

УДК 621.928.94

А.В. ШАПАРЕНКО, начальник отдела, **А.М. ПАВЛЮЧЕНКО**, младший научный сотрудник,
Г.В. ЛЫЖНИК, заместитель начальника отдела, **А.В. ФАДЕЕВ**, младший научный сотрудник
 Государственное предприятие «Украинский научно-технический центр
 металлургической промышленности «Энергосталь» (ГП «УкрНТЦ «Энергосталь»), г. Харьков

ПУТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СИСТЕМ ОЧИСТКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ГАЗОВ ОТ ПЫЛИ В ИЗВЕСТКОВОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Изложены результаты обследования системы очистки технологических газов, отходящих от вращающихся печей № 1–4, при производстве извести в условиях известково-обжигательного цеха ПАО «МК «Азовсталь». Определены основные причины неэффективной работы существующей системы газоочистки. Даны рекомендации по ее усовершенствованию. Предложены варианты по внедрению новых систем обеспыливания отходящих от вращающихся печей газов с применением рукавных фильтров типа ФРИР.

Ключевые слова: вращающаяся печь, известняк, газоочистка, электрофильтр, рукавный фильтр типа ФРИР, дымосос.

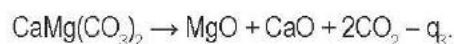
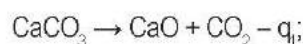
Крупнейшим производителем и потребителем извести является черная металлургия. Известь используется, в частности, при выплавке стали и чугуна, а также в производстве агломератов и ферросплавов. Основным потребителем извести является конвертерное производство, в котором она применяется для рафинирования жидкой стали – удаления серы, фосфора, неметаллических включений, кислорода и др. [1].

При производстве извести в атмосферу выбрасываются пыль, оксиды азота (NO_x), диоксид серы (SO_2) и монооксид углерода (CO). Пыление происходит в основном при подаче сырья в печь, термическом и механическом разрушении, а также при растрескивании известняка в печи [2].

В известково-обжигательном цехе (ИОЦ) ПАО «МК «Азовсталь» производят известь марок ИС-1, ИС-1-В и ИС-1-В повышенного качества путем обжига во вращающихся печах (ВП) известняка марки С-1 (фракции 20–60 мм) Комсомольского рудоуправления. Технологическая схема установки по обжигу известняка приведена на рис. 1.

Известняк подается системой конвейеров в здание загрузочных головок и далее в расходный бункер 5, откуда он поступает в высокотемпературный шахтный подогреватель (ВШП) 7, где происходит его частичная декarbonизация и подогрев до температуры 500–750 °С дымовыми газами. Из ВШП известняк качающимся питателем 8 равномерно подается через течку в торцевую загрузочную головку 9, по пути дополнительно нагреваясь отходящими от печи дымовыми газами. Затем он посту-

пает во вращающуюся печь 4, где в процессе продвижения к выгрузочному концу происходит его обжиг. Реакции диссоциации CaCO_3 и MgCO_3 протекают с поглощением тепла q по уравнениям



Готовая известь с температурой ~ 900 °С подается из выгрузочного конца печи на колосниковую решетку откатной головки 10, а затем поступает в противоточный охладитель извести 3, где воздухом, подаваемым вентилятором 2, охлаждается до температуры не более 60 °С. Из противоточного охладителя известь поступает на наклонный конвейер и далее подается на склад.

Локализация, улавливание и удаление выбросов от ВП № 1–4 осуществляются с помощью сухой двухступенчатой газоочистки. В качестве первой ступени используются циклоны, а второй ступени – электрофильтры с внутренним оборудованием фирмы SPEIC.

Системы газоочистки ВП № 1 и № 2 идентичны (рис. 2). Первая ступень очистки представлена двумя группами по шесть циклонов типа ЦН-15 Ø1200 мм конструкции НИИОГАЗ. На второй ступени очистки применен электрофильтр SPEIC. В качестве тягодутьевого оборудования используется мельничный вентилятор ВМ-160/850У с направляющим аппаратом.

