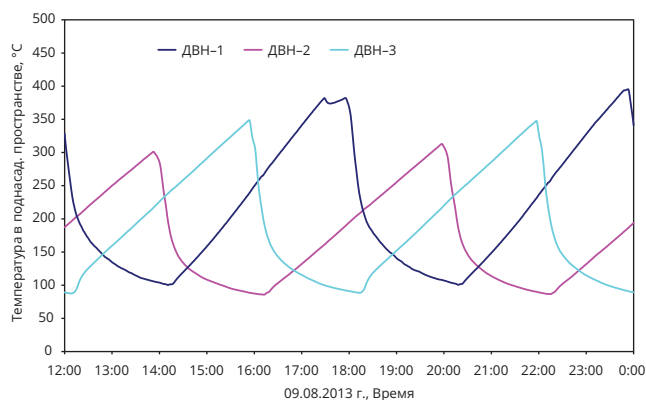


Рис. 2. Температура в поднасадочном пространстве

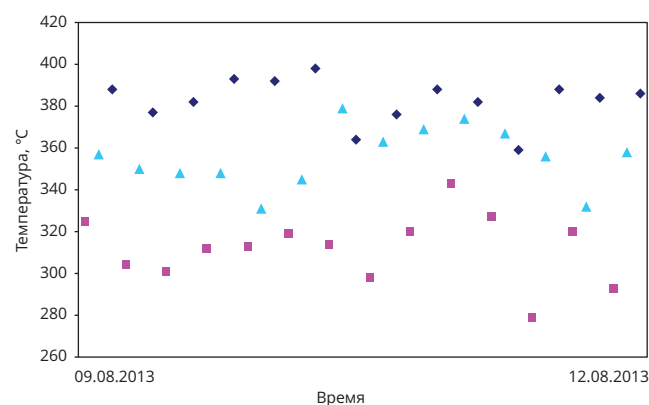


Рис. 3. Температура отходящих газов в конце газового периода (◆ — ВН1; ■ — ВН2; ▲ — ВН4)

	ДВН-1	ДВН-2	ДВН-4	Средняя температура по блоку
$t_{\min}, ^\circ\text{C}$	359	279	331	323
$t_{\max}, ^\circ\text{C}$	398	343	379	373
$t_{\text{сред}}, ^\circ\text{C}$	383	312	356	350
$\Delta t = t_{\max} - t_{\min}, ^\circ\text{C}$	39	64	48	50
$\Delta t/t_{\text{сред}} \cdot 100 \%$	10,2	20,5	13,5	14,7
Расход газа, тыс. м ³ /ч*	65	56	58	

* На основе показаний общего расхода в период переключения.

Колебания температур газов в поднасадочном пространстве в конце газового периода по разным ДВН — от 279 до 398 °С, т. е. 119 °С. При этом видно, что в среднем наиболее низкую температуру в поднасадочном пространстве имеет ДВН-2 — 312 °С, что ниже, чем у ДВН-1 (383 °С) на 71 °С, и чем у ДВН-4 (356 °С) — на 44 °С.

Возможные причины, вызывающие работу ДВН с пониженными температурами в поднасадочном пространстве:

нарушение состояния насадки ДВН (оплавление, засор, поломка и др.) и равномерности газораспределения по сечению ДВН;

повышенное аэродинамическое сопротивление ДВН; невозможность увеличения объема продуктов сгорания фильтруемого сквозь насадку ДВН в период нагрева;

некорректная установка термопары, измеряющей температуру.

Для выяснения истинных причин требуется дополнительное обследование блока с выездом специалистов на объект.

Работа с пониженными температурами в поднасадочном пространстве (менее предельной температуры 400 °С) приводит к снижению температуры горячего дутья. Превышение же предельной температуры приводит к снижению срока службы воздухонагревателя. Выполненные расчеты показывают, что увеличение температуры в поднасадочном пространстве к концу газового периода на каждые 20 °С приводит к увеличению температуры горячего дутья примерно на 10 °С.

Использование подсистемы оптимального управления позволяет снизить диапазон колебаний температуры в поднасадочном пространстве и увеличить температуру горячего дутья. Это достигается путем непрерывного (в режиме on-line) определения параметров продуктов сгорания в газовый период, которые необходимо подать в насадку ДВН, чтобы к концу газового периода обеспечить предельную температуру 400 °С в поднасадочном пространстве с учетом текущей производственной ситуации и состояния конкретного ДВН и блока в целом.

