

Орлов С.М., к.т.н., Дмитроченкова Э.И.

Донбасская национальная академия строительства и архитектуры,
г. Макеевка

ИССЛЕДОВАНИЕ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОГО ЦИКЛОНА КАК ПЕРВОЙ СТУПЕНИ ОЧИСТКИ ГАЗА ОТ ПЫЛИ

При очистке газа от пыли наибольшее распространение получили циклоны, которые, как правило, устанавливаются в качестве предварительной очистки. При этом аппараты тонкой очистки рассчитываются на весь объем газа. Полностью не исследован вопрос концентрации пыли в выхлопной трубе. Установлена принципиальная возможность усовершенствования циклона, позволяющая в несколько раз уменьшить объемы газа, направляемого на вторую ступень очистки, и получить большой экономический эффект.

Постановка проблемы

Воздушные выбросы промышленных предприятий наносят вред окружающей природной среде, загрязняют атмосферу промплощадок и жилых районов, что ослабляет здоровье людей, увеличивает потребность в проведении различного рода профилактических и медицинских мероприятий, приводит к дополнительным экономическим потерям. Циклоны являются наиболее характерными представителями сухих инерционных пылеуловителей. Существует множество схем обеспыливания газов, в зависимости от источника пылеобразования, где циклоны применяются в качестве первой степени очистки [1, 2, 3, 4]. Аппараты второй степени (рукавные, электрофильтры и др.) рассчитываются на весь объем газа, подлежащего очистке и требуют значительно больших капитальных и эксплуатационных затрат.

Цель статьи и формулировка задачи исследований

Данная работа посвящена исследованию циклонов, особенно концентрации пыли в выхлопной трубе, с целью усовершенствования циклонов для уменьшения объемов газов, направляемых на аппараты второй степени очистки.

Изложение основного материала исследований

В циклонах наиболее совершенных конструкций можно достаточно полно улавливать частицы размером от 10 мкм и более, однако наблюдается проскок достаточно крупных частиц, поэтому зачастую циклоны используются в качестве первой степени очистки перед аппаратами тонкого пылеулавливания.

Теории циклонной сепарации посвящено множество работ. До последнего времени при теоретическом рассмотрении такой сепарации обычно принимали, что тангенциальная скорость частицы совпадает со скоростью среды, и рассматривали радиальную, относительную скорость, возникающую под действием центробежной силы. Это утверждение справедливо для частиц пыли диаметром более 10 мкм.

В литературе приводятся формулы для определения минимального диаметра, т. е. размера наименьших частиц, полностью сепарирующихся из криволинейного потока в циклоне, в зависимости от скорости потока воздуха и геометрии циклонов. Формулы различаются по написанию, но все выводятся из одного и того же условия, а именно равенства центробежной силы силе сопротивления среды [5]:

$$mv^2 / R = 3\pi\omega_p d\mu, \quad (1)$$

где m – масса частицы, кг;

v – скорость газового потока, принимаемая равной скорости газов во входном патрубке и скорости частиц, находящихся в газах, $м/с$;

R – расстояние от центра вращения газового потока (оси циклона) до частицы, $м$;

ω_p – скорость движения частицы пыли в радиальном направлении к стенке циклона, $м/с$;

d – диаметр пылинки, $м$;

μ – вязкость газовой среды, $Н·с/м^2$.

Оказалось, что для расчета циклонов эти формулы неприменимы. Все они устанавливают чрезмерно высокую эффективность – полное отделение сравнительно мелких частиц. В действительности полное осаждение отдельных фракций не достигается и зачастую происходит проскок очень крупных частиц. Наблюдается лишь повышение эффективности по мере увеличения размера частиц.

Несоответствие теории экспериментам объясняется неполным учетом составляющих силы инерции, в особенности на начальном участке сепарации, а также влиянием возникающих циркуляционных течений.

Тер-Линденом было измерено изменение статического давления и тангенциальных составляющих скоростей в нескольких поперечных сечениях циклона [6]. Эти измерения позволили сделать вывод, что в циклоне возникают вторичные токи.

На рис. 1 показана схема циркуляции, возникающей в циклонном аппарате [6]. В верхней части аппарата вторичные токи сливаются с парным вихрем, образующимся при тангенциальном втекании струи в циклон. Образование парного вихря объясняется тем, что по мере удаления от оси вращения скорость газа уменьшается, вызывая возрастание давления. Повышение давления достигает наибольшей величины в слоях воздуха, прилегающих к внешней границе потока. Под влиянием этого давления воздух перетекает вдоль внешних границ в сторону низких давлений, образуя парный вихрь, который может быть назван вторичным, так как вызван основным вихревым течением в циклоне. Верхняя часть вторичного вихря циклона устремляется по кратчайшему пути к устью выхлопной трубы, а нижняя, распространяясь вдоль образующих циклона, формирует восходящий поток циклона, как это показано на рис. 1.