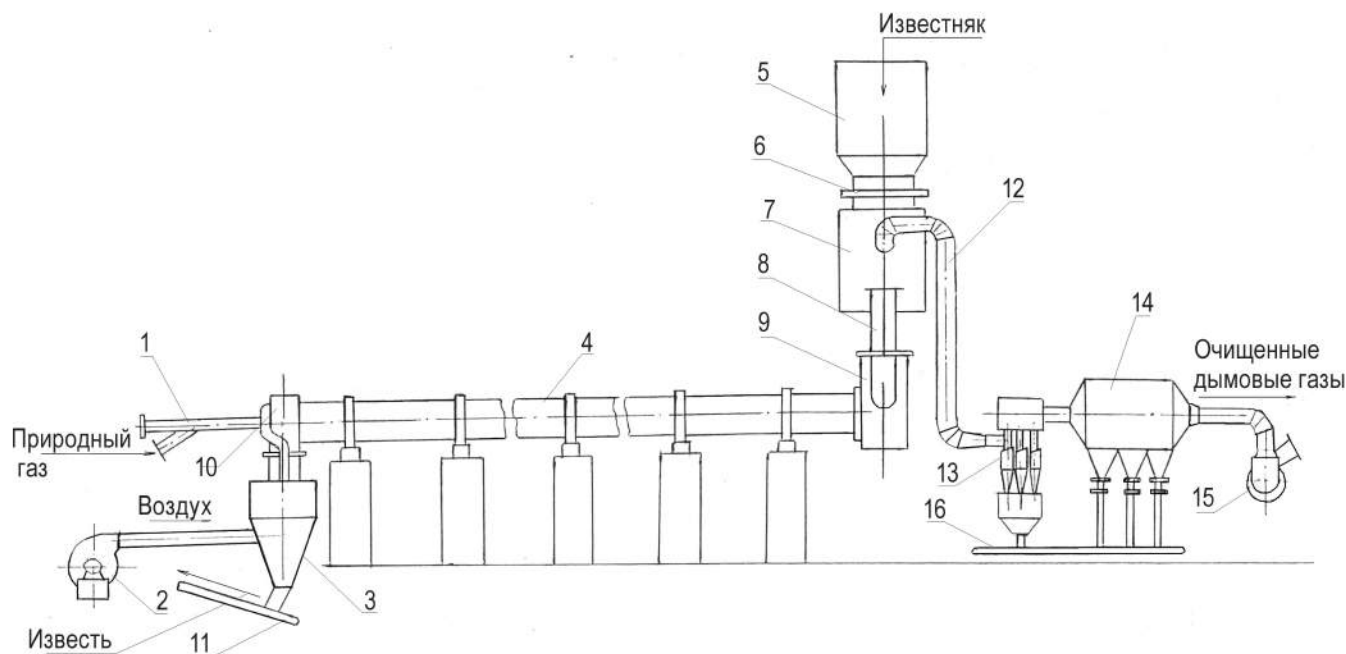


Рисунок 1 – Принципиальная технологическая схема установки по обжигу известняка:

1 – горелка; 2 – вентилятор; 3 – шахтный охладитель извести; 4 – вращающаяся печь; 5 – бункер для известняка; 6 – шибер; 7 – высокотемпературный шахтный подогреватель; 8 – качающийся питатель; 9 – загрузочная головка; 10 – откатная головка; 11 – конвейер; 12 – газоход; 13 – циклон; 14 – электрофильтр; 15 – мельничный вентилятор; 16 – пневмотрасса

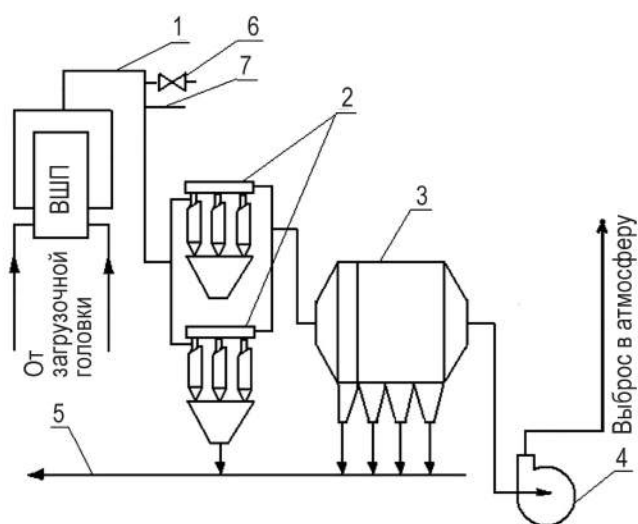


Рисунок 2 – Принципиальная схема газоочистки вращающихся печей № 1, 2:

1 – газоход от ВП № 1, 2; 2 – две группы по шесть циклонов ЦН-15; 3 – электрофильтр SPEIC; 4 – вентилятор ВМ-160/850У; 5 – пневмотранспорт пыли; 6 – клапан подсоса атмосферного воздуха; 7 – подача воды в газоход

Газоочистка работает следующим образом. Запыленный газ по двум газоходам Ø1220 мм, выходящим из ВШП, поступает в общий газоход Ø1820 мм, который раздваивается на газоходы Ø1200 мм. Для снижения температуры газовой среды, поступающей на газоочистку, дополнительно установлен клапан подсоса атмосферного воздуха ДХ-400. После него на газо-

ходе установлен ряд форсунок для подачи воды с целью увлажнения пылегазового потока, что повышает эффективность работы электрофильтра. (Следует отметить, что на данный момент система механического распыла жидкости находится в нерабочем состоянии.) Разбавленная атмосферным воздухом пылегазовоздушная смесь по газоходам Ø1200 мм поступает на первую ступень газоочистки, откуда она попадает в электрофильтр SPEIC, где происходит заключительный этап очистки.

Очищенные газы выбрасываются через общую дымовую трубу высотой 80 м и диаметром 2,5 м в атмосферу.

Принципиальная схема газоочистной установки (ГОУ) вращающихся печей № 3, 4 представлена на рис. 3.

Системы газоочистки отличаются только типом использованного тягодутьевого оборудования. На газоочистке ВП № 3 в качестве тягодутьевого оборудования установлен вентилятор ВМ-20А, а на газоочистке ВП № 4 – дымосос ВВН-20.

