

УДК 621.928.93

Д.А. СЕРЕБРЯНСКИЙ, канд. техн. наук, главный инженер

ООО «Институт промышленной экологии», г. Киев

В.В. ГОРГОЛЮК, главный инженер

АО «Евроцемент – Украина»

С.В. ПЛАШИХИН, аспирант, **Н.В. СЕМЕНЮК**, ассистент

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт» (НТУУ «КПИ»), г. Киев

ДВУХУРОВНЕВЫЙ ЦЕНТРОБЕЖНЫЙ ФИЛЬТР

Приведены результаты аэродинамического расчета двухуровневого центробежного фильтра и сравнение его характеристик с параметрами, полученными в результате промышленных испытаний в системе аспирации цементной мельницы.

Ключевые слова: двухуровневый центробежный фильтр, эффективность очистки, аэродинамическое сопротивление.

Совершенствованию систем и аппаратов центробежной очистки газов от твердых частиц пыли уделяется большое внимание в разных странах мира. Интерес к данному типу оборудования обусловлен низкой стоимостью очистки, производимой с его помощью, по сравнению с очисткой фильтрационной техникой либо мокрыми системами.

В последнее время на промышленных предприятиях активно внедряются центробежные фильтры, основанные на системе каналов с замкнутыми контурами. Их конструкция позволяет объединить два процесса очистки – центробежную сепарацию и фильтрацию запыленного потока через зернистый слой циркулирующих внутри аппарата твердых частиц пыли.

Центробежные фильтры просты и надежны в эксплуатации, способны обеспечить очистку газового потока с начальной запыленностью 0,5–5 г/м³ до 50 мг/м³ для частиц пыли с медианным диаметром свыше 5 мкм и плотностью от 1500 кг/м³.

Ограниченность производственных площадей требует применения высокоэффективного пылеулавливающего оборудования с небольшими габаритными размерами. Зависимость между диаметром шестиканального центробежного фильтра и расходом очищаемого воздуха приведена в табл. 1.

Таблица 1 – Зависимость между диаметром шестиканального центробежного фильтра и расходом очищаемого воздуха

Расход очищаемого воздуха, тыс. м ³ /час	1	10	20	30
Диаметр аппарата, м	0,88	2,78	3,94	4,8

Уменьшить диаметр центробежного фильтра можно путем компоновки двух сепарационных камер, состоящих из системы каналов с замкнутыми контурами на одном бункере-пылесборнике. Габаритные размеры такого аппарата и зависимость между ними и расходом очищаемого воздуха приведены в табл. 2.

Таблица 2 – Зависимость между диаметром двухуровневого шестиканального центробежного фильтра и расходом очищаемого воздуха

Расход очищаемого воздуха, тыс. м ³ /час	1	10	20	30
Диаметр аппарата, м	0,62	1,97	2,78	3,4

Из приведенных в табл. 2 данных видно, что двухуровневая компоновка систем каналов в одной сепарационной головке аппарата позволяет добиться уменьшения диаметра центробежного фильтра в 1,4 раза, что значительно расширит круг его применения и облегчит транспортировку к объекту размещения.

В основе конструкции центробежных фильтров лежит система последовательно соединенных криволинейных каналов с одинаковыми углами поворота $\varphi_i = \pi$ и равными площадями поперечных сечений (рис. 1) [1, 2]. Каналы образуются двумя плоскими стенками и цилиндрическими полубочайками разной кривизны. Замкнутый контур возникает в двух соседних каналах при наличии эксцентриситета между осями вращения нечетных и четных полубочаек.

