

УДК 669.536

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА В ШАХТНЫХ ПЕЧАХ ДЛЯ ОБЖИГА ИЗВЕСТНЯКА

**Матюхин В.И.**, к.т.н., доцент кафедры «Теплофизика и информатика в металлургии»  
**Ярошенко Ю.Г.**, д.т.н., профессор кафедры «Теплофизика и информатика в металлургии»  
**Журавлев С.Я.**, аспирант кафедры «Теплофизика и информатика в металлургии» (stepan.zhuravlyov@gmail.com)  
**Морозова Е.В.**, студент кафедры «Теплофизика и информатика в металлургии»  
**Матюхина А.В.**, к.т.н., доцент кафедры «Стандартизация и сертификация»

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина  
(620002, Россия, Екатеринбург, ул. Мира, 19)

**Аннотация.** Одно из направлений совершенствования технологий обжига известняка в шахтных печах связано с улучшением условий горения природного газа при сжигании его непосредственно в слое материала. Для реализации такой технологии необходимо обеспечить развитие двух параллельных процессов: подготовительного, при котором происходит формирование исходной газо-воздушной смеси и подогрев ее до температуры воспламенения, и основного, в течение которого происходит слоевое горение газообразного топлива. При фурменной подаче воздушного дутья и соосной струйной подаче газообразного топлива под повышенным давлением при наличии на пути струй газопроницаемой насадки более мощный газовый поток (природный газ), вытекающий из сопла с высокой скоростью во внешнюю среду, создает условия для эжектирования воздушного потока. Внутри кольцевого пространства между потоками формируется зона горения, на внутренней и внешней стороне которой возникают циркуляционные вихри, направленные вдоль оси струи к соплу, улучшающие стабильность воспламенения газо-воздушной смеси. Значительная дальнобойность турбулентных струй при повышенных давлениях газовой среды, а также возможность достаточного (полного) их перемешивания в пограничном слое, открывает возможность формирования газозвушной смеси заданного состава вдоль фронта факельного процесса движения газовых струй. Для воспламенения газового потока в слое необходимо обеспечить его предварительный подогрев как минимум до температуры 800 – 1050 °С с использованием источника тепла, располагаемого вблизи его входа. Энергоэффективность этого направления подтверждена экспериментальными исследованиями на шахтной печи с диаметром рабочего пространства 3 м. По результатам экспериментального зондирования отапливаемой зоны шахтной печи для обжига известняка в режиме слоевого способа сжигания природного газа были установлены закономерности изменения температурного поля обжигаемого слоя с формированием максимума температур 1200 °С на расстоянии 200 мм от среза сопла. Глубина формирования зоны горения ограничивалась уровнем 110 мм с распространением области высоких температур на расстояние до 1000 мм. Установлена технологическая возможность формирования области высоких температур с уровнем 1100 – 1600 °С при протяженности высокотемпературной зоны вглубь в пределах до 2000 мм.

**Ключевые слова:** шахтная печь; природный газ; распределение температур в печи вблизи газового сопла, по радиусу печи, по периметру печи; расход условного топлива.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-1-13-18

В технологиях черной и цветной металлургии, частично стройиндустрии, химической отрасли и энергетики используется значительное количество рудных и нерудных материалов различного минералогического и гранулометрического состава. Для получения конечного продукта требуемого качества значительная их часть подвергается тепловой обработке с целью осуществления необходимых физико-химических процессов в шахтных печах различного типа, работающих в режиме плотного слоя кусковых материалов. От степени завершенности этих процессов в существенной мере зависят технико-экономические показатели всего производства.

Обычно источниками тепловой энергии в печах подобного типа являются твердое топливо – кокс, уголь или комбинированное топливо – твердое и природный газ. В последнее время исследования по совершенство-

ванию тепловой работы шахтных печей направлены на увеличение доли природного газа вплоть до исключения из состава шихты шахтных печей дорогостоящего кокса.

Использование слоевого способа сжигания природного газа непосредственно в плотном слое нагреваемых материалов является одним из направлений повышения эффективности нагрева кусковых материалов, а в некоторых технологиях и их плавления в шахтных печах.