Принцип работы ГОУ ВП № 3, 4 такой же, как ГОУ ВП № 1, 2, за исключением следующих конструктивных особенностей:

- в качестве первой ступени очистки вместо групповых циклонов ЦН-15 используется одиночный циклон ЦП-2 Ø 3750 мм;
- для увлажнения пылегазового потока вместо ряда форсунок используется скруббер полного испарения 8 (в настоящее время он находится в нерабочем

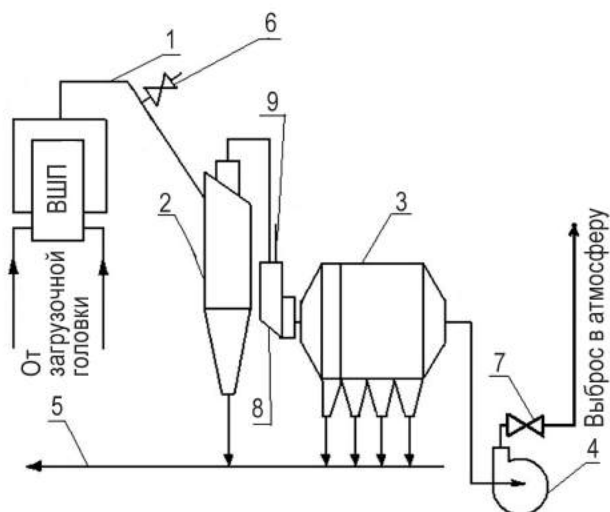


Рисунок 3 – Принципиальная схема газоочистки вращающихся печей № 3, 4:

- 1 – газоход от ВП № 3, 4; 2 – циклон ЦП-2; 3 – электрофильтр SPEIC; 4 – дымосос ВВН-20; 5 – пневмотранспорт пыли;
- 6 – клапан подсоса атмосферного воздуха; 7 – клапан;
- 8 – скруббер; 9 – подача воды на орошение скруббера

состоянии, а патрубки 9 подачи воды на его орошение демонтированы).

Пыль, накопленная в пылесборных бункерах циклонов и электрофильтров ГОУ ВП № 1–4 (рис. 4), направляется пневмотранспортом к месту хранения.

Электрофильтры, установленные на газоочистках ВП № 1–4, были реконструированы из электрофильтров УГ-2-3-53 путем замены старого внутреннего оборудования новым (производства фирмы SPEIC).

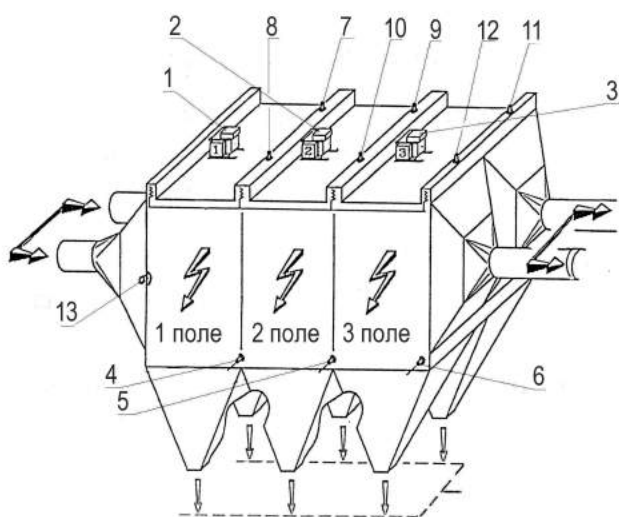


Рисунок 4 – Общий вид электрофильтра фирмы SPEIC:

- 1–3 – высоковольтные блоки питания; 4–6 – система встряхивания осадительных электродов;
- 7–12 – подогреватель изоляторов крыши; 13 – система встряхивания газораспределительной решетки

Электрофильтр SPEIC представляет собой сухой пластинчатый электрогазоочистный агрегат с коронирующими электродами ленточно-зубчатого типа и осадительными электродами желобчатого типа. Его рабочее пространство разделено на три электрополя, каждое из которых поделено на два полуполя, способных работать автономно, благодаря чему в случае неполадок полуполя могут быть изолированы друг от друга. Высота поля составляет 7600 мм, длина – 3345 мм, площадь осаждения – 1016 м². Каждое поле обслуживает высоковольтный блок питания 380 В (сила тока на линии – 93,7 А). Максимальное напряжение, подаваемое на поле, достигает 90 кВ, номинальный ток равен 0,4 А.

Очистка электродов осуществляется в продольном направлении электрофильтра механизмами встряхивания ударно-молоткового типа с наковальнями. Проектная остаточная запыленность после электрофильтра составляет 60 мг/м³.

На данный момент все системы газоочисток работают неэффективно, что подтверждено инструментальными обследованиями, результаты которых приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Пылевые замеры газовых потоков газоочисток ВП № 1–4

Вращающаяся печь	Запыленность, мг/м ³		КПД ГОУ, %
	Место проведения отборов пыли		
	вход	выход	
№ 1	2820	168	94,0
№ 2	2583	271	89,5
№ 3	2757	118	95,7
№ 4	4105	213	94,8

Экспериментальные данные по запыленности газа показывают превышение проектных значений (60 мг/м³), заложенных фирмой SPEIC, в 2,8 раза для ВП № 1, в 4,52 раза для ВП № 2, в 1,97 раза для ВП № 3 и в 3,55 раза для ВП № 4. Наиболее эффективно газоочистка работает после ВП № 3. Наихудшие показатели имеет ГОУ ВП № 2.

