

ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛОВОЙ РАБОТЫ ВАГРАНКИ С ЗАКРЫТЫМ КОЛОШНИКОМ ДЛЯ ПЕРЕПЛАВА МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ

В связи с расширением использования технологического оборудования итальянской фирмы «Gamma meccanica» для производства теплоизоляционных минераловатных изделий проанализированы конструктивные особенности и технологические параметры эксплуатации ваграночного комплекса оборудования. Показаны ограничения дутьевых средств ваграночного комплекса, наличие существенной неравномерности развития основных физико-химических, газодинамических и тепловых процессов, что ограничивает его производительность по расплаву не выше 6 т/ч при суммарном тепловом КПД не выше 11,78 %.

Ключевые слова: минераловатные теплоизоляционные изделия, ваграночный комплекс для получения расплава, высота загрузки, удельный расход воздуха, неравномерность распределения газового потока, тепловой КПД.

Из-за расширения использования волокнистой теплоизоляции в гражданском строительстве особенно актуально встает вопрос ее производства с применением эффективных технологий. Отсутствие крупных отечественных производителей технологического оборудования для производства минераловатных теплоизоляционных изделий открыло возможность использования зарубежных технологий, применение которых должно быть основано на теплофизических особенностях развития основных закономерностей тепловых и газодинамических параметров получения минерального расплава, формирования минеральных волокон и производства формованных волокнистых материалов. В настоящее время на рынке для этих производств предлагается оборудование итальянской фирмы «Gamma meccanica»; доля предприятий, оснащенных этим оборудованием, достигает 30 %. При неизменной последовательности технологического процесса изготовления волокнистой теплоизоляции через стадии получения жидкого минерального расплава, формирования из него отдельных волокон и пористого слоя, формования изделий механическим путем с применением жидкого связующего, их тепловой обработки, подготовки изделий и упаковки основное отличие этого оборудования от аналогичного наблюдается преимущественно на стадии переплава минерального сырья.

Ваграночный комплекс оборудования для производства минерального расплава включает (рис. 1) шахтную печь 1 ваграночного типа с организованным отбором и удалением отработанных газов (закрытый колошник). Корпус вагранки выполнен в виде водоохлаждаемой металлической шахты (ватержакет) внутренним диаметром 2,0 м при общей максимальной высоте слоя 3500 мм. Загрузку исходных материалов в печь 2 осуществляют порциями через уплотнительный конус. Дымоудаление из рабочего пространства вагранки производится дымососом с организацией дожига горючих компонентов в футерованной камере при помощи трех горелочных устройств 3. Очистка запыленных ваграночных газов 4 от твердых компонентов организована в две стадии: в циклоне 5 и вертикальной трубе Вентури 6 с каплеотде-

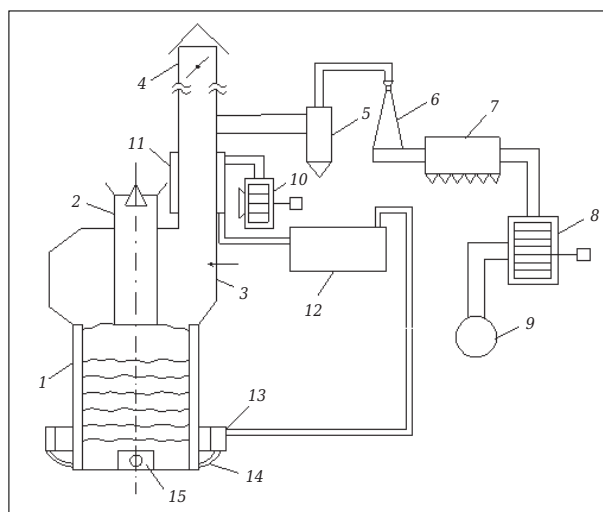


Рис. 1. Схема конструкции ваграночного комплекса: 15 — летка; остальные обозначения — в тексте



В. И. Матюхин

E-mail: matyhin53@mail.ru

лителем 7 с помощью дымососа 8 и трубы 9. На шахтной печи предусмотрена система аварийного сброса газов 4 в атмосферу. Воздушное дутье подается в вагранку с помощью отдельного вентилятора 10 через радиационный рекуператор 11, установленный над камерой дожига, дополнительный газовый подогреватель 12 в распределительный коллектор 13, далее по вертикальным опускным патрубкам и фуры 14 в рабочее пространство. По заявлению разработчика номинальная производительность оборудования ограничивается 6 т/ч расплава. Однако, по имеющимся данным, достижение этого уровня на действующих агрегатах получено не было.