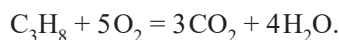
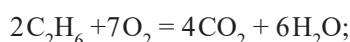
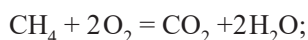
В этих условиях практика эксплуатации шахтных печей различного типа также руководствуется закономерностями развития процессов тепломассообмена и газодинамики [1 – 4], где основной принцип – чем лучше газ и материалы соприкасаются между собой при движении в шахте, тем выше завершенность теплообмена между ними. Руководствуясь этим принципом, добиваются, чтобы каждая единица твердых компонен-

тов в слое активно обрабатывалась теплоносителем – продуктами горения топлива.

Для реализации такой технологии необходимо обеспечить развитие двух параллельных процессов: подготовительного, при котором формируется начальная газозвудушная смесь и ее подогрев до температуры воспламенения, и основного, когда происходит слоевое горение газообразного топлива.

В лабораторных и промышленных условиях работы слоевых установок и шахтных печей [5 – 7] была установлена возможность слоевого способа сжигания природного газа в плотном слое шихтовых материалов с различным химическим составом как при избытке, так и при недостатке расхода воздуха на горение. Оптимальная величина коэффициента расхода воздуха, а также условия перемешивания потока природного газа и воздуха обеспечивают стабильное температурное поле, необходимое для обработки требуемых участков слоя. Поскольку горение газа протекает без контакта с футеровкой печи (внутри слоя шихты), то происходит снижение его общих тепловых потерь.

Сжигание природного газа в плотном слое кусковых материалов при соответствующем количестве кислорода проходит в режиме полного горения горючих компонентов газа – метана, этана и пропана с образованием продуктов их окисления:



При фурменной подаче воздушного дутья и соосной струйной подаче газообразного топлива под повышенным давлением при наличии на пути струй газопроницаемой насадки кусковых материалов характер движения газовых потоков практически не меняется [8 – 10]. Некоторые изменения приводят к сокращению дальности струй и увеличению угла раскрытия факела. При этом внешние границы расширяющегося струйного потока формируют центральный угол его раскрытия в пределах 17 – 32°.

Согласно теории развития турбулентных одиночных и соосных струй, поток более мощной среды (природный газ), вытекающий из сопла с высокой скоростью во внешнюю среду, воздух которой движется с меньшей скоростью, создает условия для эжектирования воздушного потока. Поскольку внутри газовой струи нет среды для удовлетворения ее эжектирующих потребностей, то давление в этой зоне падает. Внутри кольцевого пространства между потоками формируется зона горения (рис. 1), на внутренней и внешней стороне которой возникают циркуляционные вихри, направленные вдоль оси струи к соплу [11 – 15], улучшающие стабильность воспламенения газозвудушной смеси.

При распространении двух коаксиальных струй: центральной – природного газа, и кольцевой – воздуха для горения, образуются два циркуляционных вихря по обе стороны зоны образования газозвудушной смеси и горения (рис. 1). Поскольку отношение скорости кольцевой струи к скорости центральной струи увеличивается, то на ее оси происходит более быстрое падение аксиальной скорости. Данное соотношение скоростей также влияет на распределение концентрации газовых компонентов внутри зоны горения и образования газозвудушной смеси.

Значительная дальность турбулентных струй при повышенных давлениях газовой среды, а также возможность достаточного (полного) перемешивания встречающихся в пограничном слое газовых сред открывают возможность формирования газозвудушной смеси заданного состава вдоль фронта факельного процесса движения общей газовой струи, образующегося у среза фурм. Распространение этого фронта в глубину слоя шихты определяется преимущественно условиями движения центральной газовой струи, ее дальностью и степенью перемешивания с коаксиальным потоком воздуха.