Процесс электрической очистки газов определяется в основном вольт-амперными характеристиками (ВАХ) электрофильтра, т.е. величинами силы тока и приложенного к электродам напряжения. ВАХ электрофильтра зависит как от конструктивных факторов (расстояния между электродами, формы и геометрических размеров коронирующих электродов), так и от технологических параметров запыленного газа (температуры, влажности, скорости и состава газа, количества и свойств пыли) [3].

ВАХ электрофильтров на воздухе в начальный период эксплуатации имели следующие показатели: максимальный ток коронного разряда – 370–400 мА, максимальное напряжение, подаваемое на электроды, – 50–57 кВ (рис. 5–7). При таких значениях электрических параметров обеспечивалась выходная запыленность не более 60 мг/нм³, что соответствовало проектным показателям.

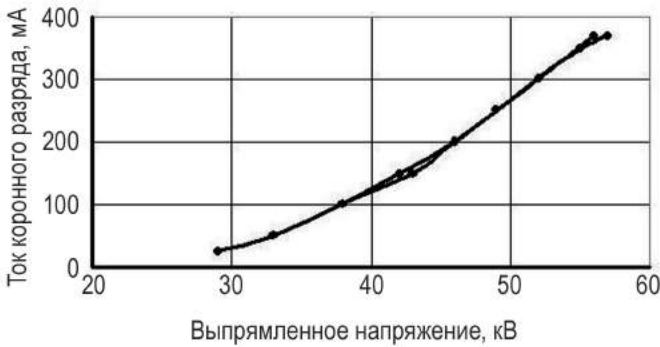


Рисунок 5 – Вольт-амперная характеристика первого поля электрофильтра № 3 на воздухе при пуске

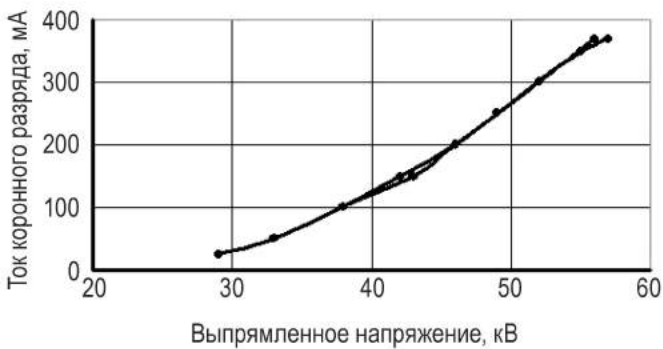


Рисунок 6 – Вольт-амперная характеристика второго поля электрофильтра № 3 на воздухе при пуске

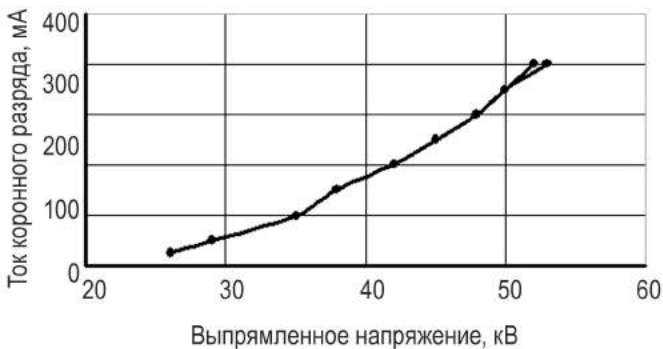


Рисунок 7 – Вольт-амперная характеристика третьего поля электрофильтра № 3 на воздухе при пуске

При обследовании построены ВАХ, снятые на воздухе (рис. 8–10).

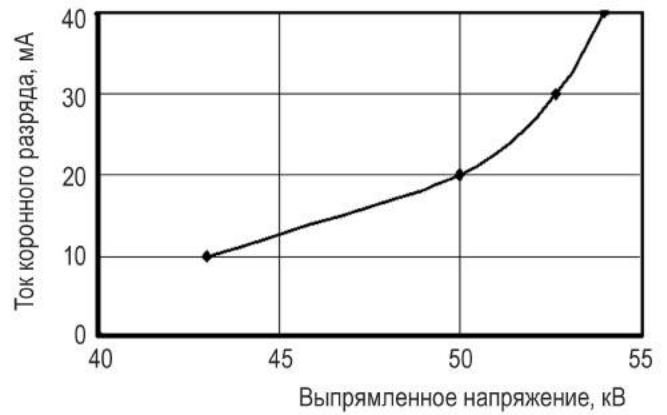


Рисунок 8 – Вольт-амперная характеристика первого поля электрофильтра № 3 на воздухе

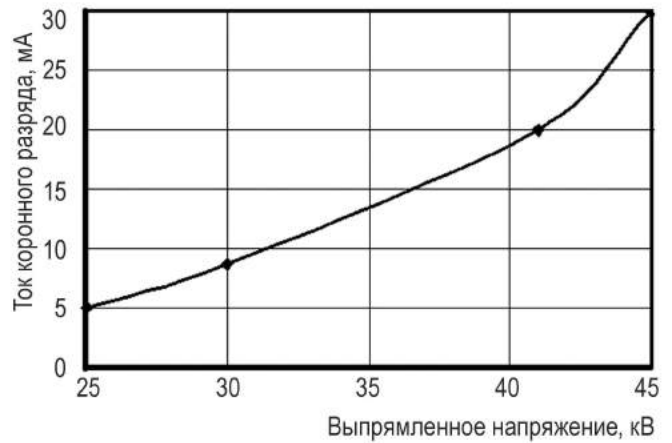


Рисунок 9 – Вольт-амперная характеристика второго поля электрофильтра № 3 на воздухе