Центробежный фильтр работает следующим образом: запыленный газовый поток по тангенциальному входному патрубку 1 поступает в сепарационную камеру 8. Вследствие движения по криволинейной траектории

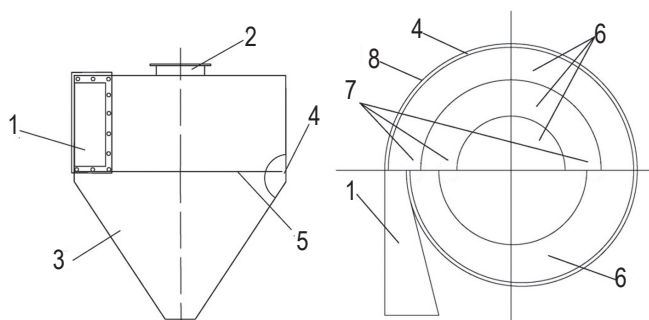


Рисунок 1 – Центробежный фильтр в четырехканальном исполнении:

- 1 – входной патрубок; 2 – выходной патрубок;
- 3 – конический бункер; 4 – кольцевая щель; 5 – днище головки;
- 6 – криволинейные каналы; 7 – рециркуляционные щели;
- 8 – сепарационная камера

твердые частицы концентрируются на периферии каждого из каналов 6 и выводятся оттуда через зазоры 7 в предыдущие (по ходу движения потока) каналы. Из первого и второго каналов 6 пыль вместе с частью газа поступает через кольцевую щель 4 в бункер-пылесборник 3, где основная масса частиц оседает. Продолжающие витать наиболее мелкие и легкие фракции возвращаются через щели 7 в каналы и снова сепарируются. В результате организации внутренних (циркулирующих) потоков в системе каналов образуется динамический газопылевой слой, который и является фильтром для вновь поступающих на очистку газа частиц.

Проведенные авторами исследования включали: выполнение численного расчета аэродинамических характеристик течения в двухуровневом центробежном фильтре; изготовление и установку промышленного образца фильтра; промышленную проверку выполненных расчетов на производительность фильтра до 22,5 тыс. м³/час в системе аспирации цементной мельницы Ø 4 × 15,5 [3].

Расчет аэродинамической картины течения газового потока проводился при помощи современных средств компьютерного моделирования на модели двухуровневого шестиканального центробежного фильтра ЦФ2-6-22.5, основные габаритные размеры которого приведены на рис. 2. Отличие конструкции данного аппарата от описанных в работах [1, 2] заключается в том, что в его сепарационной головке расположены две системы каналов (одна на другой) с замкнутыми контурами, при этом каждый уро-

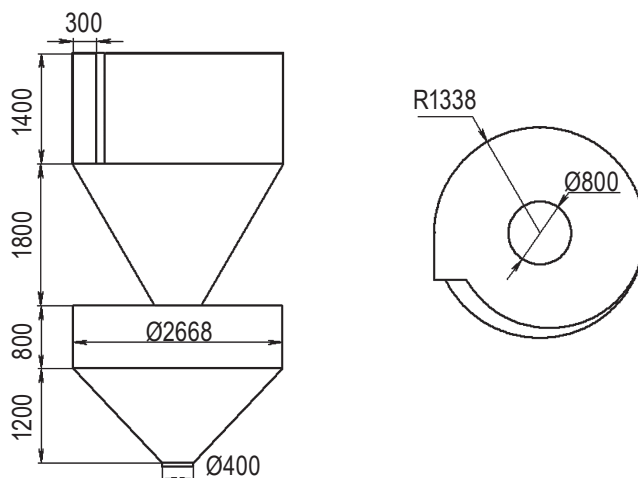


Рисунок 2 – Основные габаритные размеры центробежного фильтра ЦФ2-6-22.5 (ширина и высота криволинейного канала – 275 и 700 мм соответственно)

вень имеет отдельное сообщение с бункером-накопителем, служащее для отвода уловленных частиц пыли.

На первом этапе было рассчитано распределение скорости воздушного потока в средней линии по ширине и высоте криволинейных каналов на первом и втором уровнях сепарационной головки аппарата. Результаты расчетов представлены на рис. 3.