Используемая конструкция вагранки отличается низкой высотой слоя загрузки (не более 3,5 м) при требуемой для завершенности теплообмена не менее 5,6 м. Это приводит к появлению в газообразных продуктах повышенной доли химического недожога (содержание СО 13–21 %) при их избыточной температуре не ниже 300 °С. Для снижения содержания монооксида углерода в отходящих газах выше уровня загрузки шихты установлены два дополнительных горелочных устройства с внешним перемешиванием продуктов сгорания и ваграночных газов при общем расходе природного газа около 300 м³/ч. Однако, как показывает опыт использования такого способа утилизации горючих компонентов отходящих газов, степень дожига СО при этом составляет 50–60 %, что снижает эффективность использования тепла кокса в вагранке. В процессе дожига ваграночных газов температура в камере сгорания повышается до 800–1000 °С. Для утилизации их тепла предусмотрена установка радиационного подогревателя воздушного дутья до температуры не выше 300 °С в виде участка дымопровода, после прохождения которого температура дымовых газов снижается до 560 °С. Запыленные ваграночные газы очищаются последовательно в батарейном циклоне и вертикальной трубе Вентури с каплеотделителем при снижении их температуры до 200 °С и удаляются в атмосферу с помощью дымососа и трубы высотой 30 м.

Подача воздушного дутья в вагранку под давлением около 400 мм вод. ст. осуществляется от отдельной воздуходувки номинальной производительностью до 9000 м³/ч через воздушный рекуператор радиационного типа, установленный на отходящих газах. Он обеспечивает подогрев воздушного дутья до температуры не выше 300 °С. Для дальнейшего повышения температуры подогрева воздушного дутья установлен дополнительный трубчатый

подогреватель с внешним источником тепла в виде продуктов сгорания природного газа с тепловым КПД около 65 %. Горячее дутье с конечной температурой 580–600 °С подается в распределительный коллектор переменного сечения. При этом максимальные его размеры 1200×1200 мм² имеют место в районе входа в него воздушного дутья. По мере перемещения газов по распределительному коллектору его сечение уменьшается и достигает 800×800 мм² на противоположной стороне от входа дутья. Подача горячего потока воздуха по периметру вагранки осуществляется через 12 фуры с внутренним диаметром 130 мм, что обеспечивает среднюю скорость выхода воздушных струй около 11 м/с с ярко выраженным периферийным движением газов в шахте вагранки. Место отбора газов из вагранки располагается в верхней части шахты под углом 45° относительно входа дутья. Исходная шихта состоит из габбро (67,35 %), доломита (15,12 %), кокса (17,53 %) и загружается в вагранку в виде отдельных порций (рабочих колош) массой соответственно 800, 180, 155 кг.

Для оценки состояния тепловой работы плавильного агрегата измеряли расход воздушного дутья в целом на печь, его температуру и давление, температуру расплава на выходе из сифона, температуру и состав газов на уровне загруженного слоя, а также их распределение по сечению вагранки. Средняя температура расплава в период исследований составила не выше 1477 °С. При среднем расходе воздушного дутья 6300 м³/ч и температуре подогрева 494 °С его удельный расход составил 33,43 м³/(м²·мин). Согласно практическим данным [1], для обеспечения рациональных условий работы агрегата необходимо поддерживать этот показатель на уровне 60–70 м³/(м²·мин). Таким образом, можно сделать вывод, что имеется возможность дальнейшего улучшения показателей работы вагранки. Однако это мероприятие ограничено пропускной способностью дымососа и газодинамическими особенностями нагреваемого слоя.