В основе слоевого способа сжигания природного газа лежат явления адсорбции молекул кислорода на поверхности твердых компонентов слоя [16]. В результате количество кислорода в газовой смеси вблизи источника воспламенения сокращается, затрудняя воспламенение и горение газа. Сам процесс горения осуществляется в зоне протяженностью не менее 40 – 60 мм [13]. Поэтому одно из условий организации режима горения газа в слое шихты заключается в использовании воздуха, количество которого лежит выше значений коэффи-

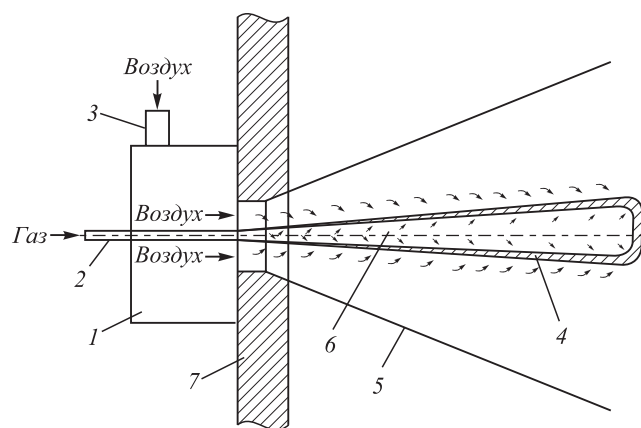


Рис. 1. Схема развития процесса сжигания газа в слое при струйной подаче газовых компонентов:

- 1 – корпус горелки; 2 – газовое сопло; 3 – воздушный патрубок;
- 4 – зона образования газозвудушной смеси и горения; 5 – воздушная струя; 6 – газовая струя; 7 – корпус печи

Fig. 1. Scheme of gas combustion process in the layer at jet feed of gas components

- 1 – tuyere body, 2 – gas nozzle, 3 – air tube, 4 – formation of the gas-air mixture and combustion zone; 5 – air jet, 6 – gas jet, 7 – furnace body

циента расхода воздуха  $\alpha = 2,0 - 2,5$ . После подогрева адсорбированного кислорода до величины активации его молекулы десорбируют, вовлекаются в процесс горения, распространяя процесс генерации тепла на удаленные от среза фурм слои компонентов шихты. В итоге происходит увеличение протяженности зоны горения. При повышении скорости потока газа процесс перемешивания и горения газовых компонентов (метана, этана и пропана) и воздуха интенсифицируется при сокращении ширины зоны горения.

При недостатке воздуха для окисления газовых компонентов процесс горения сосредотачивается в первую очередь в той области слоя шихты, где обеспечивают условия сжигания природного газа. Остальная часть газообразного топлива не сгорает и удаляется с продуктами горения. При использовании в шахтной печи комбинированного топлива (твердого и газообразного), в слое будет происходить также и окисление углерода кокса избыточным кислородом, поступающим к твердому топливу из зоны горения газообразного топлива. При этом, благодаря высоким значениям коэффициента расхода воздуха, условия горения твердого топлива не ухудшаются. Если иметь в виду, что температура воспламенения природного газа составляет около  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а та же характеристика для углерода твердого топлива –  $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ , то совершенно очевидно, что реакции горения природного газа являются приоритетными. Однако присутствие в слое шихты твердого топлива обеспечивает возможность адсорбированному кислороду вступать во взаимодействие с твердым углеродом, что растягивает процесс тепловыделений на больший объем слоя по ходу движения газов и, как следствие, благоприятно сказывается на развитии тепловых и массообменных процессов в шахте печи.

Для воспламенения газового потока в слое необходимо обеспечить его предварительный подогрев как минимум до температуры  $800 - 1050\text{ }^{\circ}\text{C}$  [11, 17 – 20]. Источник воспламенения должен располагаться вблизи среза сопла на выходе газовых струй в нагреваемый слой, что обеспечивается в результате факельного разогрева продуктами полного горения газа слоя шихты, движущегося сверху. Чем ближе к срезу сопла располагается зона воспламенения газозвушной смеси, тем лучше достигается равномерное распределение температуры горящего факела вдоль его длины. При этом протяженность предварительной зоны обеспечивает разогрев газозвушной смеси до температуры воспламенения, при которой тепловыделения превышают теплопоглощение в слое.

Условия подогрева исходной газозвушной смеси на участке выхода природного газа в слой зависят от массовой скорости газов, условий перемешивания и уровня разогрева участка слоя, прилегающего к срезу газового сопла. После нагрева слоя шихты до заданной температуры достигается стабильный режим сжигания природного газа в слое шихты.

