



ПУТИ СНИЖЕНИЯ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ ЦИКЛОНОВ

Д.И. Мисюля, В.В. Кузьмин, В.А. Марков

Белорусский государственный технологический университет
Республика Беларусь, 220050 Минск, ул. Свердлова, д. 13а
Тел./факс: +375 17 2276217, e-mail: milusia-777@mail.ru

Заключение совета рецензентов: 27.04.11 Заключение совета экспертов: 28.04.11 Принято к публикации: 30.04.11

Представлен аналитический обзор существующих способов снижения гидравлического сопротивления циклонов, приведена их условная классификация. Для уменьшения энергопотребления циклонов наиболее перспективным является применение раскручивающих устройств, устанавливаемых внутри выхлопной трубы, которые, не ухудшая эффективность очистки, позволяют значительно снизить сопротивление. Установка раскручивателя на входе в выхлопную трубу дает больший эффект в снижении потерь давления, однако это способствует увеличению выноса частиц из циклона.

Ключевые слова: энергосбережение, пылеулавливание, циклоны, гидравлическое сопротивление, эффективность очистки, раскручивающее устройство.

WAYS OF DECREASE IN POWER CONSUMPTION OF CYCLONE SEPARATORS

D.I. Misiulia, V.V. Kuzmin, V.A. Markov

Belarus state technological university
13a Sverdlova str., Minsk, 220050, Republic of Belarus
Tel./fax: +375 17 2276217, e-mail: milusia-777@mail.ru

Referred: 27.04.11 Expertise: 28.04.11 Accepted: 30.04.11

The paper presents the short literary review of existing ways of decrease energy consumption of cyclones is resulted, and also conditional classification of these ways. The most perspective for reduction pressure drop across cyclones is application of the untwisting devices established in an exhaust pipe, which without worsening efficiency of clearing allow to lower pressure drop considerably. Installation of the deswirler on an input in an exhaust pipe gives greater effect in decrease in pressure drop, however it promotes increase in a removal of corpuscles from the cyclone.

Keywords: energy saving, dust separation, cyclone separators, pressure drop, purification efficiency, untwisting device.



*Дмитрий Иванович
Мисюля*

Сведения об авторе: аспирант 3-го года обучения кафедры «Процессы и аппараты химических производств» («ПиХП») Белорусского государственного технологического университета (БГТУ). Магистр технических наук.

Основной круг научных интересов: пылеулавливание, энергосбережение в системах газоочистки, совершенствование конструкций циклонных аппаратов.

Публикации: 12 статей и 3 патента.



*Владислав
Владимирович
Кузьмин*

Сведения об авторе: канд. техн. наук, доцент кафедры «ПиХП» БГТУ.

Основной круг научных интересов: пылеулавливание, энергосбережение в системах газоочистки, совершенствование конструкций циклонных аппаратов.

Публикации: 17 статей и 11 патентов.



Владимир Алексеевич
Марков

Сведения об авторе: д-р техн. наук, профессор кафедры «ПиАХП» БГТУ.
Основной круг научных интересов: разработка и исследование новых способов интенсификации тепломассообменных процессов и ресурсо-энергосберегающих технологий.
Публикации: 5 учебных пособий, более 70 статей и 46 патентов.

Энергопотребление циклонных аппаратов определяется их гидравлическим сопротивлением, которое связано главным образом с вращательным движением газа и потерей кинетической энергии выходящего вихревого потока [1]. Однако коэффициент сопротивления циклона также зависит от его геометрических параметров, состояния внутренней поверхности стенок, скорости, вязкости и запыленности газа [2]. В связи с этим существующие способы снижения сопротивления условно можно разделить на следующие группы:

- 1) применение специальных раскручивающих устройств;
- 2) модификация выхлопной трубы;
- 3) другие способы снижения гидравлических потерь в циклонах.

Снижение потерь энергии в циклонах с помощью специальных раскручивающих устройств. Для снижения энергетических затрат на очистку газа в циклонах применяются специальные раскручивающие устройства (регенераторы давления), позволяющие перераспределить составляющие скорости на выходе и уменьшить поперечную циркуляцию в выхлопной трубе.

Первое раскручивающее устройство было запатентовано в Германии в 1897 г. [3]. Оно имело вид крестовины и устанавливалось ниже выхлопной трубы. Наблюдения в заводских условиях показали, что подобные устройства оказывают малое влияние на вращающийся поток, а следовательно, и на уменьшение потерь давления, что объясняется недостаточной высотой крестовины.