Расчетно-теоретические исследования неизоэнтальпического движения газового потока применительно к условиям работы шахтных печей [2] показали, что температурные поля газов и материалов в слое определяются преимущественно характером распределения газового потока по сечению агрегата. Экспериментальные исследования закономерностей изменения газодинамической работы вагранки производили по результатам измерений температуры на уровне загруженного слоя шихты с применением штыковой термопары градуиров-

ки ТХК (рис. 2). Анализ измерений позволяет отметить, что в поперечном сечении вагранки существует ярко выраженная неравномерность как температурного поля, так и скоростного. При этом зона минимальных температур и скоростей фильтрации газов располагается в наиболее удаленной от подачи воздушного дутья области. Максимум поступления воздушного дутья в печь наблюдается в районе входящего патрубка распределительного коллектора. Это обусловлено в первую очередь его конструкцией, имеющей сечение, уменьшающееся от входа воздушного потока и характеризующееся повышением газодинамического сопротивления. Кроме того, увеличению неравномерности воздушного дутья будет способствовать и место установки зоны организованного отбора газов из слоя по вертикали в районе подачи дутья. На противоположной стороне сечения вагранки слой будет испытывать недостаток воздушного дутья с преимущественным развитием процессов газификации углерода кокса и образованием повышенного количества монооксида углерода. Для обеспечения равномерной подачи воздушного дутья по сечению агрегата целесообразно для работы этой конструкции вагранки использовать распределительный коллектор с постоянным поперечным сечением.

При средней температуре слоя 209 °С окружающая неравномерность распределения газов по горизонтальному сечению агрегата составила 27,94 % от этого значения, а его радиальная неравномерность превысила 16,35 %, что свидетельствует о неудовлетворительном распределении воздушного дутья по объему вагранки и требует его оптимизации. Обнаруженная неравномерность температурного и газового потоков является нежелательным явлением, так как способствует увеличению непроизводительного расхода кокса, снижению производительности агрегата, повышению пы-

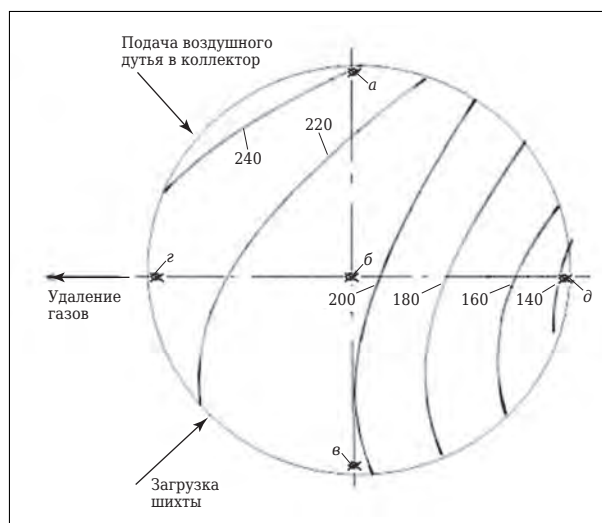


Рис. 2. Изменение температурного поля слоя шихты (цифры у кривых, °С) на уровне засыпи

левых твердых частиц и вредных газовых компонентов из рабочего пространства.

Для оценки степени развития процесса горения твердого топлива в печи были исследованы закономерности изменения состава газов на уровне засыпанного слоя шихты (табл. 1). Их анализ показал, что плавление материалов в шахтной печи осуществляется в различных окислительно-восстановительных условиях. При этом исходные компоненты шихты в рабочем пространстве находятся в течение всей плавки в восстановительной атмосфере продуктов сгорания кокса при наличии повышенного содержания монооксида углерода. Это способствует развитию восстановительных процессов в слое с формированием металлической фазы в расплаве (чугун) и требует повышенной периодичности ее слива с остановкой вагранки. Отмечено, что изменение состава газовой атмосферы по сечению агрегата характеризуется значительной неравномерностью распределения от среднего как в радиальном направлении