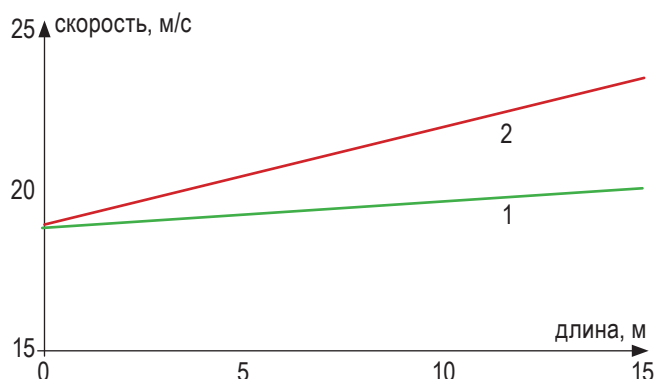


Рисунок 3 – Распределение скорости (по направлению линии тока) в системах каналов с замкнутыми контурами:

- 1 – первый уровень центробежного фильтра;
- 2 – второй уровень центробежного фильтра

Из приведенного на рис. 3 графика можно сделать вывод о линейном росте скорости с увеличением кри-

Таблица 3 – Расходы рециркуляционных потоков в системе каналов с замкнутыми контурами

Уровень	Параметр	из VI в V	из V в IV	из IV в III	из III во II	из II в I
Первый	Расход потока, м ³ /час	1732	1494	1644	892	2143
	Скорость, м/с	23,4	23,0	22,0	16,0	17,4
Второй	Расход потока, м ³ /час	1600	1024	1300	909	1426
	Скорость, м/с	21,0	18,7	17,0	16,5	19,0

визны потока (длины пути). При этом рост скорости потока на втором уровне аппарата носит более масштабный характер, чем на первом: на втором уровне скорость увеличивается в 1,3 раза по сравнению с первоначальным значением, а на первом уровне – всего в 1,1 раза. Различные характеры возрастания скоростей могут быть следствием разности расходов воздушного потока либо результатом действия вихрей в центральной области системы каналов.

Для подтверждений данных предположений оценим расходы рециркуляционных потоков на двух уровнях центробежного фильтра (табл. 3).

Из приведенных в табл. 3 данных следует, что доля расхода рециркуляционного потока первого уровня составляет около 14 % от половины расхода воздуха на входе в аппарат (22500 м³/час), а доля расхода рециркуляционного потока второго уровня – около 11 % от половины расхода воздуха на входе. Таким образом, можно предположить, что аэродинамическое сопротивление второго уровня аппарата меньше, чем первого, вследствие чего интенсивность роста скорости воздушного потока на втором уровне выше, чем на первом.

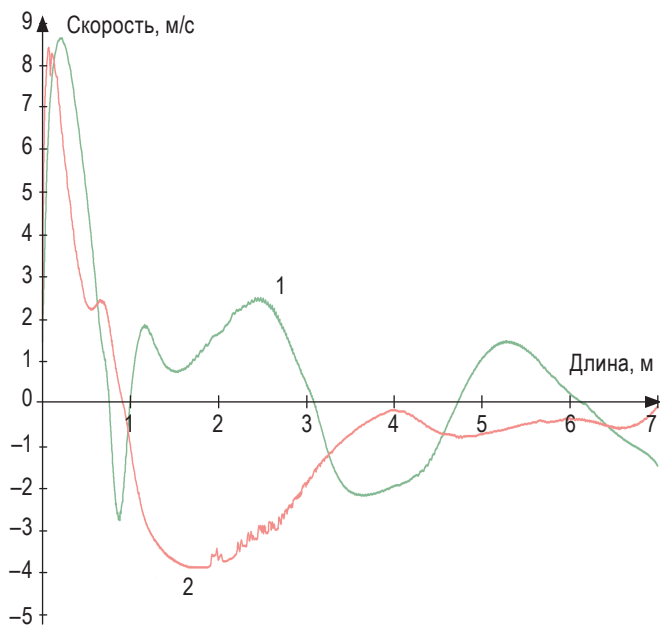


Рисунок 4 – Распределение осевой скорости потока вдоль пылеотводящих щелей:
1 – первого уровня; 2 – второго уровня

Рассмотрим скорости потока вдоль кольцевых щелевых пылеотводящих окон центробежного фильтра. Из приведенных графиков можно сделать вывод о том, что осевая скорость потока в пылеотводящей щели первого уровня направлена преимущественно в сторону, противоположную направлению осаждения твердых частиц.