Исследование технологических возможностей слоевого сжигания природного газа было осуществлено на шахтной печи обжига известняка, диаметр рабочего пространства которой равен 3 м. Подачу природного газа через фурму шахтной печи иллюстрирует рис. 1. Горелочное устройство типа ГП для реализации процесса обжига известняка представляет собой металлическую конструкцию 1 с центральным газовым соплом 2, через которую подается холодный природный газ с давлением около 300 кПа и тангенциальным подводом вентиляторного воздуха 3 через выходное сопло горелки диаметром 426 мм с температурой около  $360\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Для изучения особенностей изменения температурного поля в обжигаемом слое в отапливаемой зоне печи через гляделку одной из используемых горелок устанавливали металлическую трубу с внутренним диаметром 15 мм, которую перемещали по слою в горизонтальном направлении. Место ввода зонда выбиралось на расстоянии примерно 80 мм от внутренней стенки центральной трубы горелки. Перемещение зонда распространялось вглубь слоя на расстояние до 1600 мм с интервалом между измерениями тепловых и химических параметров печной среды 200 мм. Для определения температуры слоя в точке измерения использовали термопару ТХА, установленную в металлическом зонде. Исследования выполнялись в режиме слоевого сжигания природного газа при коэффициенте расхода воздуха 1,52 и скорости выхода газов из горелки 2,97 м/с.

Характер изменения температурного поля на расстоянии на срезе носика горелочного устройства, полученного с помощью штыковой термопары градуировки ТХА, представлен на рис. 2, а. Анализ этих результатов показал, что температурное поле слоя в этой области отличается существенной неравномерностью с максимумом температуры в районе первого квадранта. Это связано в первую очередь с распределением воздушного потока, который при движении по вращательной траектории (тангенциальный подвод) охлаждает слой известняка в нижней части выходного патрубка горелки и снижает температурные условия его разогрева. По мере удаления места измерения от среза носика горелки (рис. 2, б) происходит постепенное увеличение температуры слоя, а на расстоянии 200 мм наблюдается стабилизация на уровне  $1200 - 1400\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Протяженность этой зоны в слое определяет ширину зоны горения природного газа.

По результатам экспериментального зондирования отапливаемой зоны шахтной печи для обжига известняка в режиме слоевого способа сжигания природного газа были также установлены закономерности изменения температурного поля обжигаемого слоя (рис. 2, б). Эти исследования отражают изменение температуры в горизонтальном направлении (параллельно оси горелки в точке Т (рис. 2, а)). На их основе установлено, что по мере удаления в слой шихты от

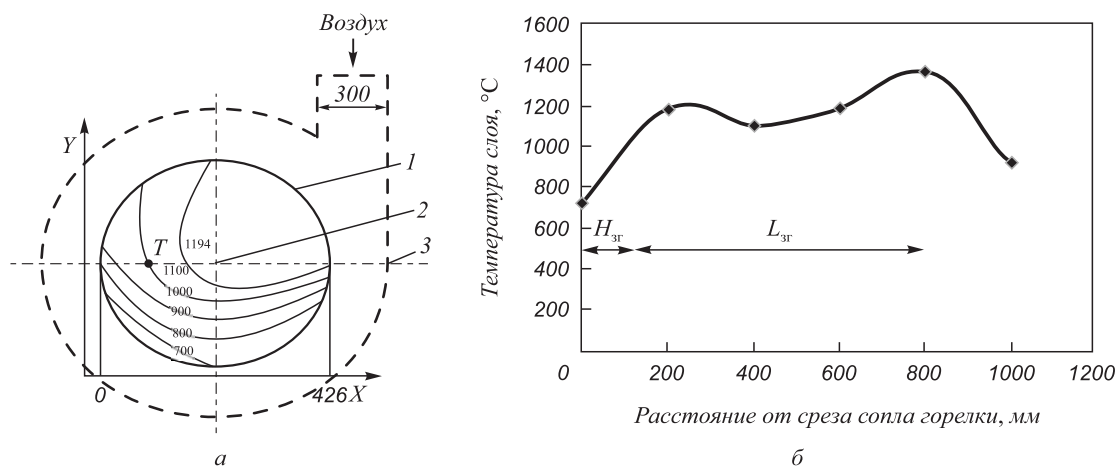


Рис. 2. Изменение температурного поля (цифры у кривых, °С) на срезе ввода природного газа (а): 1 – выходное сопло горелки диаметром 426 мм; 2 – газовое сопло; 3 – корпус горелки; Т – точка зондирования температурного поля и по длине газового факела (б):  $H_{гр}$  – глубина формирования высокотемпературной зоны горения;  $L_{гр}$  – протяженность зоны горения в направлении зондирования