Анализ температуры купола в начале дутьевого периода. Температуры купола в начале дутьевого периода по разным воздухонагревателям представлены на рис. 4, максимальные, минимальные и средние значения, а также разница между максимальным и минимальным значением составили:

	ДВН-1	ДВН-2	ДВН-4	Средняя температура по блоку
$t_{\min}, ^\circ\text{C}$	1320	1309	1328	1319
$t_{\max}, ^\circ\text{C}$	1338	1330	1345	1338
$t_{\text{сред}}, ^\circ\text{C}$	1328	1319	1337	1338
$\Delta t = t_{\max} - t_{\min}, ^\circ\text{C}$	18	21	17	19
$\Delta t/t_{\text{сред}} \cdot 100 \%$	1,4	1,6	1,3	1,4

Анализ данных показывает, что колебания температуры купола в начале дутьевого периода по разным

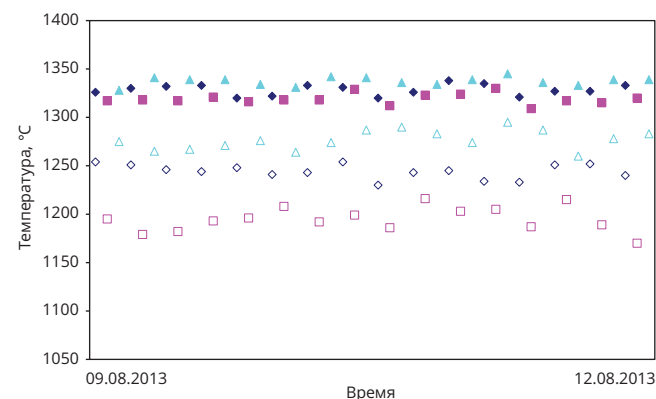


Рис. 4. Температура купола в начале и конце дутьевого периода (◆ — ВН1_{max}; ◇ — ВН1_{min}; ■ — ВН2_{max}; □ — ВН2_{min}; ▲ — ВН4_{max}; △ — ВН4_{min})

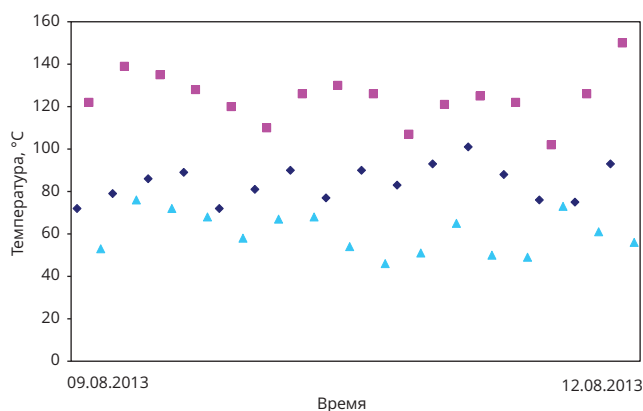


Рис. 5. Разница температур в начале и в конце периода дутья (◆ — ВН1; ■ — ВН2; ▲ — ВН4)

воздухонагревателям — от 17 до 21 °С. Относительно небольшие колебания температуры обеспечиваются хорошим качеством поддержания соотношения газ — воздух в газовом периоде. Однако, как отмечалось, есть резервы улучшения качества регулирования температуры путем стабилизации калорийности смешанного газа. Средняя температура в начале дутьевого периода по трем ДВН блока составила 1328 °С.

Анализ температуры купола в конце дутьевого периода. Температуры купола в конце дутьевого периода по разным воздухонагревателям представлены на рис. 4, максимальные, минимальные и средние значения, а также разница между максимальным и минимальным значениями составили:

	ДВН-1	ДВН-2	ДВН-4	Средняя температура по блоку
$t_{\min}, ^\circ\text{C}$	1230	1170	1260	1220
$t_{\max}, ^\circ\text{C}$	1254	1216	1295	1255
$t_{\text{сред}}, ^\circ\text{C}$	1244	1195	1277	1239
$\Delta t = t_{\max} - t_{\min}, ^\circ\text{C}$	24	46	35	35
$\Delta t/t_{\text{сред}} \cdot 100\%$	1,9	3,9	2,7	2,8

Колебания температуры купола в конце дутьевого периода по разным ДВН — от 1170 до 1295 °С. При этом отмечается более низкая (на 82 °С) средняя температура по ДВН-2 — 1195 °С против 1277 °С у ДВН-4. ДВН-4 также имеет наибольшую из максимальных температур — 1295 °С против 1216 — 1254 °С по другим ДВН.