Такое направление потока характерно для пылеотводящей щели второго уровня только в области входного патрубка. Далее оно соответствует направлению осаждения твердых частиц в бункер-накопитель центробежного фильтра. Разный характер направлений осевой скорости для первого и второго уровней может быть объяснен удалением сепарационного канала от бункера-накопителя. Поток из второго канала попадает в кольцевой канал (имеющий ту же высоту, что и сепарационный канал), в котором происходит снижение окружных скоростей потока.

Усреднение значений компонентов скоростей позволило определить расходные характеристики воздушного потока в пылеотводящих щелях центробежного фильтра. На первом уровне аппарата расход потока из бункера в первый канал через пылеотводящую щель составляет 402 м³/час. Во втором канале первого уровня поток преимущественно направлен в бункер и его расход составляет 50 м³/час. Эти значения коррелируют с распределением осевой скорости (рис. 4) вдоль пылеотводящих щелей (общей длиной 7 м), из которых первая половина относится к первому каналу, вторая – ко второму. На втором уровне аппарата характер течения становится противоположным происходящему на первом уровне, при этом расход потока из первого канала в бункер достигает 687 м³/час. Во второй канал поток поступает преимущественно из бункера через пылеотводящую щель с расходом 499 м³/час. Таким образом, в сепарационных каналах фильтра наблюдаются внутренние перетоки потока между первым и вторым уровнями центробежного фильтра.

Распределение статического давления в поперечном сечении центробежного фильтра приведено на рис. 5.

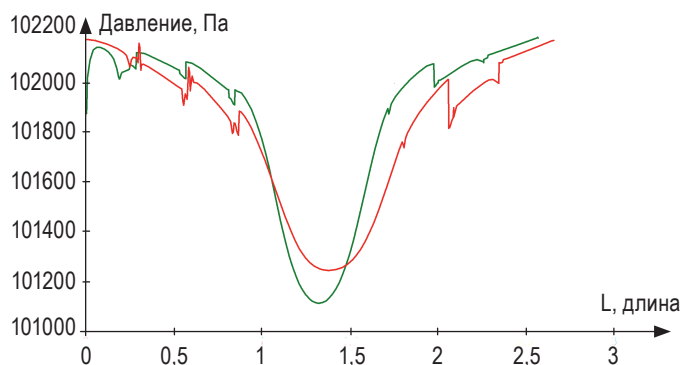


Рисунок 5 – Распределение статического давления в поперечном сечении центробежного фильтра:
1 – на первом уровне; 2 – на втором уровне

Из приведенного графика можно сделать вывод о преимущественных затратах энергии в центробежном фильтре в центральной области системы каналов



с замкнутыми контурами. Отрезки по оси абсцисс 0–1 м и 2–3 м соответствуют средней линии в поперечном сечении криволинейных каналов. Потеря напора в них не превышает 400 Па. Отрезок по оси абсцисс 1–2 м соответствует центральной области системы каналов, в которой формируется интенсивный вихрь. Потери напора в этой области в 2–3 раза больше, чем на других участках системы каналов, и достигают 600 Па.

Следует отметить, что центральная область системы каналов имеет в четыре раза большую площадь поперечного сечения по сравнению со значением этого параметра у сепарационного канала. Снижения потерь напора в центральной области можно достичь применением раскручивателей потока на выходе из аппарата и увеличением соотношения между площадями поперечных сечений канала и центральной области системы. Общее аэродинамическое сопротивление центробежно-го фильтра составляет 928 Па.