Таблица 1. Изменение состава газов на уровне засыпи шихты

Точка измерения (см. рис. 2)	Состав газов, %				Коэффициент расхода воздуха
	CO ₂	O ₂	CO	N ₂	
а	4,0	4,0	20,2	71,8	0,76
б	8,4	0,1	21,9	69,6	0,63
в	12,0	2,6	14,4	71,0	0,80
г	9,0	1,2	13,8	76	0,77
д	13,0	1,6	14,4	71,0	0,77
Среднее значение	6,88	1,9	16,94	71,88	0,75
Неравномерность, %:					
окружная	65,41	100,00	18,89	3,13	2,67
радиальная	209,3	119,74	32,82	2,85	77,33

Таблица 2. Усредненный тепловой баланс работы вагранки

Приход, кВт (%)	Расход, кВт (%)
1. Химическая теплота кокса, 9666,1 (73,95)	1. Физическая теплота расплава, 1540,62 (11,78)
2. Физическая теплота воздушного дутья, 1160,76 (8,88)	2. Физическая теплота отходящих газов, 3336,48 (25,53)
3. Теплота экзотермических реакций плавления, 2243,77 (17,17)	3. Теплота химического недожога, 7317,75 (55,99)
Итого 13070,63 (100,0)	4. Потери теплоты в окружающую среду, 875,78 (6,70)
	Итого 13070,63 (100,0)

(119,74 %), так и по его периметру (119,74 %) кислорода, диоксида углерода — соответственно 65,41 и 209,3 %, монооксида углерода — соответственно 18,89 и 32,82 % и азота — соответственно 3,13 и 2,85 % (как не участвующего в процессе горения). Следует отметить существенную радиальную неравномерность распределения коэффициента расхода воздуха (77,33 %).

Такое распределение газов в шахте печи обусловлено в первую очередь особенностями подачи воздушного дутья, которое формирует условия слоевого сжигания кокса в верхней части нижней коксовой насадки (холостой колоши). При этом радиальная неравномерность газов обусловлена в основном распределением воздушного дутья по сечению агрегата. Окружная неравномерность газового потока обусловлена конструкцией распределения коллектора и способом отвода газов из рабочего пространства. Низкие значения коэффициента расхода воздуха свидетельствуют о недостатке воздушного дутья в процессе ваграночной плавки и перерасходе кокса. Попытка увеличения общего расхода воздушного дутья в вагранку ограничена возможностями отсасывающего дымососа, а повышение общего расхода кокса сопровождается снижением температурного состояния жидкого расплава. Анализ состава газов на выходе из слоя показал, что максимальное содержание диоксида углерода и наилучшие температурные условия плавки минерального сырья располагаются слева от зоны подачи воздушного дутья. В наихудших условиях находится часть вагранки, расположенная справа от зоны ввода дутья. При этом зона печи с максимальным образованием расплава при повышенной температуре ограничена областью вблизи подачи воздушного потока. Остальная часть объема рабочего пространства вагранки характеризуется низкой интенсивностью процесса теплогенерации с формированием значительной протяженности восстановительной зоны горения кокса с формированием повышенной концентрации CO. Состав газов в целом по вагранке отличается

практически полным отсутствием избыточного кислорода в отходящих газах (среднее 1,9 %). Самое низкое его содержание наблюдается по центру вагранки, где движение воздушного потока ограничено. Такой характер распределения остаточного кислорода обусловлен в основном конструктивными особенностями плавильного агрегата и его фурменной зоны, при которых движение воздушного потока ограничено преимущественно периферийной областью в районе подачи с постепенным расширением к центру по мере удаления из агрегата.

При исследовании закономерности теплообмена в шахте вагранки было определено, что в установившемся режиме теплоемкость потока переплавляемых материалов, равная производству их теплоемкости на расход, составляет $W_m = 5024$ кДж/К, а теплоемкость потока газов W_r равна 6083 кДж/К при $W_m/W_r = 0,83$. Такой режим работы вагранки [3] характеризуется низкой интенсивностью горения кокса, относительно низким уровнем конечной температуры нагрева материалов, а отходящие газы покидают слой с избыточной температурой. Для улучшения условий теплопередачи от раскаленных продуктов горения кокса к материалам можно воспользоваться:

- уменьшением удельного расхода горючего. Это мероприятие должно сопровождаться внедрением приемов, обеспечивающих более полное сжигание твердого топлива в пределах рабочего пространства печи;