Fig. 2. Changing of the temperature field (figures on the curves, °С) on a section of natural gas input (а): 1 – tuyere outlet nozzle (diameter 426 mm); 2 – gas nozzle; 3 – burner body; Т – temperature field sensing point and along the length of gas flame (б):

$H_{гр}$  – depth of formation of the high-temperature combustion zone;  $L_{гр}$  – length of the combustion zone in the direction of sensing

среза сопла горелки происходит повышение температуры и на расстоянии примерно 200 мм наблюдается первый максимум, равный 1200 °С, а на расстоянии около 800 мм располагается второй максимум температуры – 1400 °С, определяющий протяженность высокотемпературной зоны. Если считать (на основании опыта слоевого сжигания газа [13]) температуру воспламенения газа в слое 1050 °С, то глубина формирования зоны горения в исследуемом месте составляет около 110 мм.

В рабочем пространстве печи между горелочными устройствами существуют ограниченные зоны (рис. 3) объемом примерно 0,024 м<sup>3</sup> (конус диаметром 0,9 м и высотой около 350 мм), в которых наблюдаются пониженные температуры (около 1000 °С). При этом на расстоянии около 1000 мм от внутренней стенки печи обеспечивается средняя температура обжига около 1200 °С.

Изменение температурных условий обжига кусковых материалов и протяженность распространения зоны высокотемпературной теплогенерации можно осуществлять, варьируя скорость выхода газозвушной смеси из горелочного устройства, соотношение между массовыми потоками газа и воздуха, а также условиями перемешивания используемых газовых сред.

За время исследований технологии получения извести в шахтной печи при использовании в качестве топлива природного газа, расход условного топлива на тонну получаемого продукта составил около 140 кг/т, что соответствует наилучшим показателям работы известково-обжигательных печей.

Таким образом, использование слоевого способа сжигания природного газа является эффективным

и безопасным вариантом управления режимом слоевого обжига кусковых материалов с возможностью изменения уровня максимальных температур от 1100 до 1600 °С при протяженности высокотемпературной зоны в пределах до 2000 мм. Возможность изменения

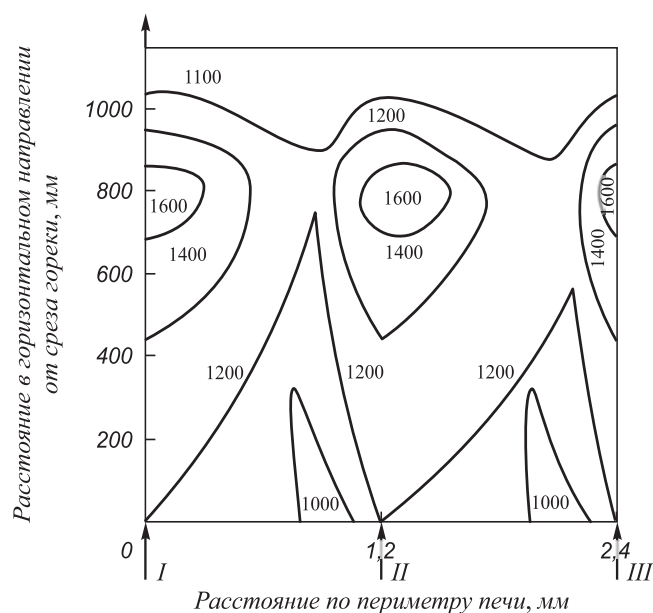


Рис. 3. Изменение температурного поля в слое известняка в горизонтальном направлении (цифры у кривых – температура слоя, °С) в отопляемой зоне шахтной печи: I, II, III – места установки горелочных устройств

Fig. 3. Change of temperature field in a layer of limestone in the horizontal direction (numbers on curves – layer temperature, °С) in the heated zone of the shaft furnace: I, II, III – emplacement points of tuyeres

соотношения расходов воздуха и природного газа в широком диапазоне позволяет изменять состав газовой атмосферы в обжигаемой части слоя.