Промышленная проверка данных, полученных расчетным путем, проводилась на Балаклейском цементном заводе АО «Евроцемент – Украина» на системах аспирации цементных мельниц. Каждая из этих систем представляет собой трехступенчатую установку, состоящую из центробежных фильтров (одного двухканального и двух шестиканальных) и рукавного фильтра СМЦ.

Принципиальная технологическая схема приведена на рис. 6.

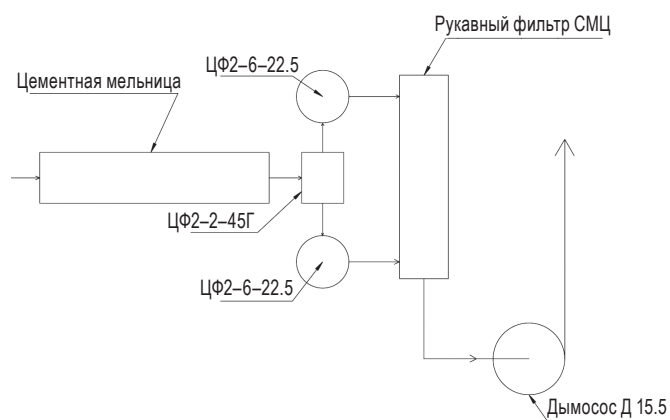


Рисунок 6 – Принципиальная схема аспирационной системы цементных мельниц Ø 4 × 15,5

Система аспирации работает следующим образом. Запыленный газовый поток от цементной мельницы поступает в центробежный фильтр ЦФ2-2-45Г, где происходит предварительная очистка потока от пыли (первая ступень очистки). В аппарате ЦФ2-2-45Г поток распределяется по двум камерам для дальнейшей очистки, после чего он выходит с двух сторон боковых стенок аппарата и по воздуховоду (D = 800 мм) направляется на вторую

ступень очистки – шестиканальные центробежные фильтры ЦФ2-6-22,5. В этих фильтрах происходит основная очистка газового потока от цементной пыли. Затем очищенный поток по газоходам (D = 800 мм) направляется в рукавный фильтр СМЦ, в котором происходит очистка газового потока до конечной запыленности 50 мг/м³.

Параметры пылевоздушного потока измерялись в соответствии с методикой МВВ-081/12-0161-05. Испытания проводились в двух режимах – при открытии на 50 и 90 % шиберы дымососа Д-15,5 с электродвигателем 200 кВт.

Основные результаты работы системы аспирации мельницы № 8 Балаклейского цементного завода приведены в табл. 4.

Таблица 4 – Основные технические параметры работы системы аспирации цементной мельницы Ø 4 × 15,5

Параметр	Открытие шиберы дымососа	
	на 50 %	на 90 %
Температура газа на входе в ЦФ2-6-22,5 (°С)	68	78
Температура газа на выходе из ЦФ2-6-22,5 (°С)	64	76
Разрежение в загрузочной воронке мельницы (Па)	37	90
Разрежение перед ЦФ2-6-22,5 (Па)	370	450
Разрежение за ЦФ2-6-22,5 (Па)	570	1100
Расход газа на входе в ЦФ2-6-22,5 (м ³ /час)	10700	22000
Расход газа на выходе из ЦФ2-6-22,5 (м ³ /час)	10800	22047
Расход газа на выходе из рукавного фильтра СМЦ (м ³ /час)	12400	24900
Запыленность газа на входе в ЦФ2-2-45Г (г/м ³)	86	140
Запыленность газа на входе в ЦФ2-6-22,5 (г/м ³)	25,8	35
Запыленность газа на выходе из ЦФ2-6-22,5 (г/м ³)	1,8	2,1
Запыленность газа на выходе из фильтра СМЦ (г/м ³)	0,054	0,105
Аэродинамическое сопротивление ЦФ2-6-22,5 (Па)	210	650
Коэффициент улавливания пыли в ЦФ2-6-22,5 (%)	93	94