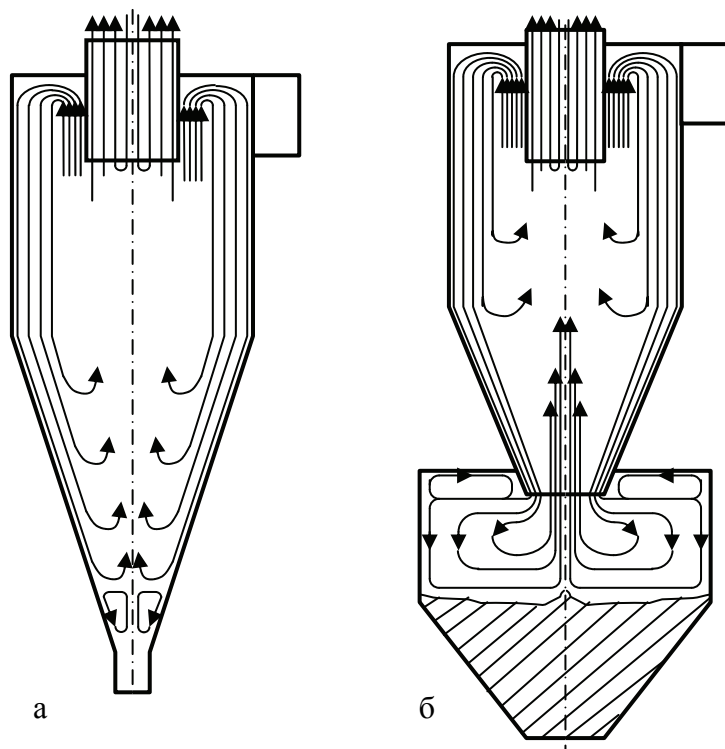


Рис. 1. Схема вторичных токов в циклоне:
а – без бункера; б – с бункером

Вторичные токи оказывают большое влияние на эффективность циклонов. Верхняя ветвь вихря является кратчайшим путем для выноса пыли в выхлопную трубу. Для ослабления влияния этого течения увеличивают глубину погружения выхлопной трубы. Исследования показали, что с увеличением глубины ее погружения действительно наблюдается повышение эффективности, связанное, по-видимому, с уменьшением выноса вторичным течением пыли, не успевшей при меньшем погружении за короткое время формирования вращающегося потока перейти из слоев воздуха, опускающихся вдоль выхлопной трубы, в более удаленные слои. При дальнейшем погружении эффективность вновь падает.

Анализируя вторичные токи (рис. 1) приходим к выводу, что чем короче путь вторичного течения, тем ближе он проходит к стенке выхлопной трубы. В центре восходящего вихря, прошедшего через бункер, присутствует только мелкодисперсная пыль, которая может быть снова вынесена во внешний поток и уловлена или снова вынесена из бункера. Пыль, попавшая в выхлопную трубу, выносятся из циклона, снижая тем самым степень очистки. Множество экспериментальных данных указывает, что в выхлопной трубе находится в основном мелкодисперсная пыль диаметром менее 10 мкм.

Можно сделать предположение, что концентрация пыли в выхлопной трубе крайне неоднородная. Пыль за счет центробежной силы в основном сосредоточена у стенок выхлопной трубы и чем больше, тем ближе к выходу выхлопной трубы. Таким образом, если на выходе из выхлопной трубы установить кольцевой зазор, через который будет удаляться только часть запыленного воздуха, то нагрузка на аппараты тонкой очистки значительно снизится, чем будет достигнут большой экономический эффект [7].

Принцип работы пылеотделителя показан на рис. 2. Запыленный газ 1 подводится через входной патрубок 2 в корпус циклона 3. Пройдя цикл очистки от крупной и среднелдисперсной пыли, газ с высокодисперсной пылью переходит в восходящий винтовой поток. Под действием центробежных сил восходящий поток условно разделяется на два потока: с высокой концентрацией пыли 4 и низкой концентрации пыли 5. Поток с высокой концентрацией пыли через улиточный отвод 6 подается на аппараты тонкой очистки, а очищенный поток 5 через вставку 7 удаляется в атмосферу.

