

В.В. Кузьмин, аспирант; В.А. Марков, профессор

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЦИКЛОННО-РОТОРНОГО ПЫЛЕУЛОВИТЕЛЯ

In article the comparative analysis of various designs gas purifying cyclones with rotor is given. The new design similar apparatus is offered. Such as and the results of its experimental researches are given.

Пылеуловители циклонного типа являются наиболее распространенными аппаратами для механической очистки газовых потоков [1, 2] вследствие простоты конструкции, высокой производительности, более высокой степени очистки по сравнению с известными аппаратами, в которых отделение пыли осуществляется под действием сил тяжести или инерционных сил. Однако в большинстве случаев эффективность очистки газового потока от пылевых частиц этими аппаратами недостаточна, что приводит к необходимости установки дополнительной (2-й) ступени очистки. Недостатком циклонов является также резко выраженное снижение эффективности при уменьшении газовой нагрузки (рекомендуемое отклонение от номинальной производительности обычно не должно превышать 15%) [1], что затрудняет их использование для сепарации частиц из переменных по расходу газовых потоков (например, при использовании аппаратов кипящего слоя с импульсной подачей газа, систем поршневого пневмотранспорта, импульсных пневмоизмельчителей и т. д.) [3]. Перспективным способом устранения данных недостатков циклонного процесса является сочетание его с другим, не менее эффективным методом очистки. Среди центробежных пылеуловителей необходимым требованиям: высокому коэффициенту очистки, постоянству фактора разделения независимо от производительности, компактности в достаточной мере удовлетворяют ротационные пылеуловители (РП). В связи с этим были предложены различные схемы пылеуловителей, объединяющие в себе конструкции циклона и РП одновременно (циклонно-роторные пылеуловители – ЦРП) [3].

Из трех основных типов РП (прямоточные, противоточные, осевые) [4, 5] в ЦРП распространение получили осевые (газовый поток движется вдоль оси вращающегося ротора и закручивается, а взвешенные частицы под действием развивающихся центробежных сил сепарируются к его периферии) и противоточные (очищаемый газовый поток движется по каналам ротора к его центру, противоположно направлению движения сепарируемых центробежными силами частиц). При этом ротор может приводиться во вращение как отдельным приводом [3, 6–9], так и энергией входящего в циклон потока воздуха [10–14].

При использовании в циклоне РП противоточного типа обычно устанавливаются в верхней части корпуса вместо выхлопной трубы, а очищенный в циклонной ступени газовый поток, дополнительно очищаясь, проходит через боковые отверстия ротора в его центральную часть и далее в выхлопной патрубке циклона. Ротор обычно имеет цилиндрическую форму и может быть выполнен как перфорированным [3, 15], так и в виде набора плоских [3] либо конических [6] колец, расположенных с небольшим зазором (для эффективной сепарации каналы ротора по возможности должны быть узкими и длинными). К этому же типу аппаратов можно отнести и циклоны с ротором, выполненным в виде фильтрующего элемента [11, 12].

Противоточные РП эффективно работают в области малых газовых нагрузок на фильтрующую поверхность ротора (до 0,1–0,2 м/с) [3] как правило при ламинарном режиме движения в каналах, поэтому кривая эффективности этих аппаратов с ростом расхода монотонно падает, вследствие чего ЦРП на их основе, существенно превышая по эффективности циклон в области невысокой производительности, приближаются к нему при достижении расходов, близких к номинальным для циклона. Гидравлическое сопротивление при малых расходах также значительно превышает сопротивление циклона [3]. Существенными недостатками противоточных ротационных пылеуловителей, воспрепятствовавшими их широкому распространению, являются большой удельный расход энергии (сопротивление одной сепарационной ступени дискового ротора может достигать 4000 Па и выше [16]) и относительная сложность конструкции [4, 5]. Кроме того, существует опасность забивания узких каналов ротора сепарируемой пылью.