**Выводы.** Сжигание природного газа в плотном слое кускового материала шахтной печи дает возможность обеспечить:

- сохранение температурно-временных условий в шахтной печи для протекания технологических процессов получения качественного продукта – извести;
- выполнение технологических требований к качеству обожженного продукта;
- снижение удельного расхода топлива;
- снижение вредных выбросов парниковых газов в окружающую среду.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Телегин А.С., Швыдкий В.С., Ярошенко Ю.Г. Теплообмен / Под ред. Ю.Г. Ярошенко. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2002. – 455 с.
2. Hannes Piringier. Lime shaft kilns // *Energy Procedia*. 2017. Vol. 120. August. P. 75 – 95.
3. Hui Dong, Jiu-ju Cai, Guo-sheng Wang etc. Experimental study on gas flow distribution affected by constructional parameters of pelletizing shaft furnace // *Journal of Northeastern University (Natural Science)*. 2004. Vol. 24. No. 6. P. 563 – 566.
4. Chuan Cheng, Eckehard Specht. Reaction rate coefficients in decomposition of lumpy limestone of different origin // *Thermochimica Acta*. 2006. Vol. 449. Issues 1 – 2. P. 8 – 15.
5. Лисиенко В.Г., Лобанов В.И., Китаев Б.И. Теплофизика металлургических процессов. – М.: Металлургия, 1982. – 240 с.
6. Механика жидкости и газов / В.С. Швыдкий, Ю.Г. Ярошенко, Я.М. Гордон и др. / Под ред. В.С. Швыдкого. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2003. – 464 с.
7. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. – М.: Наука: Гл. ред. физ.-мат. лит., 1991. – 690 с.
8. Rong W.J., Li B.K., Qi F.S. Combustion characteristics of calcium carbide furnace off-gas in a new type combustor of twin burn annular shaft kiln. Dongbei Daxue Xuebao // *Journal of Northeastern University*. 2018. Vol. 39. No. 2. P. 200 – 204.
9. Rong W.J., Li B.K., Qi F.S., Cheung S.C.P. Energy and exergy analysis of an annular shaft kiln with opposite burners // *Applied Thermal Engineering*. 2017. Vol. 119. P. 629 – 638.
10. Донсков Е.Г., Лялюк В.П., Донсков А.Д. Газодутьевой режим и распределение газа в доменных печах // *Сталь*. 2014. № 3. С. 12 – 17.
11. Senegačnik A., Oman J., Širok B. Analysis of calcination parameters and the temperature profile in an annular shaft kiln. Part 1: Theoretical survey // *Applied Thermal Engineering*. 2007. Vol. 27. No. 7 – 8. P. 1467 – 1472.
12. Теория и практика интенсификации технологического процесса в шахтных агрегатах малого диаметра / И.Ф. Селянин, А.В. Феоктистов, С.А. Бедарев. – М.: Теплотехник, 2010. – 379 с.
13. Матюхин В.И., Лобанов В.И., Гордон Я.М. Исследование условий формирования зоны горения газа в слое железорудных окатышей // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 1982. № 11. С. 18 – 21.
14. Гордон Я.М., Швыдкий В.С., Принц М.Я. и др. Влияние способа ввода дутья на равномерность газораспределения в шахтных печах // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 1984. № 10. С. 103 – 106.
15. Senegačnik A., Oman J., Širok B. Analysis of calcination parameters and the temperature profile in an annular shaft kiln. Part 2: Results of tests // *Applied Thermal Engineering*. 2007. Vol. 27. No. 7 – 8. P. 1473 – 1482.
16. Гордон Я.М., Лобанов В.И., Матюхин В.И. Особенности изменения основных характеристик процесса горения газа в плотном слое с коэффициентом расхода воздуха, меньшим единицы. Сообщ. 1 // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 1982. № 12. С. 101 – 105.
17. Кнорре Г.Ф., Палеев И.И. Теория точечных процессов / Под ред. Г.Ф. Кнорре. – М.-Л.: Энергия, 1966. – 491 с.
18. Лисиенко В.Г., Щелоков Я.М., Ладыгичев М.Г. Топливо. Рациональное сжигание, управление и технологическое использование: Справочное издание. – М.: Теплотехник, 2002. – 688 с.
19. Senegačnik A., Oman J., Širok B. Annular shaft kiln for lime burning with kiln gas recirculation // *Applied Thermal Engineering*. 2008. Vol. 28. No. 7. P. 785 – 792.
20. Schwertmann T. Thermodynamic aspects of the counterflow lime burning process. Part 1 // *ZGK International*. 2004. Vol. 57. No. 8. P. 48 – 58.