Рисунок 10 – Вольт-амперная характеристика третьего поля электрофильтра № 3 на воздухе

Анализ приведенных выше ВАХ показывает, что значения тока коронного разряда первого и второго полей (30–40 мА) на порядок, а третьего поля – почти втрое меньше токовых значений, полученных при пуске электрофильтра после реконструкции.

Существенное отличие ВАХ электрических полей электрофильтра, снятых на воздухе в начале эксплуатации и спустя 18 лет при запыленных электродах, объясняется наличием слоя пыли на электродах, который является дополнительным резистором, последовательно соединенным с сопротивлением межэлектродного промежутка.

Пыль, осажденная на концах игл коронирующих электродов, увеличивает радиус кривизны коронирующего участка, что приводит к повышению напряжения зажигания короны и снижению тока в поле. Ухудшение электрических параметров электрофильтров является следствием уменьшения токообразующей способности коронирующих электродов из-за наличия на их поверхностях высокоомного пылевого необрушаемого слоя.

Снижение эффективности улавливания пыли объясняется уменьшением электрического заряда частиц (из-за их частичной перезарядки в зоне короны обратного знака) и пробивного напряжения, а также деформацией электрического поля в межэлектродном пространстве, вызывающей существенное снижение скорости дрейфа частиц [4].

Эффективная работа электрического пылеулавливающего оборудования в значительной степени зависит от состава и физико-химических свойств пыли, содержащейся в очищаемых газах.

В процессе выполнения данной работы были проведены исследования дисперсного состава пыли и ее удельного электрического сопротивления. Исследование дисперсного состава пыли проводили методами ситового анализа и оптической микроскопии с использованием набора сит и оптического микроскопа. Результаты исследований представлены в табл. 2 и на рис. 11.

Таблица 2 – Дисперсный состав известковой пыли вращающейся печи № 1 ПАО «МК «Азовсталь»

Размер фракции, мкм	< 5	5–10	10–15	15–20	20–40	40–60	> 60
Массовая доля фракции, %	40	20	15	10	10	3	2

Как следует из приведенных данных, известковая пыль является мелкодисперсной: основная масса частиц имеет размеры менее 60 мкм; средний медианный размер частиц (d_{50}) составляет 7 мкм.

Размер частицы влияет прежде всего на величину заряда, полученного частицей, и скорость ее движения (после зарядки) к осадительным электродам. Заряды более крупных частиц и скорости их движения к осадительным электродам больше, чем у мелких, поэтому крупные частицы улавливаются в электрофильтре лучше. К тому же при встряхивании электродной системы оторвавшиеся от поверхности электродов частицы падают в сборный бункер пыли с определенной скоростью витания, пропорционально зависящей от их размера. Так как скорость витания мелких частиц намного меньше скорости потока в электрофильтре, происходит их вторичный унос.

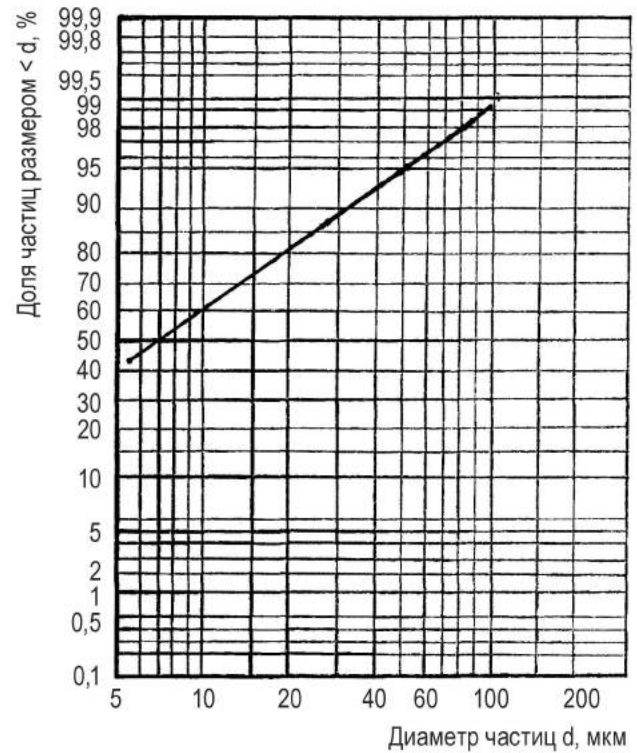


Рисунок 11 – Распределение уловленной пыли по фракциям

Эффективность работы электрофильтров существенно зависит от величины удельного электрического сопротивления (УЭС) пыли. Если УЭС превосходит 10^9 Ом·м, в электрофильтре проявляется эффект обратной короны и происходит значительное падение напряжения на слое высокоомной пыли, находящейся на электродах.