В зависимости от конструктивных особенностей и принципа работы раскручиватели устанавливают: в нижней части циклона, на входе или внутри выхлопной трубы, на выходе из циклона.

Раскручивающие устройства, устанавливаемые в нижней части циклона. Для уменьшения энергии вращательного движения восходящего в циклоне вихревого потока учеными предложено установить в нижней части аппарата раскручиватель в виде конуса с прикрепленными на нем лопастями (рис. 1, а), изогнутыми в виде параболы для плавного набегания газа [4].

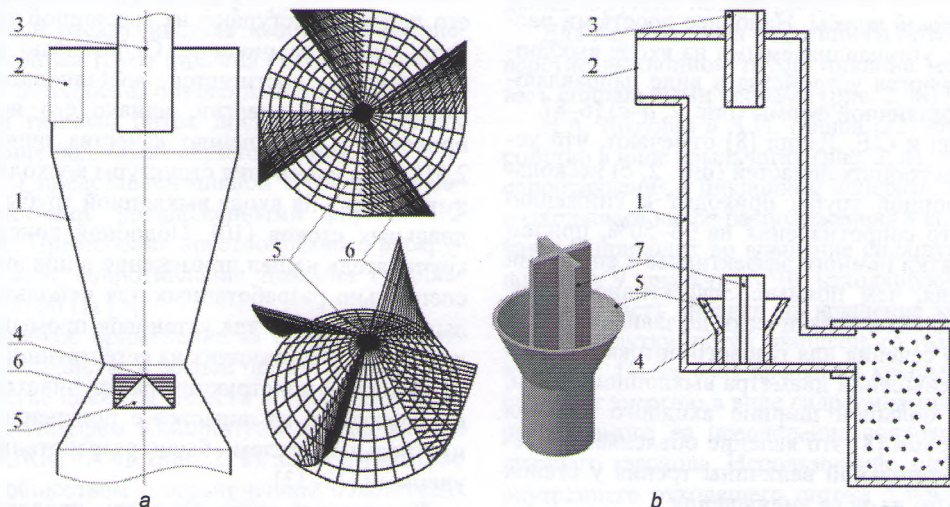


Рис. 1. Раскручиватели, устанавливаемые в нижней части циклона: а – в виде конуса с лопастями [4]; б – в виде конуса с крестовиной [5]; 1 – корпус; 2 – входной патрубок; 3 – выхлопная труба; 4 – раскручиватель; 5 – конус; 6 – направляющие лопасти; 7 – крестовина

Fig. 1. Deswirlers, installed in the bottom part of the cyclone separator: а – in the form of a cone with blades [4]; б – in the form of a cone with a cross [5]; 1 – case; 2 – upstream end; 3 – exhaust tube; 4 – deswirlers; 5 – cone; 6 – directing blades; 7 – cross

