

УДК 553.2

Казяев М.Д. – канд. техн. наук, проф., директор НПК «УралТермо-Комплекс», г. Екатеринбург

Гущин С.Н. – канд. техн. наук, проф., УГТУ-УПИ, г. Екатеринбург

Лошкарев Н.Б. – канд. техн. наук, доц., УГТУ-УПИ, г. Екатеринбург

Мадисон В.В. – канд. техн. наук, доц., УГТУ-УПИ, г. Екатеринбург

Зырянов И.А. – студент, УГТУ-УПИ, г. Екатеринбург

УЛУЧШЕНИЕ ТЕПЛОВОЙ РАБОТЫ КОКСО-ГАЗОВОЙ ВАГРАНКИ ДЛЯ ПЛАВЛЕНИЯ БАЗАЛЬТОВЫХ ПОРОД

Во всем мире остро стоит проблема экономии энергоносителей, которая достаточно актуальна на сегодняшний день при стремительной индустриализации современного общества и ухудшении экологической обстановки.

Одним из путей решения указанной проблемы является применение эффективной, недорогой в производстве, простой в эксплуатации, безопасной для людей и окружающей среды тепловой изоляции, в частности, волокнистых неорганических материалов, использование которых позволяет существенно снизить потери тепловой энергии. В то же время применение в строительстве стеновых панелей с минеральным утеплителем вместо кирпичной кладки сокращает толщину стен в 2,5 раза, а их массу – более чем в 10 раз.

Введение

При производстве волокнистых теплоизоляционных материалов в настоящее время используют различные исходные шихты, такие, как силикатные породы, шлаки металлургического производства, бой изделий керамического производства, известняки, доломиты и так далее. Указанные виды сырья не могут быть использованы для производства минеральной ваты без корректирующих добавок. Например, для производства стеклянных волокон требуются такие дорогостоящие компоненты, как боросодержащее сырье, сода, сульфаты и другие. В качестве альтернативного сырья для производства волокнистых теплоизоляционных материалов широко используют горные породы группы базальтов (андезиты, диабазы, амфиболиты, габродиабазы, андезитобазальты и др.). Породы, подходящие под определения базальтов, в составе земной коры содержатся в количестве приблизительно 30 %,

что делает это сырье дешевле и доступнее по сравнению со стекольными шихтами и шлаками металлургического производства.

Производство минеральных теплоизоляционных изделий на основе базальтов имеет огромные перспективы. Базальтовое волокно является материалом XXI века и сфера его применения постоянно расширяется, поэтому получение волокон с высокими теплотехническими свойствами из недефицитного сырья является одной из важнейших задач. Более однородные по химическому составу базальтовые волокна и изделия из них обладают повышенными физико-химическими свойствами, такими, как высокая температура применения, низкая гигроскопичность, высокая вибростойкость, большой срок службы, высокий модуль кислотности, что положительно влияет на химическую и термическую стойкость волокна и др. В то же время, при производстве теплоизоляционных материалов из базальтовых пород существуют некоторые сложности, связанные с работой плавильных тепловых агрегатов, использующих базальты разных месторождений. Различие по химическому составу может достигать 15 %, что, в свою очередь, требует изменения температурного режима плавильного агрегата. Кроме того, хотя базальт и является однокомпонентным сырьем, не требующим дополнительной предварительной подготовки, но все же в некоторых случаях возникает необходимость введения в состав исходной шихты корректирующих добавок в виде известняка или доломита (так называемая «подшихтовка»). Однако, этих добавок требуется гораздо меньше, чем при плавлении силикатных пород или шлаков.

Из сказанного выше следует вывод, что производство волокнистых теплоизоляционных материалов из базальтовых пород является сложной технологической задачей, каждый раз ставящей вопрос о выборе типа плавильного агрегата.