- повышением степени нагрева дутья, что позволит уменьшить количество газов и расход горючего. Однако это мероприятие дает реальное улучшение только тогда, когда температурный режим шахты уже станет более благоприятным ($W_m > W_r$). Практика ваграночной плавки показывает, что иногда нагрев дутья не дает положительных результатов, так как эффект от его использования не изменяет заметно температурного режима вагранки;

- обогащением дутья кислородом, что благоприятно влияет на работу вагранки, но связано с повышенными экономическими затрата-

ми и сложностью управления температурным режимом агрегата;

- уменьшением расхода дутья на плавку или рационализацией его распределения по сечению вагранки, что приводит к снижению отношения теплоемкостей потоков материала и газов и будет способствовать переходу режима работы плавильного агрегата в более экономичный вариант.

Для оценки эффективности тепловой работы вагранки был составлен ее усредненный тепловой баланс (табл. 2). В соответствии с полученными данными тепловой КПД вагранки составит всего 11,78 %. Такой низкий КПД агрегата связан в первую очередь с неправильно организованным процессом горения кокса при пониженном расходе воздушного дутья и неудовлетворительным распределением газового потока по сечению рабочего пространства. Это приводит к существенному повышению выхода монооксида углерода и образованию химического недожога (55,99 %), а также к повышению температуры отходящих газов и тепловых потерь в окружающую среду (25,53 %).

Таким образом, анализ существующего состояния тепловой и газодинамической работы минераловатной вагранки позволил установить следующее:

1. Используемая конструкция вагранки имеет ряд конструктивных недостатков, которые не позволяют получать высокие технико-экономические показатели: недостаточную высоту слоя, большой диаметр фурм и малый угол наклона их к горизонту, что ограничивает глубину проникновения газов в слой, обеспечивая преимущественно периферийный режим движения газов.

Библиографический список

1. **Мариенбах, Л. М.** Металлургические основы ваграночного процесса / Л. М. Мариенбах. — М. : Машгиз, 1960. — 327 с.
2. **Гордон, Я. М.** Тепловая работа шахтных печей и агрегатов с плотным слоем / Я. М. Гордон, Б. А. Боровиков, В. С. Швыдкий [и др.]. — М. : Металлургия, 1989. — 120 с.

2. Существующая система воздухоподачи характеризуется неравномерностью распределения газового потока по сечению агрегата, что приводит к различным условиям тепловой работы слоя. В наиболее благоприятных условиях находится часть слоя в зоне подачи воздушного дутья.

3. Тепловая работа вагранки отличается существенной неравномерностью распределения газового потока по объему нагреваемой шихты. При этом слабопродуваемая зона, имеющая низкую скорость движения газов, где развиваются процессы газификации кокса и замедляется процесс плавления шихты, располагается на противоположной стороне подвода воздушного дутья, что связано с неудачной конструкцией воздушного коллектора и системы организованного отвода газов.

4. Горение кокса происходит при слабом развитии окислительной зоны, что обеспечивает низкую интенсивность процессов горения кокса и плавления шихты при наличии существенной доли химического недожога и относительно низкой температуры в зоне фокуса. Такая особенность приводит к непроизводительному расходу топлива и пониженной производительности агрегата.

5. Установившийся режим ваграночной плавки при $W_m/W_T = 0,83$ характеризуется низкой интенсивностью плавления с формированием потока отходящих газов при повышенной температуре и пониженной температурой перегрева расплава.

6. Тепловой КПД вагранки составляет 11,78 %, что свидетельствует о ее неудовлетворительной конструкции и плохо организованном процессе плавления исходного минерального сырья.

3. Металлургические печи. Теория и расчет : учебник. В 2 т. / В. И. Губинский [и др.] ; под ред. В. И. Тимошпольского, В. И. Губинского. — Минск : Белорус. наука, 2007. — 832 с. ■

Получено 12.03.15

© В. И. Матюхин, О. В. Матюхин,
А. В. Матюхина, 2015 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ



Португальский конгресс по термообработке 2015

9 октября 2015 г.

E-mail: portugal@metalspain.com

г. Коимбра, Португалия