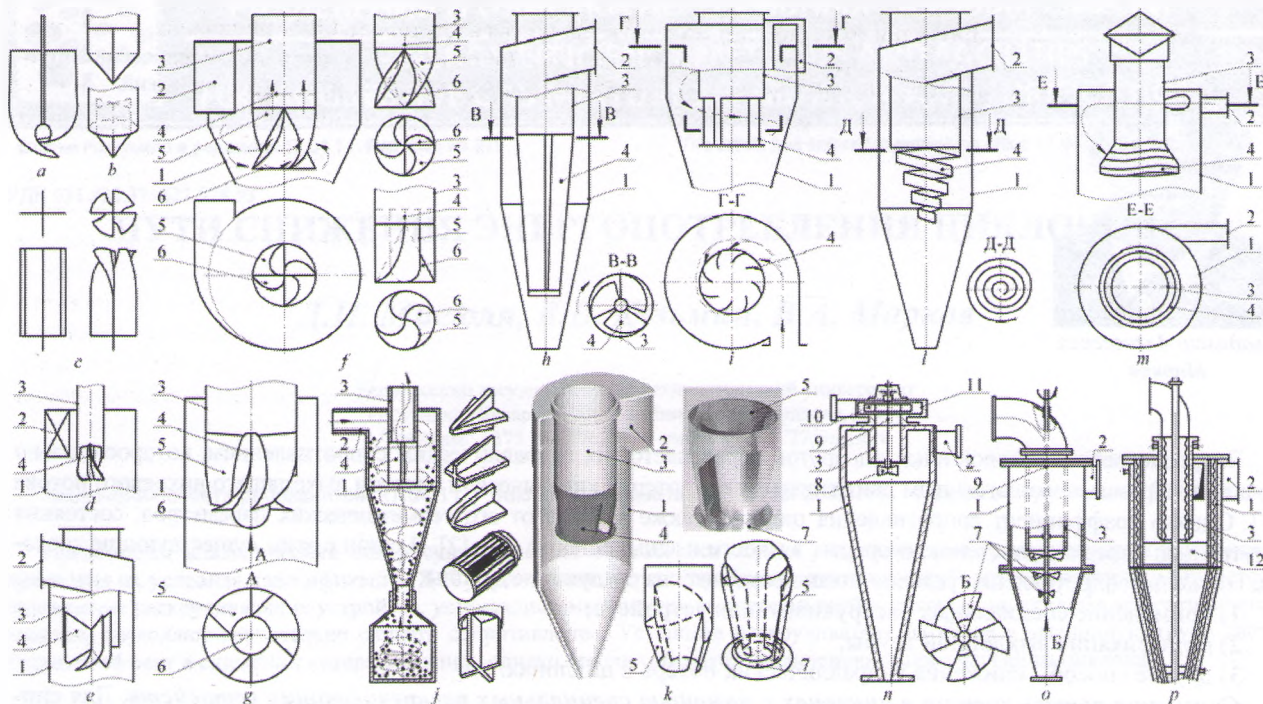


Рис. 2. Раскручиватели, устанавливаемые на входе выхлопной трубы: а – двухлопастной [6]; б–d – четырехлопастные [7, 8, 9]; е – радиально-лопастной [10]; f – авторов [12]; g – авторов [13]; h – конический [14]; i – в виде профилированных лопаток [16]; j – фирмы LG Electronics Inc [5]; k – HURRIVANE [17]; l – спиральный пылеотбойник [20]; m – спиральные ребра [21]; n – в виде крыльчатки [22]; o – в виде крыльчаток [24]; p – зачищенное устройство [25]; 1 – корпус; 2 – входной патрубок; 3 – выхлопная труба; 4 – раскручиватель; 5 – лопасти; 6 – центральное тело; 7 – запорная пластина; 8, 10 – крыльчатки; 9 – вал; 11 – улитка; 12 – зачищенное устройство

Fig. 2. Deswirlers, installed on an exhaust tube entry: a – double-blade [6]; b–d – four-blade [7, 8, 9]; e – radial-blade [10]; f – authors [12]; g – authors [13]; h – conic [14]; i – in the form of profiled shovels [16]; j – firms LG Electronics Inc [5]; k – HURRIVANE [17]; l – spiral dust fender [20]; m – spiral ribs [21]; n – in the form of vane [22]; o – in the form of vanes [24]; p – cleanup device [25]; 1 – case; 2 – upstream end; 3 – exhaust tube; 4 – deswirlers; 5 – blades; 6 – central body; 7 – laking plate; 8, 10 – vanes; 9 – shaft; 11 – scroll; 12 – stripping device

К раскручивателям, устанавливаемым в нижней части циклона, также относится устройство, состоящее из крестовины и конуса (рис. 1, b) [5].

Раскручивающие устройства, устанавливаемые на входе выхлопной трубы. Наиболее простыми раскручивателями, устанавливаемыми на входе выхлопной трубы, являются устройства в виде направляющих лопастей различной формы (рис. 2, a–c) [6–8].

С.Б. Шеферд и С.Е. Лэплл [8] отмечают, что установка выпрямляющих лопастей (рис. 2, c) несколько ниже выхлопной трубы приводит к снижению гидравлического сопротивления на 35–50%, причем изогнутые лопатки немного эффективнее в снижении потерь давления, чем прямые. Эффективность выпрямляющих лопаток практически не зависит от ширины входного сечения для газового потока, но снижается при уменьшении диаметра выхлопной трубы, особенно при большой ширине входного сечения циклона. Авторами [8] это явление объясняется увеличением относительной величины трения у стенок выхлопной трубы из-за ее уменьшения.

А.С. Хоффман и др. [9], установив на входе выхлопной трубы четырехлопастной раскручиватель с изогнутыми лопастями (рис. 2, d), снизили потери давления в циклоне на 30%, однако эффективность очистки при этом ухудшилась.