Постановка задачи

В настоящее время для плавления минерального сырья с целью получения волокнистых теплоизоляционных изделий используют различные типы плавильных агрегатов: шахтные, ваннные топливные печи, дуговые и индукционные электропечи. На наш взгляд, ни одна из перечисленных печей не может полностью удовлетворить требования современного промышленного производства базальтовых волокон, в связи с чем, перед теплотехниками стоит задача создания принципиально нового высокопроизводительного теплового агрегата для плавления базальта. Но пока следует признать, что агрегаты шахтного типа, хотя и предъявляют повышенные требования к фракционному со-

ставу исходных материалов и в них используют дорогостоящий кокс, тем не менее вагранки, вследствие их высокой производительности, достаточно широко используют многие западно-европейские фирмы, в частности, итальянская «ГАММА МЕССАНИСА», поставляющая в Россию оборудование для производства волокнистых материалов и изделий из них. На одном из заводов Челябинской области итальянские специалисты установили и запустили коксо-газовую вагранку производительностью 7,5 т/ч, (рисунок 1). Основные проектные технико-экономические показатели плавильного агрегата составляли: расход кокса 240 кг/т, расход природного газа 70 м³/ч, количество продувочных фурм 12, количество газовых горелок 6, расход воздуха, подаваемого в слой, 6500 м³/ч (подогрев 300 °С), а на сжигание газа – 700 м³/ч (воздух не подогревают). Однако после пуска вагранки фактический расход кокса так и не удалось обеспечить ниже 280 кг/т, и при этом расход природного газа достигал 240...300 м³/ч. Производительность печи по расплаву не превышала 4,5 т/ч. Несмотря на все усилия специалистов итальянской фирмы, достичь расчетной производительности вагранки так и не удалось. Это обстоятельство заставило руководителей завода обратиться за помощью к российским специалистам. Перед исследовательской группой была поставлена задача выявить основные причины недостаточно эффективной тепловой работы агрегата и рекомендовать заводу мероприятия, которые позволили бы обеспечить требуемые технико-экономические показатели.

Результаты исследования тепловой работы вагранки

В процессе исследования авторами был использован метод непосредственных теплотехнических измерений основных параметров работающей вагранки. Температуру в поперечном сечении шахты на уровне загрузки шихты измеряли с помощью кабельной термопары, помещенной в стальную неохлаждаемую трубу диаметром 1/2". Отсутствие водяного охлаждения указанной конструкции позволило избежать существенных искажений измеряемых температур.

Трубу вместе с термопарой вводили в рабочее пространство вагранки через две специальные амбразуры, расположение которых показано на рисунке 1. Измерение температуры производили через каждые 100 мм по оси перемещения термопары в двух взаимоперпендикулярных направлениях. Показания термопары непрерывно записывали на ленте потенциометра.