Таким образом, ДВН-2 имеет на 49 — 82 °С более низкую температуру купола к концу дутьевого периода (1195 °С против 1244 — 1277 °С), что может быть связано как с меньшей эффективной поверхностью нагрева, меньшим количеством тепла, запасенного в газовый период (как было показано ранее, температура в поднасадочном пространстве к концу газового периода у ДВН-2 на 71 и 44 °С ниже, чем у ДВН-1 и ДВН-4 соответственно), так и с разной установкой термопар, измеряющих температуру купола, неравномерностью температур по сечению насадки.

Есть связь между температурой купола в конце дутьевого периода (см. рис. 4) и температурой отходящих

газов в конце газового периода (см. рис. 3), заключающаяся в том, что чем выше температура в конце газового периода, тем выше температура в конце дутьевого периода в следующем цикле дутья у рассматриваемого ДВН.

Анализ изменения температуры купола в дутьевой период. Результаты обобщения данных по падению температуры купола в дутьевой период от начала периода дутья до его завершения представлены на рис. 5 и следующими показателями:

	ДВН-1	ДВН-2	ДВН-4	Средняя температура по блоку
$t_{\min}, ^\circ\text{C}$	72	102	46	73
$t_{\max}, ^\circ\text{C}$	101	150	76	109
$t_{\text{сред}}, ^\circ\text{C}$	84	124	60	90
$\Delta t = t_{\max} - t_{\min}, ^\circ\text{C}$	29	48	30	36
$\Delta t/t_{\text{сред}} \cdot 100\%$	34,5	38,6	49,6	40,9

Максимальное падение температуры купола за период дутья наблюдается у ДВН-2 — 124 °С против 60 и 84 °С у ДВН-4 и ДВН-1 соответственно. Возможные причины данного явления перечислены в предыдущем разделе.

Анализ данных работы промышленного блока воздухонагревателей доменной печи № 1 ПАО АМК позволил сделать следующие выводы:

достаточно высокое качество регулирования соотношения газ — воздух, о чем можно судить по температурам купола в газовый период одновременно работающих на нагреве воздухонагревателей;

есть резервы повышения качества регулирования калорийности смешанного газа, что наряду с высокими колебаниями калорийности доменного газа (35 %) приводит к синхронным провалам температуры купола в газовый период ДВН, стоящих в текущий момент на нагреве;

потери температуры горячего дутья, вызванные большими колебаниями температур в поднасадочном пространстве в конце газового периода, достигающие 39 — 64 °С. Использование подсистемы оптимального управления «Верхний имитационно-оптимизирующий уровень АСУТП доменных воздухонагревателей» [1] для стабилизации температуры в поднасадочном пространстве к концу газового периода на требуемом уровне позволит увеличить температуру горячего дутья примерно на 10 °С на каждые 20 °С увеличения температуры в поднасадочном пространстве к концу газового периода. Это достигается путем непрерывного (в режиме on-line) определения параметров продуктов сгорания в газовый период, которые необходимо подать в насадку ДВН, чтобы к концу газового периода обеспечить требуемую предельную температуру 400 °С в поднасадочном пространстве, с учетом текущей производственной ситуации и состояния конкретного ДВН и блока в целом;

требует дополнительных исследований работа ДВН-4 и особенно ДВН-2 с максимальными температурами в поднасадочном пространстве 312 и 355 °С

соответственно, имеющими расход газа в газовый период на 10 – 15 % ниже, чем ДВН-1;

ДВН-2 имеет наибольшее падение температуры купола в период дутья, достигающее 124 °С против 84 и 60 °С у ДВН-1 и ДВН-4 соответственно. Такие различия позволяют с помощью подсистемы «Верхний имитационно-оптимизирующий уровень АСУТП доменных воздухонагревателей» определять оптимальное время на дутье того или иного ДВН для максимизации температуры горячего дутья [1], а также выполнять оптимизирующие теплотехнические расчеты.