Радиально-лопастной раскручиватель (рис. 2, e) состоит из трех радиальных лопастей с углом входа 30° к горизонту и плавным переходом в вертикальное положение. Устройство устанавливается так, что его лопасти выступают из выхлопной трубы на четверть диаметра циклона. С помощью данного раскручивателя достигается восстановление 30–40% затрачиваемой энергии, однако его использование приводит к ухудшению качества очистки на 1,5–2,5% из-за изменения структуры восходящего потока и появления на входе выхлопной трубы сильных радиальных стоков [10]. Подобной конструкции раскручиватель нашел применение в циклонах ЦМС-27, специально разработанных для использования в малых котельных и для установок промышленной теплотехники, работающих на естественной тяге [11].

Похожей конструкции раскручиватели (рис. 2, f, g), состоящие из лопастей с прикрепленным к ним центральным телом, были разработаны и другими учеными [12, 13].

Конический раскручиватель, предложенный А.Д. Мальгиным [14], имеет вид усеченного конуса и является продолжением выхлопной трубы на протяжении всей сужающейся части циклона (рис. 2, h). Он состоит из лопастей, каждая из которых представля-

ет в поперечном сечении логарифмическую спираль. Наличие лопастей позволяет разделить газовый поток, изменить его направление и снизить тангенциальные скорости. Благодаря большой длине лопастей этот процесс осуществляется плавно на всем протяжении конуса. Исследования, проведенные в СФ НИИОГАЗ, показали [10], что влияние данного раскручивателя на циклонный процесс зависит от конструкции аппарата. В циклонах серии «ЦН» по мере снижения их сепарационных качеств положительное влияние конического раскручивателя на технико-экономические показатели циклона растет. Например, применение его в циклонах ЦН-24 снижает потери давления на 16–18% и увеличивает степень очистки с 74 до 77% [10]. Оборудование циклона ЦН-15 данным раскручивающим устройством уменьшает гидравлическое сопротивление на 19–20% и сохраняет качество очистки. Однако в циклоне ЦН-11, наряду с уменьшением сопротивления, он приводит к снижению эффективности очистки на 1–2% [10]. Причина состоит в том, что удлинение выхлопной трубы в виде конуса с продольными щелями обеспечивает равномерный расход газа по длине циклона, выравнивает радиальные токи, но несколько снижает тангенциальную скорость.

Конический раскручиватель стабилизирует поток, видоизменяя характер распределения окружной скорости и радиального стока, поэтому наиболее приемлем для высокопроизводительных циклонов типа ЦН-24 и ЦН-15. Аэродинамическая особенность циклонного процесса, вызванная действием конического раскручивателя, характеризуется уменьшением отрицательного давления в пылесборном бункере, что является положительным качеством с точки зрения эксплуатации пылевыгрузных устройств. Применение данного устройства в батарейных циклонах снижает гидравлическое сопротивление на 15–18% без ухудшения качества очистки [15].

Аналогичный раскручиватель изображен на рис. 2, *i* [16]. Выхлопная труба циклона снабжена профилированными лопатками, опущенными в корпус циклона. Чтобы газовый поток поступал на лопатки сбоку, основание под ними закрыто листом.

На рис. 2, *j* представлен циклон с раскручивающими устройствами, предложенными фирмой LG Electronics Inc. Применение крестообразного раскручивателя снижает сопротивление циклона с 4000–4500 до 2800–3100 Па [5].

Весьма широкое применение за пределами постсоветского пространства в лесной промышленности и при производстве цемента, извести и гипса получило предложенное Йозефом Койшнинггом направляющее устройство HURRIVANE (рис. 2, *k*), запатентованное австрийским обществом с ограниченной ответственностью «А ТЕС» [17]. Устройство HURRIVANE состоит из симметрично расположенных лопастей (обычно двух) 5, имеющих форму боковой поверхности усеченного конуса, и присоединяется к нижнему краю выхлопной трубы, являясь ее продолжением. К

лопастям 5 снизу может быть прикреплена запорная пластина 7 с изогнутым в сторону от выхлопной трубы краем, предотвращающая перемещение в выхлопную трубу из камеры циклона зоны пониженного давления. Благодаря направляющим лопастям 5 газовый поток получает как радиальное, так и аксиальное ускорение. В результате газ входит в выхлопную трубу с меньшими потерями. При движении газового потока в устройстве HURRIVANE происходит преобразование энергии вращательного движения в статическое давление, что также снижает общие потери давления. Данное направляющее устройство позволяет снизить гидравлическое сопротивление циклона на 30% при сохранении степени очистки [18].