Осевые РП при установке в циклоне, в отличие от противоточных, в меньшей степени оказывают влияние на гидравлическое сопротивление и способны даже несколько снижать его [17]. Роторы, выполняющие функцию осевых РП, могут располагаться в разных местах внутри циклонного аппарата: над бункером [7], на наружной поверхности вращающейся [9] либо неподвижной выхлопной трубы [16], а также на входе в нее [8, 17] и, соответственно, по разному влияют на процессы, происходящие в циклоне. Например, установка ротора над бункером [7] способствует уменьшению выноса из него пыли, захватываемой возвратным вихревым потоком, однако не воздействует на сепарационные процессы, происходящие в основном объеме циклонного аппарата и оказывающие основное влияние на степень улавливания мелкодисперсных частиц [4, 23]. Степень очистки для частиц размером 20 мкм повышается до 100%, а для частиц диаметром 3 мкм составляет 28% [11]. Лопастный ротор, расположенный снаружи выхлопной трубы [12, 16], препятствует вторичной циркуляции газового потока вдоль ее поверхности, но не оказывает влияния на сепарацию частиц в конической части циклона и бункере.

При размещении на входе в выхлопную трубу [8] (в наиболее неблагоприятной с точки зрения эффективности зоне [18]) ротор может как содействовать сепарации частиц из восходящего, формирующегося в бункере вихря, так и препятствовать проскоку в выхлопную трубу частиц, увлекаемых циркулирующим потоком. Максимальное увеличение эффективности (на 9–12% при экспериментах на кварцевой, цементной и мучной пыли) при некотором одновременном снижении общего гидравлического сопротивления циклона позволяет получить ротор в виде трехъярусной крыльчатки с перекрытием межлопастного пространства в ярусах [17].

Нами предложена новая конструкция ЦРП без выхлопной трубы с лопастным ротором, снабженным приводом и расположенным в верхней части корпуса (рис. 1). Опытная модель сепаратора была выполнена на базе стандартного циклона ЦН-15 из оргстекла с диаметром цилиндрической части корпуса 240 мм. Шестилопастный ротор 1 располагался в верхней части корпуса циклона 2 выше уровня входного патрубка 3 и коаксиально выходному отверстию 4, диаметр которого соответствовал диаметру выхлопной трубы аналогичного по размеру стандартного циклона ЦН-15 (0,59D) – 140 мм. Ротор 1 располагался непосредственно на валу электродвигателя, частота вращения которого изменялась с помощью частотного преобразователя.

Процесс сепарации в предлагаемом циклонно-ротационном пылеуловителе можно представить следующим образом. Поступающий через входной патрубок газ закручивается в цилиндрической части корпуса и организует наружный нисходящий вихревой

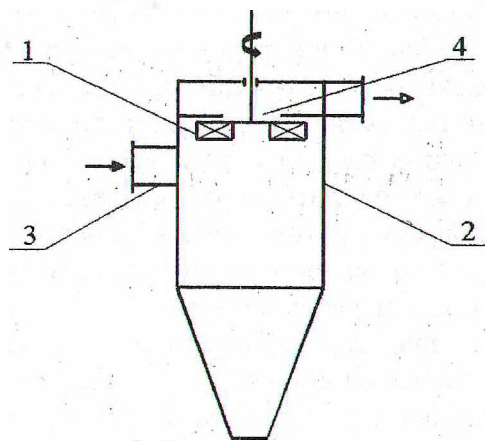


Рис. 1. Циклонно-роторный пылеуловитель

поток, в котором происходит первичная сепарация частиц по схеме циклонного процесса. Движению газа сразу в верхнюю часть аппарата, к его выходному отверстию, препятствует ротор, организующий свое направленное вниз движение газового потока. Одновременно в бункере формируется внутренний вихрь, направляющийся вверх к выходному отверстию аппарата и содержащий определенное количество неотсепарированных частиц, как захваченных им из бункера, так и попавших в него вследствие перетоков газа из наружного вихря. Благодаря значительным центробежным силам, развиваемым во внутреннем вихре [18], эти частицы выносятся на его периферию и попадают в организованный ротором и направленный вниз закрученный поток, т. е. реализуется

дополнительный сепарационный процесс, подобный происходящему в вихревых пылеуловителях.

Изучение эффективности ЦРП проводилось на тонкоразмолом кварцевом песке со средним размером частиц, равным ≈ 14 мкм. Эффективность очистки определялась по отношению массы пыли, вынесенной из аппарата, к массе пыли, поступившей в него с газовым потоком. В процессе опытов изменялась частота вращения ротора и расход газового потока через сепаратор.