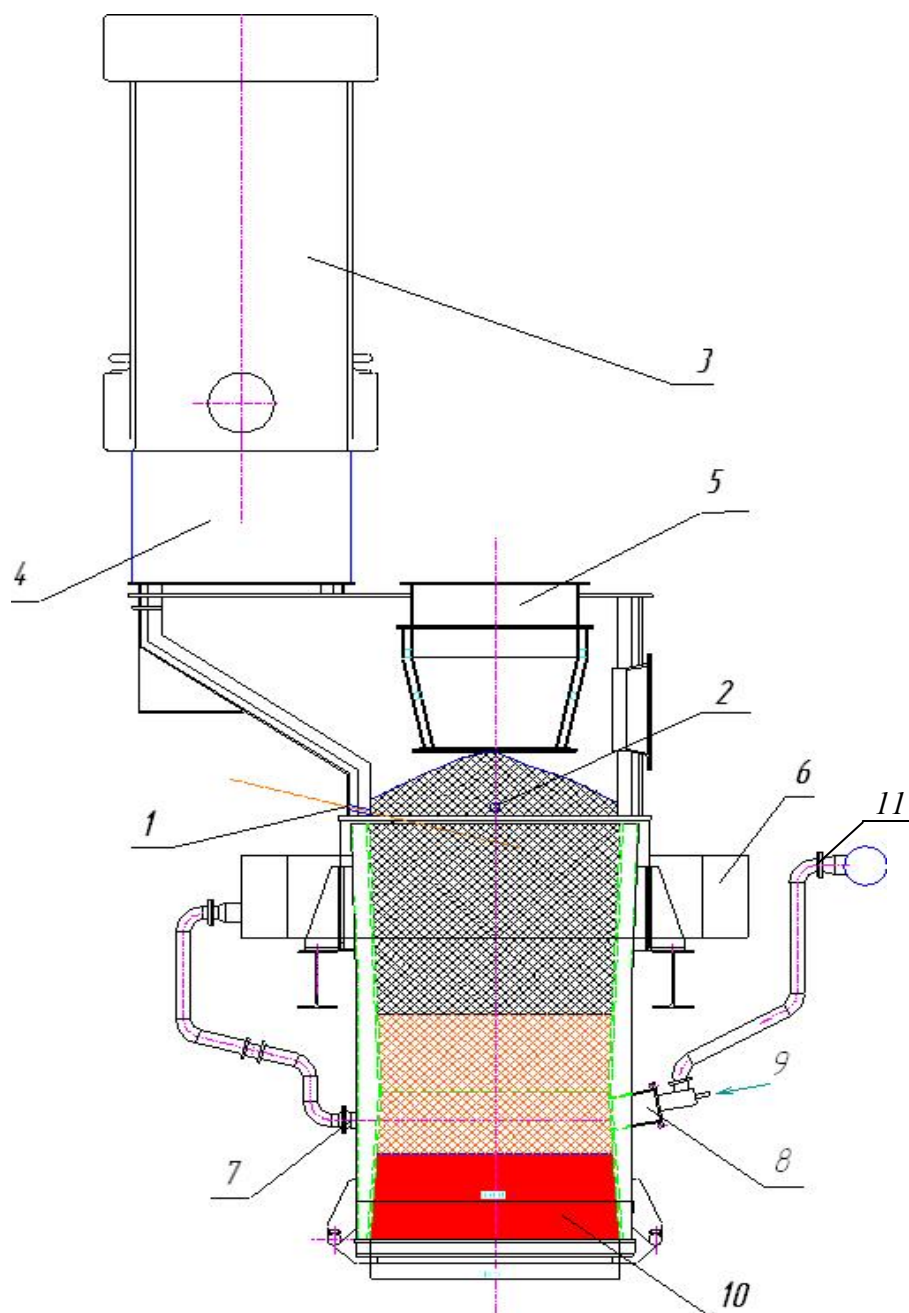


Рис. 1. Схема вагранки и расположение точек измерения:

- 1 – точка № 1 ввода измерительного зонда;
- 2 – точка № 2 ввода измерительного зонда;
- 3 – рекуператор; 4 – камера дожигания CO;
- 5 – загрузочный аппарат; 6 – коллектор подогретого воздуха; 7 – воздушная фурма;
- 8 – газовая горелка; 9 – подвод газа; 10 – расплав;
- 11 – коллектор холодного воздуха

Химический состав печных газов определяли в тех же точках поперечного сечения шахты, в которых измеряли температуру. Для отбора газовых проб из высокотемпературной зоны применяли газоотборную трубку с водяным охлаждением, чтобы исключить догорание в трубке несгоревших компонентов исследуемого газа. Анализ газов производили с помощью двух газоанализаторов: автоматического «Газохром», позволяющего определять содержание водорода и органических соединений, и ручного ГХП-3м, который позволяет определять концентрацию монооксида и диоксида углерода, а также содержание кислорода.

Используя описанную выше методику, авторы также провели химический анализ проб газа на входе в рекуператор.

Результаты измерений были обработаны и представлены в виде графиков (рисунки 2 и 3). Необходимо отметить, что температуры в процессе измерения изменялись во времени в зависимости от изменения высоты слоя при загрузке, поэтому на графиках приведены усредненные значения измеренных величин.

Как видно из приведенных графиков, температура в перпендикулярно расположенных сечениях изменяется практически одинаково. Максимальная температура 420...470 °С наблюдается в середине кольцевого сечения, расположенного между стенками вагранки и загрузочного аппарата. Именно через это сечение уходит основная масса газов из слоя. По краям указанного кольцевого сечения температуры примерно одинаковы и имеют сравнительно низкие значения – 200...250 °С.

В ходе измерений выяснилось, что поверхность слоя располагается примерно на 100...150 мм ниже края «юбки» загрузочного аппарата, что говорит о неполной загрузке вагранки и изменении высоты слоя при порционной подаче шихты.