Исследования пыли различных производств, проведенные ГП «УкрНТЦ «Энергосталь», а также известные из литературы данные показывают, что зависимость УЭС пыли от температуры при постоянной влажности имеет экстремальный характер, обусловленный двумя различными видами электропроводности пыли – поверхностной (при низких температурах) и электронной (при высоких температурах).

Результаты исследований зависимости УЭС известковой пыли от температуры газов представлены на рис. 12. Как следует из графика, известковая пыль относится к классу высокоомных пылей. В диапазоне температур

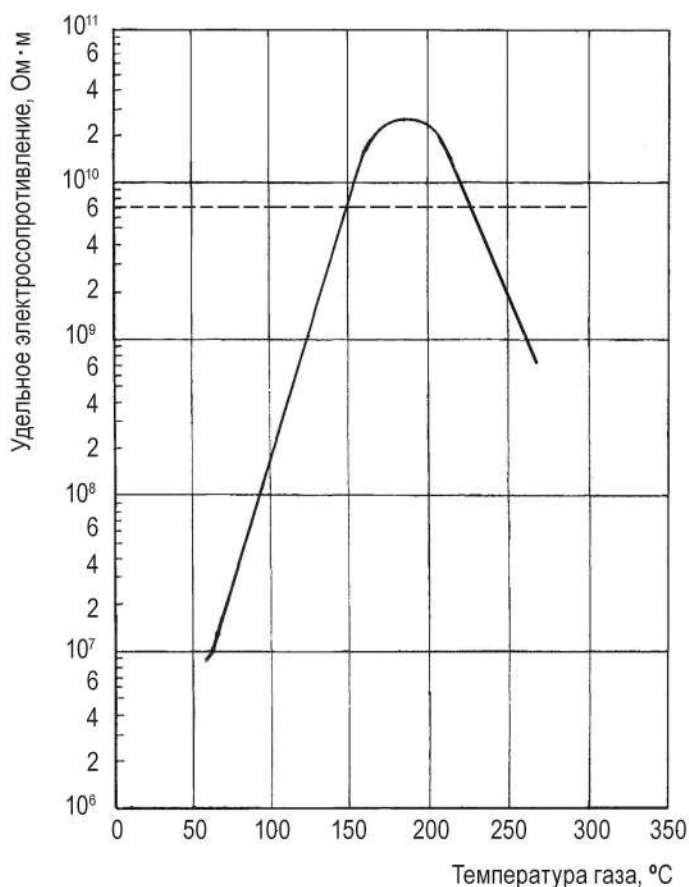


Рисунок 12 – Зависимость УЭС известковой пыли от температуры газов

----- линия, выше которой высока вероятность образования обратной короны

50–250 °C УЭС пыли изменяется в пределах 10^7 – 10^{10} Ом·м. Максимальные значения УЭС пыли достигаются в диапазоне температур 150–230 °C и соответствуют $2 \cdot 10^{10}$ Ом·м. При высоких значениях УЭС эффективность работы электрофильтра снижается.

На рис. 13–16 представлены графики, показывающие изменение температуры газов, поступающих на очистку в электрофильтры на протяжении 14 дней. Из них видно, что температурный режим работы электрофильтров крайне нестабильный. Это объясняется требованиями технологического процесса по поддержанию качества извести с частыми сменами производительности и, как следствие, изменением температуры отходящих газов.

Как следует из анализа температурных показателей работы электрофильтра газоочисток ВП № 1–4, средняя температура пылегазовой смеси составляет 190–230 °C, что соответствует максимальным значениям УЭС известковой пыли и приводит к образованию очагов обратной короны. При этом ухудшаются условия зарядки частиц в межэлектродном пространстве и наблюдается вторичный унос пыли. Таким образом, существующий температурный режим работы ЭФ ВП № 1–4 ИОЦ является крайне неблагоприятным с точки зрения эффективности очистки пылегазовоздушного потока от известковой пыли.

Для обеспечения снижения УЭС пыли температура газов, поступающих в электрофильтр, должна быть ниже

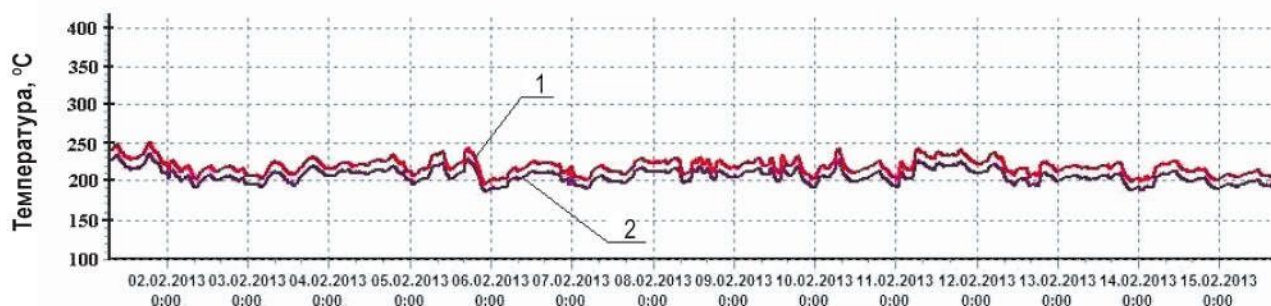


Рисунок 13 – Изменение температуры газов, поступающих в электрофильтр № 1: правая (1) и левая (2) стороны газохода перед ЭФ