К раскручивателям, устанавливаемым на входе в выхлопную трубу, также относятся устройства, имеющие спиральную форму. А. Дж. Тер-Линден уменьшил потерю давления на 20–25% путем помещения спирали на входе в выхлопную трубу [19].

В СФ НИИОГАЗ проведены также испытания циклона ЦН-15 диаметром 300 мм, оборудованного раскручивающим устройством – спиральным пылеотбойником (рис. 2, *l*), выполненным из металлической ленты в виде параболоидной пружины, свернутой по спирали Архимеда, уравнение которой $r = 26\phi/(2\pi)$. Широким основанием спираль крепится к выхлопной трубе, а своей вершиной опускается в корпус циклона на полтора диаметра выхлопной трубы. Применение данного раскручивающего устройства снизило гидравлическое сопротивление циклона с 500 до 460 Па, т.е. на 8%, одновременно при этом уменьшилась эффективность с 87 до 86%. Унос пыли увеличился на 8%. Это свидетельствует о том, что уменьшение сопротивления циклона при установке раскручивателя на входе в выхлопную трубу достигается не только за счет перераспределения скорости в выходном канале, но и вследствие общего падения «крутки» потока [20].

Для выпрямления воздушного потока входное отверстие выхлопной трубы циклона можно оборудовать спиральными ребрами (рис. 2, *m*) [21].

Н.А. Козулин и А.И. Ершов [22] предложили устройство в виде крыльчатки (рис. 2, *n*) для преодоления сопротивления в циклонном аппарате. Под действием восходящего вихря расположенная в корпусе 1 крыльчатка 8 приводит во вращение сидящую с ней на одном валу 9 крыльчатку 10, находящуюся в улитке 11. Передав часть энергии на вращение крыльчатки 7 и потеряв крутку, поток очищенного газа направляется в улитку 11. За счет вращения крыльчатки 10 поток получает энергию в виде гидродинамического напора, расходуемого на преодоление сопротивления последующего газотока. Использование энергии вращения внутреннего отходящего потока с помощью данного раскручивателя позволяет снизить мощность, расходуемую на преодоление сопротивления циклонов, в среднем на 18–20% [23].

Похожее решение с целью снижения сопротивления циклонных пылеуловителей за счет создания

вентиляторного эффекта в центральной их зоне позже было предложено Н.И. Стояновым и др. [24]. Циклонный пылеуловитель (рис. 2, о) содержит цилиндрический корпус 1, тангенциальный входной патрубок 2, осевую выхлопную трубу 3 с закрепленным на ее входе на валу 8 лопастным ротором, представляющим собой ряд крыльчаток 8, размещенным вертикально с уменьшающимися сверху вниз диаметром и лопастями, максимально перекрывающими межлопастные промежутки соседней крыльчатки. Крыльчатки 8 ротора, плавно ввинчиваясь в восходящий вихрь, раскручивают последний, в результате чего снижают энергию его крутки и сопротивление циклона в целом.

Поскольку в обычных циклонах энергия вращательного движения газа на выходе из аппарата безвозвратно теряется, авторами [25] предложена конструкция циклонного теплообменника (рис. 2, р), в котором эта энергия используется для зачистки стенок, являющихся теплопередающими поверхностями, от налипающих на них пылевых частиц. Зачистное устройство 12 состоит из вала, закрепленного в подшипни-

ках, и насаженных на него крыльчатки и специальной рамы. Крыльчатка, установленная на валу у нижнего среза выхлопной трубы, под действием восходящего вихревого потока приводится во вращательное движение и передает его валу и раме, стальной трос которой защищает поверхность стенок от липких осадков. Благодаря частичному спрямлению потока в выхлопной трубе потери напора на гидравлическое сопротивление в данном аппарате ниже на 10–15%, чем в обычном циклоне ЦН-15У [25].

Раскручивающие устройства, устанавливаемые внутри выхлопной трубы. Одним из путей уменьшения потерь давления в циклонных устройствах является установка в выхлопной трубе цилиндрических, конических или специально профилированных вставок (рис. 3, а–с) и дисков (рис. 3, d), перекрывающих зону осевого обратного тока [19, 26–28]. С увеличением диаметра вставки, проходящей через выходное отверстие, в определенном диапазоне его изменения коэффициент сопротивления уменьшается, достигая минимума при ликвидации в выхлопной трубе осевого обратного течения.