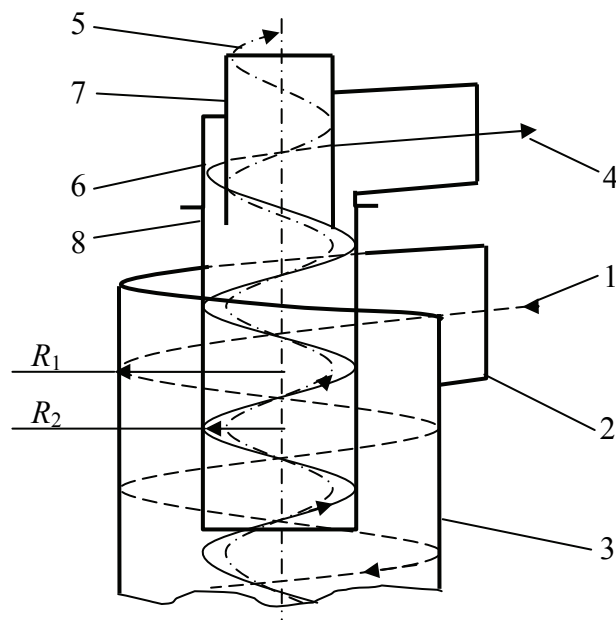


Рис. 2. Схема первичных потоков в верхней части циклона

Распределение тангенциальной скорости газа в выхлопной трубе циклона по данным экспериментальных исследований [8] носит сложный характер. В центральной части потока, в так называемом ядре вихря, тангенциальная скорость возрастает с увеличением радиуса R

по закону: $U_T = \omega R$ (зона твердого тела), а затем по мере приближения к стенке выхлопной трубы за счет трения убывает. Возможность детальной аппроксимации закона убывания тангенциальной скорости в пристенной зоне затруднен из-за недостатка экспериментальных данных. В работе [8] для этой цели применяется закон площадей $U_T = K/R$. Тогда используя оба закона, получим для распределения тангенциальной скорости газа в сечении выхлопной трубы циклона следующее выражение:

$$U_m = \begin{cases} \omega R & 0 \leq R \leq R_m \\ \omega R_m^2 / R & R_m \leq R \leq R_2 \end{cases}, \quad (2)$$

где ω – угловая скорость вращения ядра потока;

R_m – радиус зоны твердого тела (для циклонов ЦН $R_m = 0,83 R_2$ [6];

R_2 – радиус выхлопной трубы.

Использование закона распределения тангенциальной скорости (2) вместо закона твердого тела по всему сечению выхлопной трубы более точно отражает физическую сущность процесса и приводит к уменьшению скорости концентрации частиц у стенок выхлопной трубы на 20-30 %. Однако это уменьшение в данном случае можно не учитывать, поскольку радиус вставки 7 (рис. 2) составляет (0,8-0,9) R_2 .

Поэтому распределение тангенциальной скорости по радиусу в выхлопной трубе принимаем таким же, как и в ядре вихря, то есть считаем, что воздух вращается как твердое тело и отличается постоянной угловой скоростью [6].

Тогда центробежная сила, действующая на частицу пыли, с учетом выше изложенного (переходя от массы к диаметру частицы) будет иметь вид [5]:

$$F_u = \frac{\pi d^3 \rho \omega^2 R}{6}, \quad (3)$$

где d – диаметр частицы пыли, м;

ρ – плотность пылинки, $кг/м^3$;

ω – угловая скорость вращения воздушного потока, $с^{-1}$;

R – текущий радиус, м.

Под действием центробежной силы частица движется в радиальном направлении к стенке выхлопной трубы со скоростью ω_p . Этому движению газовая среда оказывает сопротивление, величину которого определяют по формуле [5]:

$$F = 3\pi\omega_p d \mu, \quad (4)$$

где μ – вязкость газовой среды, $Н \cdot с/м^2$.

Поскольку частица пыли находится в криволинейном потоке уже достаточно долгое время, то можно считать, что частица пыли движется в радиальном направлении с постоянной скоростью, которую можно определить из равенства:

$$\frac{\pi d^3 \rho \omega^2 R}{6} = 3\pi\omega_p d \mu.$$

Тогда скорость частицы в радиальном направлении будет равна

$$\omega_p = \frac{d^2 \rho \omega^2 R}{18\mu}. \quad (5)$$

Из формулы (5) видно, что с увеличением и радиуса R радиальная скорость ω_p прямо пропорционально возрастает. Таким образом, можно сделать вывод, что частицы пыли, во-

шедшие в выхлопную трубу на расстоянии близком к $R = 0$, не достигнут стенки выхлопной трубы циклона, а соответственно и не попадут в зону отсоса сконцентрированной пыли.