Повышение температуры в слое, по сравнению с температурой газов над ним, которое наблюдается на рисунке 2, объясняется тем, что изменение температуры по высоте слоя, при небольшой его высоте, значительно. Термопара, вводимая под некоторым углом к горизонту, при ее перемещении к центру, углублялась в слой, попадая в горячие зоны, расположенные ниже исследуемого сечения. Если учесть изменение температуры в слое по высоте и ввести поправку на заглубление, то оказывается, что температуры в центральной части сечения остаются практически неизменными и сравнительно низкими – 250...300 °С.

При анализе результатов состава газа (см. рисунок 3) обнаружено значительное содержание СО, сначала возрастающее к центру и имеющее максимум на расстоянии 300 – 400 мм от стенки вагранки, а затем, остающееся практически неизменным внутри слоя. Изменение содержания СО₂ по сечению противоположно изменению содержания

CO, т.е., в тех точках, где концентрация CO имеет максимальное значение, концентрация CO₂ минимальна, и наоборот. В продуктах сгорания практически не обнаружено наличия кислорода и метана.

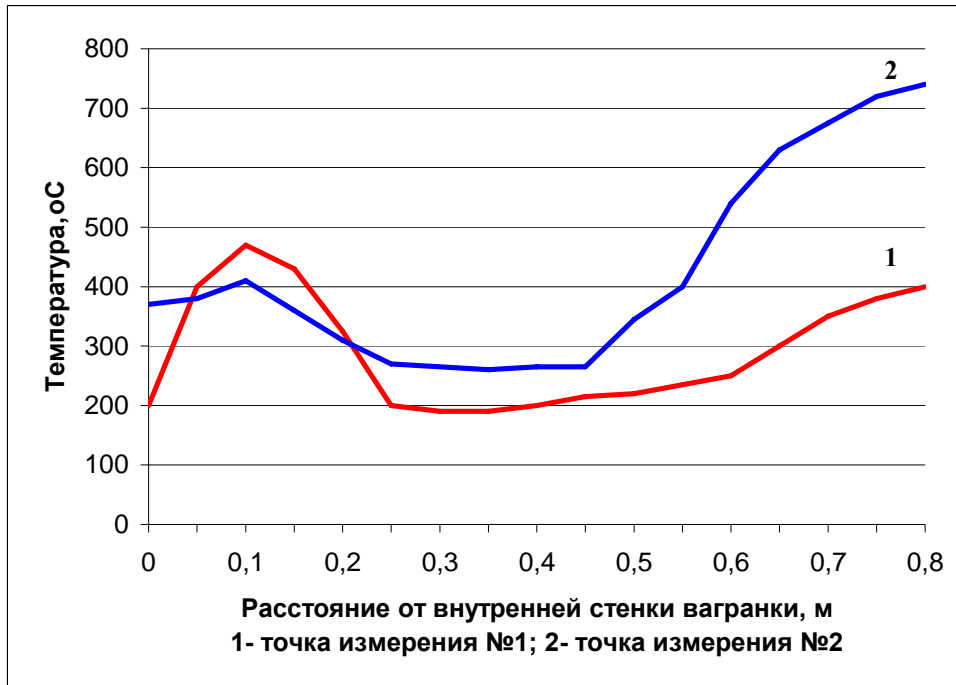


Рис. 2. Распределение температур по сечению вагранки

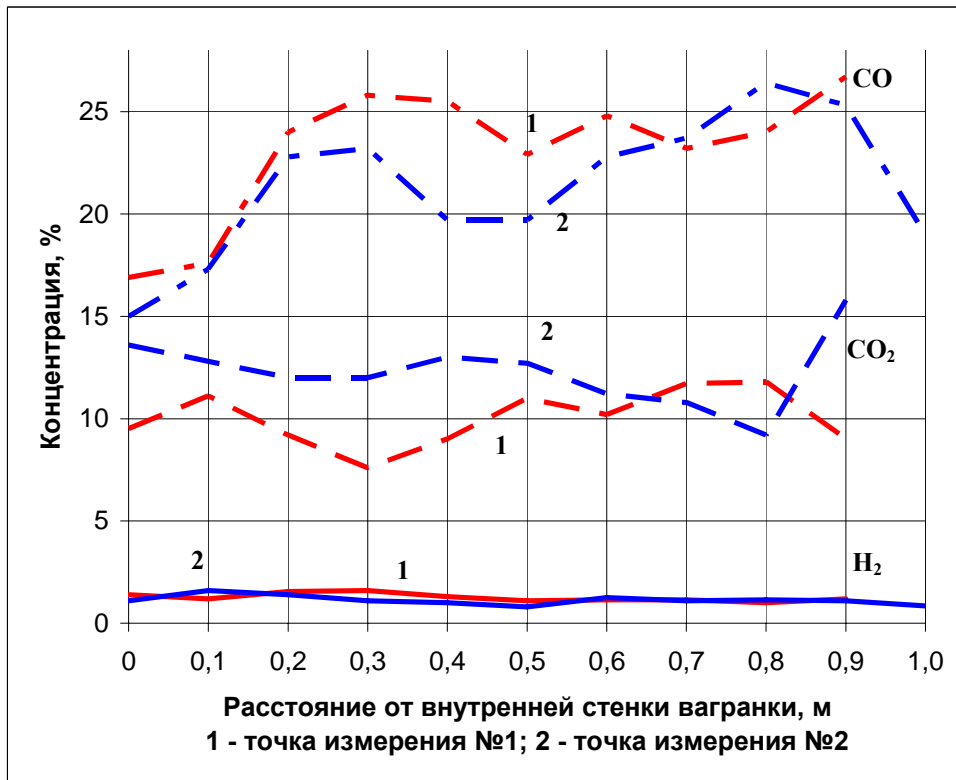


Рис. 3. Распределение концентраций газов по сечению вагранки

Используя данные, полученные в результате проведенных измерений, авторы рассчитали тепловой баланс слоя шихтовых материалов, находящихся в рабочем пространстве вагранки (таблица 1).

Таблица 1

Тепловой баланс слоя

Приход	кВт	%	Расход	кВт	%
Химическая теплота горения кокса	9524	73,8	Затраты теплоты на нагрев и плавление шихты	2592	20,1
Химическая теплота горения природного газа	645	5,0	Теплота эндотермических реакций	62	0,5