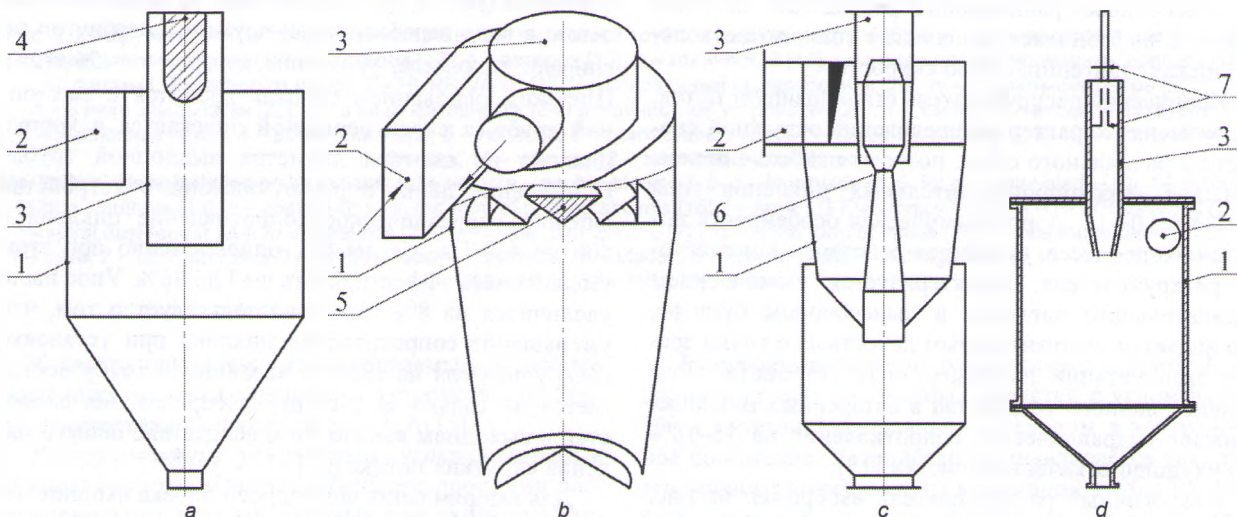


Рис. 3. Циклоны с различного рода вставками и диском: а – с цилиндрической вставкой [26]; б – с конической вставкой [27]; с – со вставкой в виде двойного конуса [19]; d – с диском [28]; 1 – корпус; 2 – входной патрубок; 3 – выхлопная труба; 4 – цилиндрическая вставка; 5 – коническая вставка; 6 – вставка в виде двойного конуса; 7 – диск

Fig. 3. Cyclone separators with any inserts and a disk: a – with a cylindrical insert [26]; b – with a conic insert [27]; c – with an insert in the form of a double cone [19]; d – with a disk [28]; 1 – case; 2 – upstream end; 3 – exhaust tube; 4 – cylindrical insert; 5 – conic insert; 6 – insert in the form of a double cone; 7 – disk

Оптимальное значение диаметра вставки и степень снижения сопротивления циклона определяются сочетанием геометрических параметров циклонного аппарата. А.И. Егоровым и Э.Н. Сабуровым [26] установлено, что применение вставки с относительным диаметром $d_v/D = 0,25$ приводит к уменьшению коэффициента сопротивления на 8%. В опытах Х.К. Хи, Х.С. Кристенсена и П.Ш. Ларсена перекрытием 40–45% площади выходного сечения достигнуто уменьшение сопротивления на 15–26% в зависимости от длины выходного канала (большие значения соответствуют короткому выхлопному патрубку).

Применение вставки в виде двойного конуса (рис. 3, с) позволяет снизить коэффициент сопротивления циклона с 17,4 до 16,4 [19].

Х.К. Ксу [29], вставив в центр циклона цилиндр, снизил гидравлическое сопротивление на 33% и 20% при работе на выхлоп и в сети соответственно, при этом эффективность очистки, по мнению автора, не изменится, так как тангенциальная скорость на половине радиуса выхлопной трубы сохраняется.

С.Б. Шеферд и С.Е. Лэппл, установив внутри выхлопной трубы выпрямляющие лопатки, уменьшили потери давления в циклоне на 7–10% [8].

Сочетая различного рода центральные вставки и направляющие лопасти, ученые разработали серию раскручивателей, представленных на рис. 4.