Поступила в редакцию 6 ноября 2018 г.  
После доработки 17 января 2020 г.  
Принята к публикации 21 января 2020 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2020. VOL. 63. NO. 1, pp. 13–18.

## TECHNOLOGICAL POSSIBILITIES OF USING NATURAL GAS IN SHAFT FURNACES FOR LIMESTONE ROASTING

*V.I. Matyukhin, Yu.G. Yaroshenko, S.Ya. Zhuravlev, E.V. Morozova, A.V. Matyukhina*

Ural Federal University named after the first President of Russia  
B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

**Abstract.** One of the ways to improve the technology of limestone roasting in shaft furnaces is associated with improvement of conditions of combustion with natural gas when burning it directly in the layer. To implement this technology, it is necessary to ensure the development of two parallel processes: preparatory, in which the initial gas-air mixture is formed and heated to the ignition temperature, and the main one, during which a layer of combustion of gaseous fuel occurs. At air-blast tuyere feed and at coaxial jet supply of gaseous fuel under increased pressure when there are gas permeable nozzles in the path, a more powerful gas flow (natural gas) flows out of the nozzle at high speed into the external environment. It creates conditions for air flow ejection.

Inside the annular space between the streams, a combustion zone is formed, on the inner and outer side of which there are circulating vortices directed along the axis of the jet to the nozzle. It improves stability of the gas-air mixture ignition. The considerable range of turbulent jets (at elevated pressures of the gaseous medium), as well as the possibility of sufficient complete mixing in the boundary layer, opens up the possibility of forming a gas-air mixture of a given composition along the front of the flare process, the movement of gas jets. To ignite the gas flow in the layer, it is necessary to ensure its preheating at least to a temperature of 800 – 1050 °C using a heat source located near its entrance. Energy efficiency of this direction is confirmed by experimental studies on a shaft furnace with a working space with diameter of 3 m. According to the results of experimental sounding of the heated zone of a limestone shaft furnace (in the mode of layer burning of natural gas), regularities were established in changing the temperature field of the burning layer with the formation of maximum temperature of 1200 °C at a distance of 200 mm from the nozzle section. The depth of

formation of the combustion zone was limited to the level of 110 mm with the spread of the region of high temperatures over a distance of up to 1000 mm. Technological possibility of forming a region of high temperatures of 1100 – 1600 °C with a length of the high-temperature zone up to 2000 mm was established.

**Keywords:** shaft furnace; natural gas; distribution of temperatures in the furnace; near a gas nozzle, on furnace radius, on furnace perimeter; specific fuel consumption.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2020-1-13-18