Как показали промышленные испытания, средняя эффективность улавливания пыли в центробежных фильтрах ЦФ2-2-45Г доходила в среднем до 70–75 %, а в ЦФ2-6-22,5 – достигала 93–94 %. Аэродинамическое сопротивление центробежных фильтров при нагрузке 50 и 90 % составляло соответственно 200 и 400 Па в ЦФ2-2-45Г, 500 и 860 Па – в ЦФ2-6-22,5. Производительность

мельниц в рабочих режимах варьировалась в диапазоне 85–90 т/час.

В результате проведенной модернизации систем аспирации достигнуто:

- увеличение производительности цементных мельниц на 20 %;
- снижение удельных энергозатрат на помол клинкера с 50 до 35 кВт·час/т цемента.

ВЫВОДЫ

Предложен способ уменьшения диаметра центробежного фильтра путем двухуровневой компоновки систем каналов в одной сепарационной головке аппарата (такая конструкция имеет в 1,4 раза меньший диаметр, чем при одноуровневой компоновке).

Установлен рост скорости потока по линии тока на первом и втором уровнях аппарата (на первом уровне – от первого до шестого канала – в 1,1 раза, на втором уровне – в 1,3 раза по сравнению с ее первоначальным значением), имеющий различный характер, что может быть обусловлено интенсивным вихреобразованием в центральной области системы каналов (данное предположение требует дальнейших теоретических и экспериментальных исследований).

Проведенный расчет аэродинамических характеристик газового потока в двухуровневом центробежном фильтре выявил также неравномерность расхода рециркуляционного потока по уровням аппарата: на первом уровне аппарата расход составил 3150 м³/час, на втором – 2475 м³/час при начальном расходе на входе в аппарат 22500 м³/час.

Расчетными методами установлено, что потери напора в центральной области системы каналов

с замкнутыми контурами в центробежном фильтре в 3–4 раза выше, чем во всех каналах в целом.

Промышленная проверка адекватности данных, полученных в результате расчетов аэродинамического сопротивления центробежного фильтра, показала удовлетворительную сходимостью расчетного значения аэродинамического сопротивления центробежного фильтра ЦФ2-6-22,5 (928 Па) с экспериментально определенным значением (650 Па). Расхождение между этими результатами может быть следствием эксплуатации только первого уровня (второй был перекрыт шибером).

Применение центробежных фильтров в системе аспирации цементных мельниц позволило стабилизировать расходы воздушных потоков в их сечениях, вследствие чего производительность мельниц увеличилась на 20 %. Удельные энергозатраты на помол клинкера снизились с 50 до 35 кВт·час/т цемента.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Использование пылеуловителей новой конструкции вместо циклонов / А. А. Буров, Д. А. Серебрянский, А. П. Лепихин, И. В. Деревянченко // *Металлург.* – 2004. – № 5. – С. 23–27.
2. Патент 78157 Україна, МПК В04С1/00. Відцентровий фільтр / Серебрянский Д. О., Приюмов С. І.; заявник і володілець патенту Серебрянский Д. О. – № а200510543; заявл. 08.11.05; опубл. 15.02.07, Бюл. № 2. – 3 с. : іл.
3. **Серебрянский Д. А.** Увеличение производительности цементных мельниц путем модернизации систем аспирации / Д. А. Серебрянский, В. В. Горголюк, Д. Л. Аникин // *Цемент и его применение.* – 2013. – № 3. – С. 90–92.

Поступила в редакцию 03.04.2014

Наведено результати аеродинамічного розрахунку дворівневого відцентрового фільтра і порівняння його характеристик з параметрами, які отримано в результаті промислових випробувань у системі аспірації цементного млина.