Фирмой Kastrup KG в 1970 году было запатентовано раскручивающее устройство (рис. 4, а), состоящее из закрытой с обоих концов вставки с прикрепленными к ней направляющими лопастями [30].

Аналогичной конструкции так называемый винто-лопастной раскручиватель (рис. 4, б) был исследован в СФ НИИОГАЗ А.А. Первовым [6, 10]. При-

менение данного раскручивателя с шестью направляющими лопастями приводит к снижению потерь давления в циклонах ЦН-11 и ЦН-15, соответственно, на 22–24% и 20% без ухудшения степени очистки. Также установлено, что абсолютные значения отрицательных давлений в пылесборнике – в центре и на боковой стенке – при наличии в выхлопной трубе раскручивающего устройства указанного типа снижаются на 10–15% [6, 10].

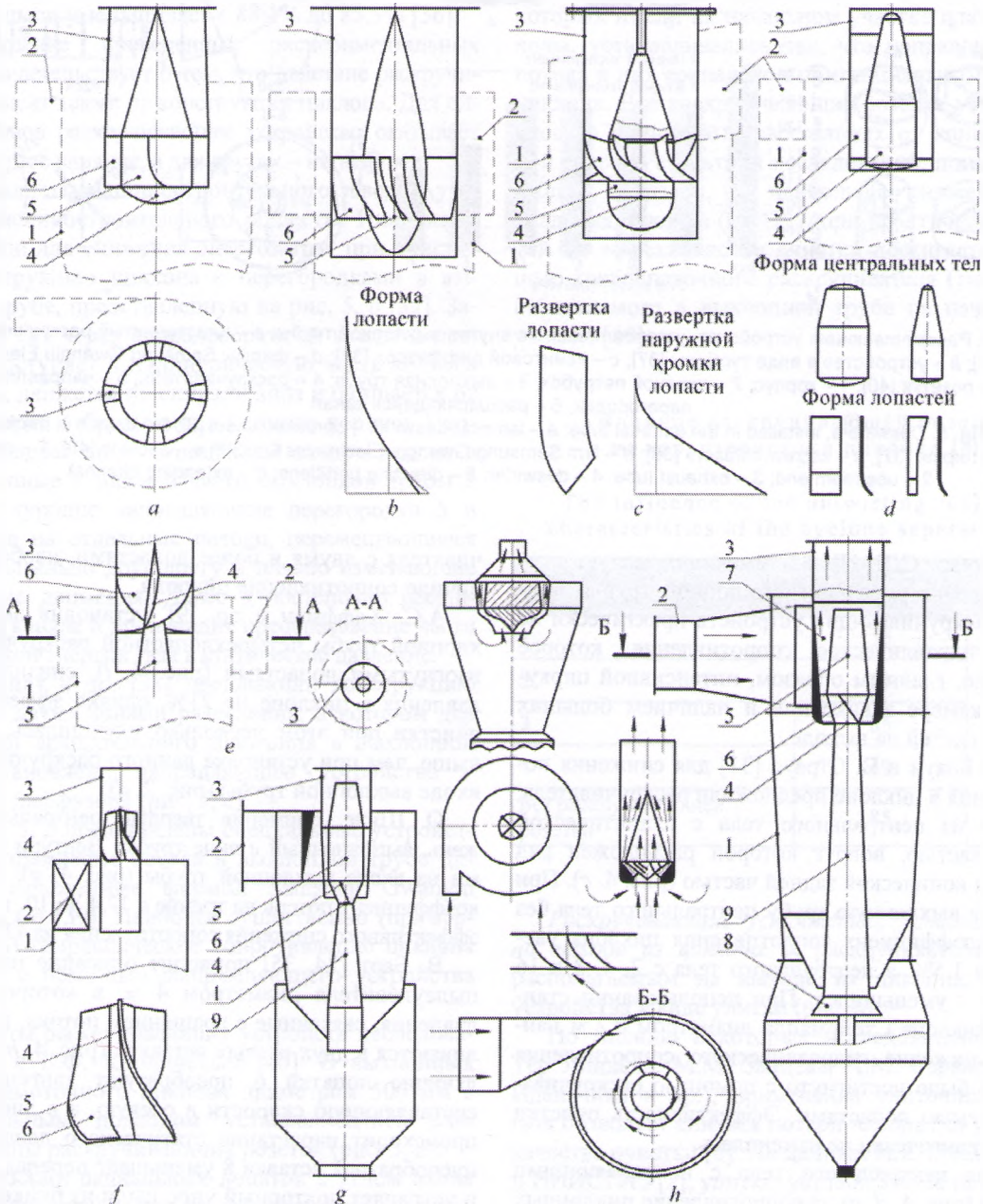