В наиболее широком диапазоне производительности (фиктивная скорость на сечение аппарата ω варьировалась от 2 до 5,5 м/с) пылеуловитель исследовался при частоте вращения ротора 50 об/с. Некоторые результаты исследований представлены на рис. 2, где для сравнения приведены значения эффективности для данного размера частиц и диаметра цилиндрической части корпуса циклонов ЦН-11 и ЦН-15 [19].

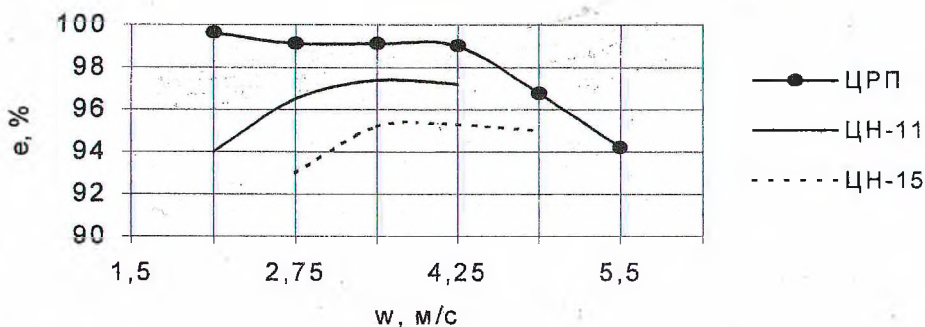


Рис. 2. Зависимость коэффициента очистки от средней скорости на сечение ω

На рис. 2 показано, что по эффективности очистки пылеуловитель превосходит как свой прототип ЦН-15, так и более эффективный циклон ЦН-11 во всем диапазоне их рабочих расходов ($\omega = 2,5 \div 4,25$ м/с). Эффективность очистки в аппарате в указанном диапазоне изменялась незначительно, имея некоторую тенденцию к возрастанию при уменьшении производительности. Данный факт можно связать как с увеличением

эффективности сепарации ротором, так и с создаваемым им подкручивающим эффектом, компенсирующим падение тангенциальных скоростей в корпусе циклона вследствие уменьшения расхода. Резкое снижение эффективности сепарации при превышении определенной производительности происходило вследствие нарушения циклонного процесса, когда газовый поток, пройдя через входной патрубок, направлялся сразу к выходному отверстию, преодолевая аэродинамическое сопротивление, создаваемое ротором. При этом в верхней части циклона, на периферии ротора, наблюдалось образование устойчивого вращающегося кольца пыли, чего не происходило при меньших расходах и, соответственно, более эффективной работе пылеуловителя.

Измерение гидравлического сопротивления сепаратора производилось по статическому давлению на стенке входного патрубка с добавлением скоростного давления в его сечении и вычетом скоростного давления на выходе из аппарата [20]. На рис. 3 представлены зависимости коэффициентов гидравлического сопротивления ξ от частоты вращения ротора и производительности аппарата (средней скорости ω). В отличие от циклонов, для которых характерно повышение ξ при увеличении производительности [20], коэффициент гидравлического сопротивления исследуемого аппарата снижался с увеличением расхода. Этот эффект связан, по-видимому, с определенным перепадом давления, создаваемым ротором и направленным против движения газового потока. При повышении производительности аппарата и, соответственно, возрастании затрат на создание сепарационного процесса доля этого давления в общем гидравлическом сопротивлении аппарата уменьшается, вследствие чего уменьшается и ξ . Величина перепада давления, создаваемого ротором, определяется прежде всего его окружной скоростью, поэтому коэффициент гидравлического сопротивления пылеуловителя с понижением частоты вращения ротора также уменьшается (рис. 3).