Решение уравнения (5) в натуральном виде затруднено, поэтому необходимо определить минимальный радиус R_{\min} , при котором частица пыли будет успевать попасть в зону отсоса сконцентрированной пыли. Радиус R может изменяться в пределах $0 \leq R \leq R_2$ (рис. 2).

Наиболее длинный путь в радиальном направлении будет у той частицы, которая при входе в выхлопную трубу находилась по центру восходящего вихря. Время, которое требуется для того чтобы такая пылинка успела пройти путь R_2 , равно:

$$t_{\delta} = \frac{R_2}{\omega_p} = \frac{18\mu R_2}{d^2 \rho \omega^2 R}. \quad (6)$$

Как видно из формулы (6) при $R \rightarrow 0$, $t_{\delta} \rightarrow \infty$. Следовательно, чем меньше будет R , тем больше будет t_{δ} – время дрейфа пылинки в радиальном направлении. Время нахождения пылинки в выхлопной трубе циклона различно и зависит от конструктивных параметров циклона. Проанализировав конструктивные особенности циклонов разных типов, приходим к выводу, что время нахождения пылинки в выхлопной трубе циклона при одинаковой угловой скорости зависит только от типа циклона и полностью не зависит от размера, поскольку все конструктивные размеры циклонов жестко привязаны к диаметру циклона.

Проанализировав наиболее распространенный циклон типа ЦН и сделав несложные математические преобразования, получим зависимость t_{ψ} – время нахождения пылинки в выхлопной трубе циклона:

$$t_{\psi} = \frac{2K_{\psi}}{\text{Sin}\alpha\omega}, \quad (7)$$

где α – угол наклона ввода в циклон;

K_{ψ} – коэффициент отношения длины выхлопного патрубка к диаметру циклона.

Как видно из формулы (7), время нахождения пылинки в циклоне не зависит от размера циклона, а зависит от коэффициента отношения длины выхлопного патрубка к диаметру циклона K_{ψ} , угла наклона α и угловой скорости ω . Чем больше угловая скорость или угол наклона, тем меньше время нахождения пылинки в выхлопной трубе циклона и наоборот, чем больше K_{ψ} , то есть длина выхлопной трубы, тем больше время нахождения пылинки в выхлопной трубе циклона.

Приравняв время дрейфа (6) и время нахождения пылинки в выхлопной трубе (7) и решив относительно диаметра частиц d_{\min} и относительно минимального радиуса R_{\min} , а так же учитывая, что $R_2 = 0,295D$ для циклонов ЦН, получим:

$$d_{\min} = \sqrt{\frac{2,66\mu D \text{Sin}\alpha}{K_{\psi} \rho \omega R}}; \quad (8)$$

$$R_{\min} = \frac{2,66\mu D \text{Sin}\alpha}{K_{\psi} d^2 \rho \omega}. \quad (9)$$

Аналогичные формулы можно получить и для циклонов других типов.

Данные теоретические исследования показывают, что в центре восходящего вихря существует R_{\min} , так называемая мертвая зона, в которой пылинки определенного размера не успевают достичь стенок выхлопной трубы и выносятся из циклона (9). Таким образом, данное утверждение наталкивает на мысль, что в выхлопной трубе целесообразно установить отклоняющую вставку, размеры которой можно определить по формуле (9) в зависимости от минимального размера частиц, подлежащих улавливанию. При помощи формулы (8) можно

определять минимальный размер частиц, которые будут сепарироваться у стенки выхлопной трубы при определенном размере отклоняющей вставки.

На рис. 3 показана усовершенствованная конструкция циклона как первой степени очистки. Между цилиндрической вставкой 1 и выхлопной трубой 2 образуется кольцевой зазор, через который часть газа вместе со сконцентрированной пылью направляется на вторую (тонкую степень очистки). Диаметр вставки $D_{вс}$ можно определить по формуле:

$$D_{вс} = 0,59D\sqrt{1-\frac{1}{k}}, \quad (10)$$

где k – коэффициент, показывающий во сколько раз площадь поперечного сечения выхлопной трубы больше площади кольцевого зазора.