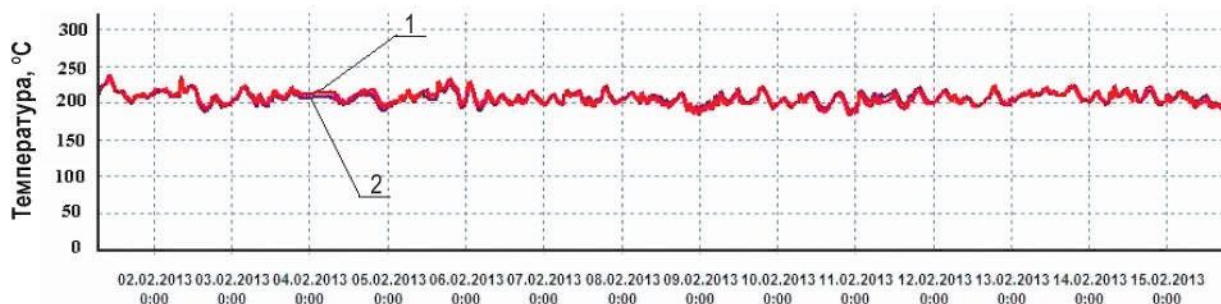


Рисунок 14 – Изменение температуры газов, поступающих в электрофильтр № 2: правая (1) и левая (2) стороны газохода перед ЭФ

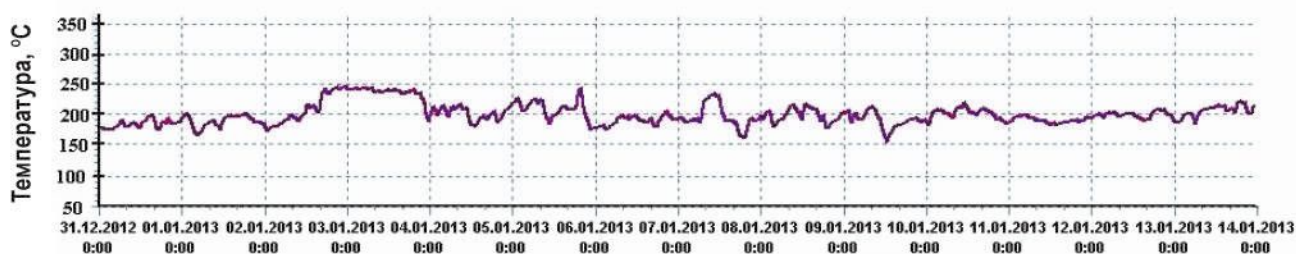


Рисунок 15 – Изменение температуры газов, поступающих в электрофильтр № 3



Рисунок 16 – Изменение температуры газов, поступающих в электрофильтр № 4

120–150 °С или выше 250–300 °С [3] (рис. 12). Однако постоянное поддержание температуры газов на входе в электрофильтры ВП № 1–4 ИОЦ в диапазоне 250–300 °С невозможно в связи с особенностями технологического процесса обжига извести. Кроме того, высокие температуры очищаемых газов могут вызвать деформацию электродов. Следует также отметить, что при температуре газа, превышающей 250 °С, колебания (даже в небольших пределах) подаваемого на электроды напряжения вызывают значительное изменение силы тока, вследствие чего резко сокращается диапазон напряжений, при которых возможна устойчивая работа электрофильтров (без пробоя). Ориентировочно можно принять, что величина пробойного напряжения электрофильтра обратно пропорциональна абсолютной температуре газа.

Экспериментально установлено, что с ростом плотности очищаемого газа устойчивая работа электрофильтра возможна при более высоком напряжении на электродах, так как увеличивается число частиц, способных переносить электрический заряд [5]. Следовательно, для снижения УЭС и повышения эффективности очистки газов от известковой пыли необходимо снизить температуру на входе в электрофильтр и обеспечить ее поддержание в диапазоне 120–150 °С.

Было предложено два варианта реализации данного мероприятия.

Первый вариант – восстановить кондиционирование отходящих газов водой на газоочистках ВП № 1, 2 (о применении этого способа свидетельствуют остатки трубопроводов системы кондиционирования на газоходах)

и установить скруббер полного испарения после циклонов газоочисток ВП № 3, 4. Следует отметить, что повышенная влажность газа, с одной стороны, способствует возрастанию значения напряжения, при котором происходит пробой, и уменьшению потребления тока в электрофильтре, а с другой – увеличивает слипаемость известковой пыли, т.е. имеет и отрицательное воздействие.

Второй вариант – разбавлять поступающую пылегазовоздушную смесь атмосферным воздухом с помощью существующих клапанов подсоса ДХ400. Чтобы реализовать данный вариант, требуется разработать и установить систему автоматического управления клапанами.

Для гарантированного снижения остаточной запыленности воздуха до 20 мг/м³ необходимо внедрение новых систем обеспыливания на базе рукавных фильтров типа ФРИР. Это предполагает поэтапное строительство четырех новых рукавных фильтров ФРИР-2400. Удельная газовая нагрузка на рукавный фильтр при производительности газоочистки одной ВП 180–200 тыс. м³/час составит не более 1,38 м³/(м²·мин), что обеспечит оптимальный режим его работы. Учитывая рабочие температуры газоочистки, рекомендуется применять теплостойкие рукава, рассчитанные на температуру 220–250 °С), а в качестве первой ступени использовать два параллельно включенных циклона СК-ЦН-34М-3600.