Физическая теплота подогрева воздуха	2722	21,2	Потери теплоты с продуктами горения	1690	13,1
			Химический недожог кокса и газа	6470	50,2
			Потери теплоты с охлаждающей водой	2077	16,1
Итого:	12891	100	Итого:	12891	100

Потери теплоты с продуктами горения, покидающими слой, рассчитали при температуре газов 487 °С. К сожалению, вследствие отсутствия расходомера охлаждающей воды потери на охлаждение вагранки измерить не удалось, и они были определены как остаточный член уравнения теплового баланса. Как правило, для подобных вагранок эти потери составляют 15...20 %. Обращает на себя внимание величина химического недожога, которую рассчитывали по содержанию в продуктах горения СО и Н₂. Следует подчеркнуть, что при слоевом сжигании твердого топлива очень важную роль играет высота слоя загружаемого кокса. Кислород подаваемого в слой дутья в пределах, так называемой, окислительной зоны, имеющей незначительную высоту, равную 3...5 диаметров кусков топлива, активно окисляет углерод до СО₂ и обеспечивает максимальную температуру газов, достигающую 1400 °С. Если выше этого горизонта имеется еще слой топлива, то горячие газы попадают в, так называемую, восстановительную зону, в которой проходят эндотермические реакции

$\text{CO}_2 + \text{C} = 2\text{CO}$ и $\text{H}_2\text{O} + \text{C} = \text{H}_2 + \text{CO}$. Естественно, объем газов будет постепенно увеличиваться, а температура по высоте слоя будет уменьшаться. При этом увеличение подачи дутья в слой лишь приведет к более интенсивному горению кокса, но на химический состав выходящих из слоя газов, содержащих до 40...45 % ($\text{CO} + \text{H}_2$), не повлияет. Очевидно, в рассматриваемом случае толщина загружаемого в вагранку слоя кокса слишком велика, что создает условия для восстановления диоксида углерода и водяного пара.