## REFERENCES

- Telegin A.S., Shvydkii V.S., Yaroshenko Yu.G. *Teplomassoperenos* [Heat and mass transfer]. Moscow: Akademkniga, 2002, 455 p. (In Russ.).
- Hannes Piringer. Lime shaft kilns. *Energy Procedia*. 2017, vol. 120, August, pp. 75–95.
- Hui Dong, Jiu-ju Cai, Guo-sheng Wang, etc. Experimental study on gas flow distribution affected by constructional parameters of pelletizing shaft furnace. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*. 2004, vol. 24, no. 6, pp. 563–566.
- Chuan Cheng, Eckehard Specht. Reaction rate coefficients in decomposition of lumpy limestone of different origin. *Thermochimica Acta*. 2006, vol. 449, no. 1–2, pp. 8–15.
- Lisienko V.G., Lobanov V.I., Kitaev B.I. *Teplofizika metallurgicheskikh protsessov* [Thermal physics of metallurgical processes]. Moscow: Metallurgiya, 1982, 240 p. (In Russ.).
- Shvydkii V.S., Yaroshenko Yu.G., Gordon Ya.M., Shavrin V.S., Noskov A.S. *Mekhanika zhidkosti i gazov* [Mechanics of liquid and gases]. Moscow: Akademkniga, 2003, 464 p. (In Russ.).
- Abramovich G.N. *Prikladnaya gazovaya dinamika* [Applied gas dynamics]. Moscow: Nauka, 1991, 690 p. (In Russ.).
- Rong W.J., Li B.K., Qi F.S. Combustion characteristics of calcium carbide furnace off-gas in a new type combustor of twin burn annular shaft kiln. Dongbei Daxue Xuebao. *Journal of Northeastern University*. 2018, vol. 39, no. 2, pp. 200–204.
- Rong W.J., Li B.K., Qi F.S., Cheung S.C.P. Energy and exergy analysis of an annular shaft kiln with opposite burners. *Applied Thermal Engineering*. 2017, vol. 119, pp. 629–638.
- Donskov E.G., Lyalyuk V.P., Donskov A.D. Gas behavior in blast furnaces. *Steel in Translation*. 2014, vol. 44, no. 3, pp. 209–214.
- Senegačnik A., Oman J., Širok B. Analysis of calcination parameters and the temperature profile in an annular shaft kiln. Part 1: Theoretical survey. *Applied Thermal Engineering*. 2007, vol. 27, no. 7-8, pp. 1467–1472.
- Selyanin I.F., Feoktistov A.V., Bedarev S.A. *Teoriya i praktika intenzifikatsii tekhnologicheskogo protsessa v shakhtnykh agregatakh malogo diametra* [Theory and practice of intensification of technological process in small-diameter shaft aggregates]. Moscow: Teplotekhnika, 2010, 379 p. (In Russ.).
- Matyukhin V.I., Lobanov V.I., Gordon Y.M. Conditions of formation of gas burning zone in the layer of iron ore pellets. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1982, vol. 25, no. 11, pp. 18–21. (In Russ.).
- Gordon Ya.M., Shvydkii V.S., Prints M.Ya., etc. Influence of the method of blast feed on gas distribution uniformity in shaft furnaces. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1984, vol. 27, no. 10, pp. 103–106. (In Russ.).
- Senegačnik A., Oman J., Širok B. Analysis of calcination parameters and the temperature profile in an annular shaft kiln. Part 2: Results of tests. *Applied Thermal Engineering*. 2007, vol. 27, no. 7-8, pp. 1473–1482.
- Gordon Ya.M., Lobanov V.I., Matyukhin V.I. Features changes in basic characteristics of gas burning in a dense layer with a coefficient of air flow less than one. Part 1. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1982, vol. 25, no. 12, pp. 101–105. (In Russ.).
- Knorre G.F., Paleev I.I. *Teoriya topochnykh protsessov* [Theory of burning processes]. Moskva, Leningrad: Energiya, 1966, 491 p. (In Russ.).
- Lisienko V.G., Schelokov, Ya.M., Ladygichev M.G. *Ratsional'noe szhiganie, upravlenie i tekhnologicheskoe ispol'zovanie: spravochnoe izdanie* [Fuel. Rational combustion, management and technological use: Reference book]. Moscow: Teplotekhnika, 2002, 688 p. (In Russ.).
- Senegačnik A., Oman J., Širok Br. Annular shaft kiln for lime burning with kiln gas recirculation. *Applied Thermal Engineering*. 2008, vol. 28, no. 7, pp. 785–792.
- Schwertmann T. Thermodynamic aspects of the burning process. Part 1. *ZGK International*. 2004, vol. 57, no. 8, pp. 48–58.

## Information about the authors:

**V.I. Matyukhin**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Thermal Physics and Informatics in Metallurgy”

**Yu.G. Yaroshenko**, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Thermal Physics and Informatics in Metallurgy”

**S.Ya. Zhuravlev**, Postgraduate of the Chair “Thermal Physics and Informatics in Metallurgy” (stepan.zhuravlyov@gmail.com)

**E.V. Morozova**, Student of the Chair “Thermal Physics and Informatics in Metallurgy”

**A.V. Matyukhina**, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Standardization and Certification”

Received November 6, 2018

Revised January 17, 2020

Accepted January 21, 2020