Коэффициент k показывает во сколько раз объем газа, направляемого на вторую степень очистки, меньше всего объема газа, проходящего через циклон.

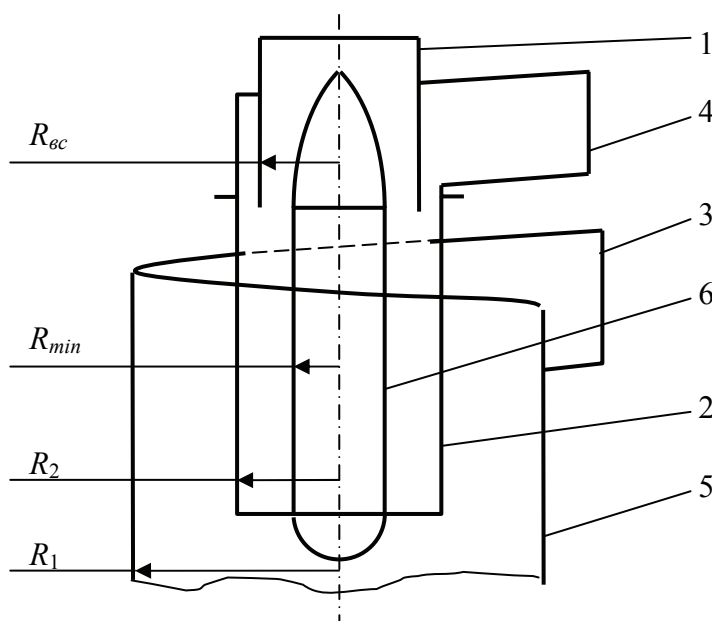


Рис. 3. Усовершенствованная конструкция циклона как первой степени очистки

Формулы (8) и (9) были получены с рядом допущений. Например, не учитывается влияние беспорядочного вихревого движения вращающегося газового потока; принималось, что частицы пыли шарообразной формы не изменяются и не коагулируют в процессе концентрации; не учитывалось, что пылинка должна пройти меньший путь, чем R_2 , т. д.

Следует так же отметить, что в выхлопной трубе устанавливается цилиндрическая вставка и поэтому надо полагать, вращение газа в выхлопной трубе не будет отвечать закону твердого тела.

Выводы

1. Установлено, что время нахождения пылинки в циклоне не зависит от размера циклона, а зависит от конструкции циклона и скорости газового потока.

2. Показано, что по центру выхлопной трубы имеется, так называемая «мертвая зона», в которой пылинки определенного размера не успевают сконцентрироваться у стенки выхлопной трубы и выносятся из циклона, причем чем мельче частицы, тем больше радиус этой зоны.

3. Получена зависимость, определяющая диаметр вставки в зависимости от количества газа, направляемого на вторую степень очистки.

4. Установлена принципиальная возможность усовершенствования циклона, позволяющая в несколько раз уменьшить объемы газа, направляемого на вторую степень очистки, и тем самым дает возможность получить большой экономический эффект.

Список литературы

1. Пылеулавливание в металлургии: справочник/ [под ред. А.А. Гурвица]. – М.: Металлургия, 1984. – 336 с.
2. Луговский С.И. Совершенствование систем промышленной вентиляции / С.И. Луговский, Г.К. Дымчук. – М.: Стройиздат, 1991. – 136 с.
3. Справочник по пыле- и золоулавливанию / [под ред. А.А. Русанова]. – М.: Энергия, 1975. – 296 с.
4. Алиев Г.М. Устройство и обслуживание газоочистных и пылеулавливающих установок / Г.М. Алиев. – М.: Металлургия, 1988. – 368с.
5. Гордон Г.М. Пылеулавливание и очистка газов / Г.М. Гордон, И.Л. Пейсахов. – М.: Стройиздат, 1968. – 499 с.
6. Пирумов А.И. Обеспыливание воздуха / А.И. Пирумов. – М.: Стройиздат, 1981. – 296 с.
7. Пат. на корисну модель 29593 (UA). Циклон / С.М. Орлов, В.О. Ольховиченко, А.Я. Орлова МПК (2006).
8. Первов А.А. К вопросу о потерях давления в циклонах / А.А. Первов. // Промышленная очистка газов и аэродинамика пылеулавливающих аппаратов. – Ярославль, 1975. – С. 15–19.

Рецензент: д.т.н., проф. С.П. Висоцький, АДІ ДВНЗ «ДонНТУ».

Стаття надійшла до редакції 10.05.11
© Орлов С.М., Дмитроченкова Е.І., 2011