Выполнение теплотехнических расчетов. Для выполнения оптимизирующих расчетов с целью увеличения температуры горячего дутья с помощью математической модели ОАО «ВНИИМТ» [1, 2] необходимо рассчитать теплообмен в насадке и определить температурные поля газа и материала по высоте ярусов и во времени, а также температур газа на выходе из насадки.

Расчеты выполнены для следующих четырех режимов: базовый (температура холодного дутья 60 °С, режим 1); при увеличении температуры холодного дутья с 60 до 200 °С (режим 2); при увеличении температуры холодного дутья с 60 до 200 °С с приведением максимальной температуры в поднасадочном пространстве к нормативной (400 °С) уменьшением расхода газа, при длительности цикла, аналогичной базовому режиму (режим 3); при увеличении температуры холодного дутья с 60 до 200 °С с приведением максимальной температуры в поднасадочном пространстве к нормативной (400 °С) сокращением длительности цикла с расходом газа, аналогичным базовому режиму (режим 4).

Изменение температуры холодного дутья с 60 до 200 °С (режим 2) без изменения других параметров приводит к увеличению температуры в поднасадочном пространстве до 494 °С, что не допустимо. Поэтому на режиме 3 был снижен расход газа в газовый период с 55,0 до 49,6 м³/ч. Это обеспечило требуемую температуру в поднасадочном пространстве (396 °С). При этом температура горячего дутья перед смесительным

клапаном в конце дутьевого периода снизится с 1045 до 980 °С. Если воздухонагреватели в газовый период оставить работать с расходом газа, соответствующим базовому режиму, то дутьевой период сократится с 1 ч 40 мин до 1 ч 10 мин, т. е. на 30 мин и, соответственно, изменится продолжительность газового периода (режим 4). В этом случае температура горячего дутья перед смесительным клапаном в конце дутьевого периода увеличится с 1045 до 1092 °С.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнены теплотехнические расчеты режимов работ воздухонагревателей доменной печи № 1 ПАО «Алчевский металлургический комбинат» при повышении температуры холодного дутья с 60 до 200 °С. Показано, что повышение температуры холодного дутья при одинаковой длительности цикла работы воздухонагревателей и максимальной температуре в поднасадочном пространстве приводит к необходимости снижения расхода газа в газовый период (примерно на 10 %). При этом температура горячего дутья перед смесителем в конце дутьевого периода снижается с 1045 до 980 °С.

В случае же, если расход газа оставить соответствующим базовому режиму, то для снижения температуры в поднасадочном пространстве необходимо дутьевой период сократить примерно на 30 мин. Это приведет к увеличению температуры горячего дутья перед смесителем в конце дутьевого периода с 1045 до 1092 °С.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Буткарев А. А., Буткарев А. П., Птичников А. Г. и др. Увеличение температуры горячего дутья доменных воздухонагревателей с помощью подсистемы оптимального управления // Сталь. 2015. № 3. С. 28 – 34.
2. Шкляр Ф. Р., Малкин В. М., Каштанов С. П. и др. Доменные воздухонагреватели (конструкции, теория, режимы работы). — М.: Металлургия, 1982. — 176 с.

Статья поступила 23.03.2020

Контактная информация

Данная статья опубликована в журнале Сталь № 5, 2020 г., посвященном 90 летнему юбилею научно-исследовательского института металлургической теплотехники ОАО «ВНИИМТ». Институт ВНИИМТ предлагает эффективные технологии переработки металлургического сырья и энергоэффективные печные агрегаты, горелочные устройства для металлургии и машиностроения.

Если Вас заинтересовала информация, представленная в данной статье, Вы можете обратиться по следующим координатам.

ОАО «Научно-исследовательский институт металлургической теплотехники»
(ОАО «ВНИИМТ»).

620137, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. Студенческая, д. 16

Генеральный директор

Зайнуллин Лик Анварович

Тел. +7 (343) 374-03-80

Факс.: +7 (343) 374-29-23

Email: aup@vniimt.ru

www.vniimt.ru