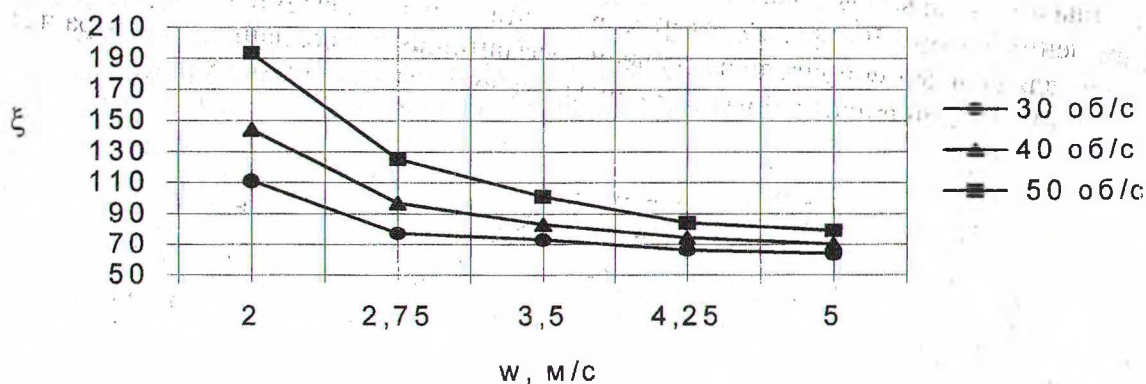


Рис. 3. Зависимость коэффициента гидравлического сопротивления ξ от числа оборотов ротора и средней скорости в аппарате ω

Более высокое значение ξ соответствующего по размеру циклона ЦН-15 ($\xi = 137$) [1, 4] по сравнению с исследуемым ЦРП при расходе, соответствующем $\omega = 3,5$ м/с (номинальном для ЦН-15), можно объяснить в том числе отсутствием у последнего выхлопной трубы, потери в которой составляют значительную часть общего гидравлического сопротивления циклона (25–30%) [21].

ЛИТЕРАТУРА

1. Справочник по пыле- и золоулавливанию / Под ред. А.А. Русанова. – М.: Энергия, 1975.
2. Красовицкий Ю.В., Малинов А.В., Дуров В.В. Обеспыливание промышленных газов в фаянсовом производстве. – М.: Химия, 1994.
3. Шилиев М.И. Гидродинамическая теория ротационных сепараторов. – Томск: Томск. ун-т, 1983.
4. Реутович Л.Н., Кауфман А.С. Разделение газовых гетерогенных систем в центробежном поле // Обзор. инф. Сер. «Фосфор и его соединения». – М., НИИТЭХИМ, 1975.
5. Степанов Г.Ю. Инерционные воздухоочистители. – М.: Машиностроение, 1986.
6. Пат. Франции № 2476505. Обеспыливатель для газа типа динамического циклона, 1980.
7. А. с. СССР № 939038. Пылеуловитель для очистки газа. Б. И. № 24, 1982.
8. А. с. СССР № 718133. Циклонный пылеуловитель. Б. И. № 8, 1980.
9. А. с. СССР № 1457968. Устройство для очистки газов от пыли. Б. И. № 6, 1989.
10. Пат. США № 5059225. Циклон для очистки газа, 1991.
11. А. с. СССР № 1835313. Циклон. Б. И. № 31, 1993.
12. А. с. СССР № 1565496. Устройство для очистки газа. Б. И. № 19, 1990.
13. Пат. РФ № 2087206. Циклон. Б. И. № 17, 1997.
14. Пат. РФ № 2150988. Циклон-фильтр для очистки запыленных газов. Б. И. № 17, 2000.
15. А. с. СССР № 1560270. Центробежный сепаратор. Б. И. № 16, 1990.
16. Демиденко А.А., Шваб В.А., Шилиев М.И. Экспериментальное исследование центробежного пылеотделителя с пластинчатым ротором / Вопросы импульсного пневмотранспорта, газоочистки и пневматического перемешивания дисперсных материалов: Сборник. – Томск: ТГУ, 1972. – С. 155–175.
17. Стоянов Н.И. Циклон с вращающимися дополнительными устройствами // Современные способы очистки промышленных вентиляционных выбросов: Материалы научно-технического семинара. – Новополоцк, 1990. – С. 21.
18. Разумов И.М., Сычева А.М. Циклонные сепараторы, конструкции и методы их расчета. – М., 1961.
19. Пирумов А.И. Обеспыливание воздуха. – М.: Стройиздат, 1981.
20. Идельчик И.Е. Гидравлическое сопротивление циклонов, его определение, величина и пути снижения. – В сб.: Механическая очистка промышленных газов / НИИ-ОГАЗ. – М.: Машиностроение, 1974. – С. 135–160.
21. Первов А.А. К вопросу о потерях давления в циклоне. – В сб.: Промышленная очистка газов и аэродинамика пылеулавливающих аппаратов / НИИОГАЗ. – Ярославль, 1975. – С. 15–19.