Анализ полученных результатов и разработка основных направлений реконструкции вагранки

Проведенные исследования и расчеты показывают, что газодинамический режим печи характеризуется периферийным ходом. Дутье поступает через фурмы на небольшую глубину слоя, а газы эвакуируются также через периферийное кольцо между стенками печи и «юбкой» загрузочного устройства. Таким образом, центр печи практически не продувается газами, на что указывает высокое содержание монооксида углерода в этой области в сочетании с высокими температурами (шихтовые материалы в центре движутся намного медленнее, чем по периферии). Периферийный ход особенно ярко проявляется в данной печи, поскольку она имеет большой диаметр и небольшую высоту шахты, что приводит к потере производительности печи и перерасходу кокса. Отношение высоты слоя шихты к диаметру вагранки $H/D = 1,5$.

Анализ газов, покидающих шахту печи, показал, что в них содержится до 25 % монооксида углерода и до 2 % водорода. Неиспользованный химический потенциал этих газов (не считая физической теплоты) эквивалентен 188 кг кокса/т расплава. В то же время количество теплоты, возвращаемой в процесс с нагретым в рекуператоре до 320 °С воздухом, эквивалентно всего лишь 19 кг кокса/т расплава. Невысокая температура подогрева воздуха является следствием серьезных конструктивных недостатков рекуператора, и, в первую очередь, это – неравномерность распределения воздуха в кольцевом зазоре, что значительно уменьшает эффективную теплообменную поверхность рекуператора.

Подача природного газа в слой на уровне воздушных фурм оказывается неэффективной, поскольку при недостатке кислорода и наличии углерода кокса газ не сгорает с выделением теплоты, а частично разлагается с поглощением теплоты, снижая, таким образом, температуру расплава.

С целью устранения или уменьшения влияния вышеуказанных недостатков конструкции и режима работы вагранки авторы предлагают следующие мероприятия.

1. Введение второго (дополнительного) яруса подачи воздушного дутья через фурмы, расположенные выше основного ряда фурм для частичного дожигания монооксида углерода, образующегося в зоне восстановления. Снижение содержания СО в отходящих газах хотя бы до 10 % эквивалентно экономии примерно 77 кг кокса/т расплава.

2. Для уменьшения радиальной неравномерности протекания газодинамических и теплообменных процессов (устранения периферийного хода) необходимо: оптимизировать количество и параметры фурменных приборов в нижнем (основном) и в верхнем ярусах ввода воздушного дутья, применить водоохлаждаемые фурмы с высовом в слой на глубину до 250...300 мм. Для интенсификации процессов в осевой зоне верха шахты установить центральное газоотводящее устройство.

3. Для сокращения расхода кокса и повышения температуры перегрева расплава повысить температуру воздушного дутья, подаваемого в основной ряд фурм, до 500...550 °С, для чего реконструировать рекуператор, реализовав в нем радиационно-конвективный принцип работы. Это позволит подавать в слой дополнительно 336 кВт теплоты, что существенно повысит тепловой КПД печи.

4. Повысить эффективность использования природного газа, применив способы внепечного сжигания его в специальной горелке и введением продуктов сгорания в воздух, подаваемый в верхний ярус воздушного дутья, повышая, тем самым, его температуру.

5. Дожигать монооксид углерода перед рекуператором и повысить, таким образом, температуру подогрева воздуха.

Выводы

1. Одной из основных причин неудовлетворительной тепловой и газодинамической работы вагранки является очевидное нарушение ее коэффициента стройности, т.е. отношения высоты к диаметру. В данной вагранке $H/D = 1,5$, в то время как хорошо работающие вагранки с расходом кокса 120...140 кг/т имеют коэффициент стройности 4...6.

2. Улучшение тепловой работы центральных объемов слоя может быть обеспечено заглублением продувочных фурм в слой на 250...300 мм.

3. Дожигание СО и более эффективный подогрев воздуха позволят сократить расход кокса приблизительно на 30 %.

Рукопись поступила 01.04.2008 г.