Принципиальная схема газоочисток с установкой новых рукавных фильтров показана на рис. 17.

Для подачи сжатого воздуха на регенерацию фильтровальных рукавов рекомендуется установить два

компрессора (рабочий и резервный), общие для всех четырех рукавных фильтров.

По причине увеличения аэродинамического сопротивления требуется заменить существующие вентиляторы новыми вентиляторами ВВР-18 (они устанавливаются с частотно-регулируемыми электроприводами).

Питание низковольтных двигателей вентиляторов осуществляется через комплекс оборудования частотного регулирования с использованием сухого силового понижающего трансформатора 10 кВ/0,68 кВт.

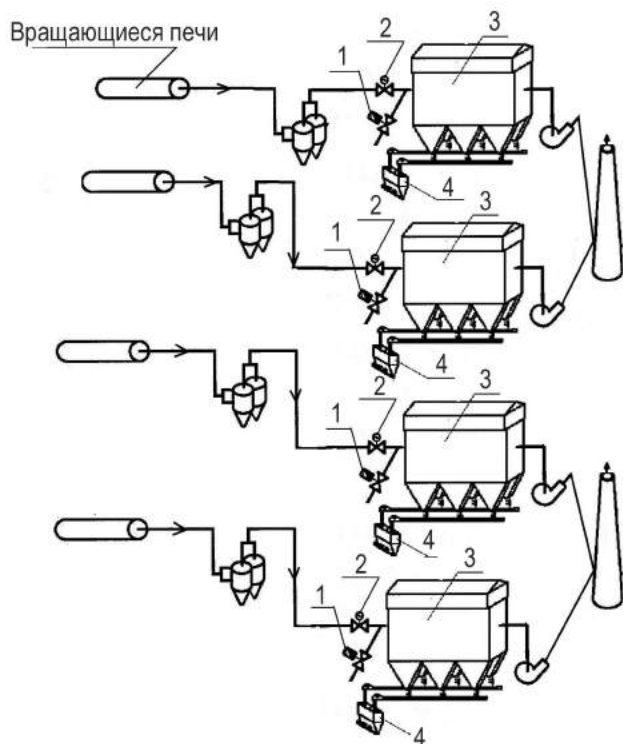


Рисунок 17 – Схема газоочистки ИОЦ с применением рукавных фильтров:

1 – подсосный клапан с ПВМ; 2 – клапан; 3 – рукавный фильтр ФРИР-2400; 4 – система пылеуборки

ВЫВОДЫ

Анализ температурного режима технологического процесса производства извести во вращающихся печах № 1–4 ИОЦ ПАО «МК «Азовсталь» и физико-химических свойств очищаемой среды с учетом физических законов взаимодействия пылевых частиц с электрическим полем, создаваемым электродной системой, позволяет сделать вывод о нецелесообразности применения электрофильтра как основного обеспыливающего агрегата для очистки пылегазовоздушной среды в известковом производстве. Наиболее выгодным с точки зрения эффективности, энерго- и эксплуатационных затрат в данном случае является применение рукавных фильтров типа ФРИР производства ГП «УкрНТЦ «Энергосталь», которые обеспечивают (в соответствии со схемой, предложенной выше) остаточную запыленность на уровне не более 20 мг/м³, что соответствует современным европейским стандартам.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Технология производства извести [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.ptechology.ru>.
2. **Монастырев А. В.** Производство извести / А. В. Монастырев. – М. : Высшая школа, 1971. – 272 с.
3. **Андоньев С. М.** Пылегазовые выбросы предприятий черной металлургии / С. М. Андоньев, Ю. С. Зайцев, О. В. Филипьев. – Харьков-Енакиево : ЕМЗ, 1998. – 246 с.
4. **Ужов В. Н.** Очистка промышленных газов электрофильтрами / В. Н. Ужов. – М. : Химия, 1967. – 344 с.
5. Пылеулавливание в металлургии : справочник / В. М. Алешина, А. Ю. Вальберг, Г. М. Гордон и др. – М. : Металлургия, 1984. – 336 с.

Поступила в редакцию 15.04.2014

Викладено результати обстеження системи очищення технологічних відхідних газів від обертових печей № 1–4 при виробництві вапна в умовах вапняно-обпалювального цеху ПАТ «МК «Азовсталь». Визначено основні причини неефективної роботи існуючої системи газоочистки. Надано рекомендації щодо її удосконалення. Запропоновано варіанти з впровадження нових систем знепилювання відхідних від обертових печей газів із застосуванням рукавних фільтрів типу ФРИР.

Results for investigations of cleaning system of process gases from rotating furnaces no. 1–4 when lime production in limekiln shop at PJSC «AZOVSTAL IRON & STEEL WORKS» are stated in article. Main causes of non-effective operation of existing gas cleaning system were determined. Recommendations for its upgrading were given. One be proposed versions for implementation of new dedusting system for waste gases from rotating furnaces using bag filter with impulse regeneration (BFIR type).