Рис. 4. Лопастные раскручиватели, устанавливаемые внутри выхлопной трубы: а – фирмы Kastrup KG [30]; б – винто-лопастной [6]; с – Дж. М. Брауна и В. Страуса [31]; д – авторов [32]; е – авторов [33]; ф – авторов [9]; г – О. Шиле [19]; h – В. Барта [34, 35]; 1 – корпус; 2 – входной патрубок; 3 – выхлопная труба; 4 – раскручиватель; 5 – центральное тело; 6 – лопасти; 7 – диффузор; 8 – конусообразная вставка; 9 – конус

Fig. 4. Blade deswirlers, installed in the exhaust tube: а – firm Kastrup KG [30]; б – spiral-vane [6]; с – J.M. Browne and W. Strauss [31]; д – authors [32]; е – authors [33]; ф – authors [9]; г – O. Shiele [19]; h – W. Barth [34, 35]; 1 – case; 2 – upstream end; 3 – exhaust tube; 4 – deswirlers; 5 – central body; 6 – blades; 7 – diffuser; 8 – cone-shaped insert; 9 – cone

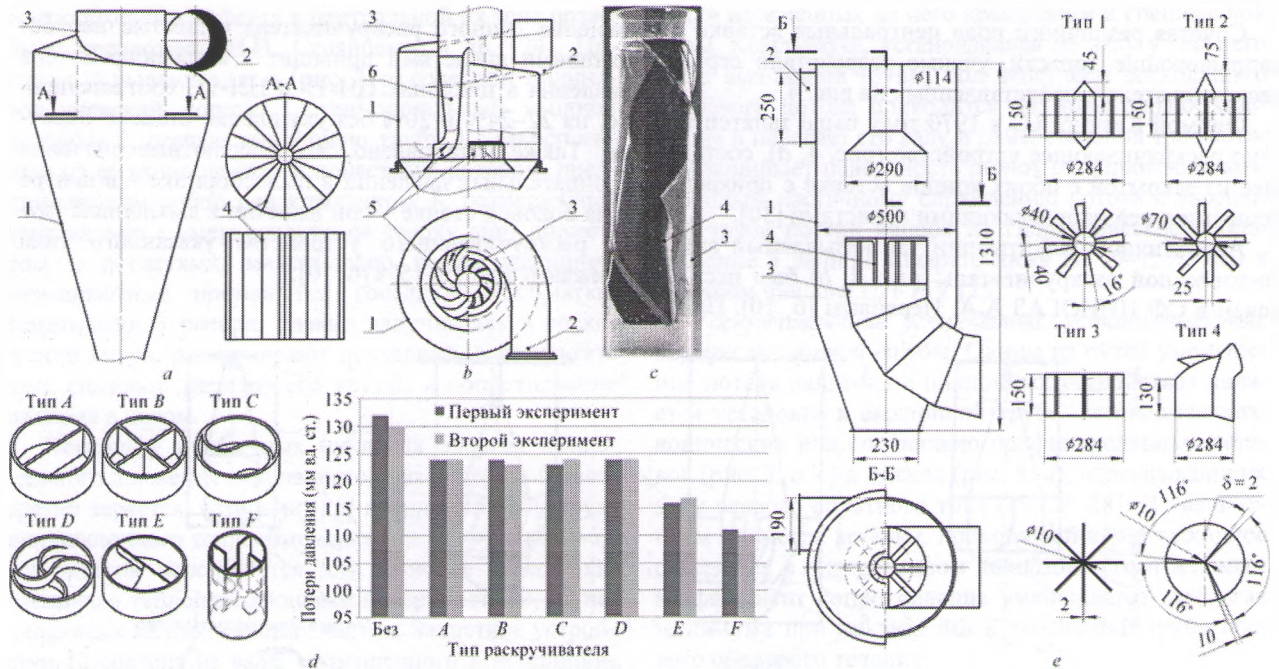


Рис. 5. Раскручивающие устройства, устанавливаемые внутри выхлопной трубы: а – пластинчатый раскручиватель – звездочка [6]; б – устройство в виде турбины [37]; в – «винтовой диффузор» [38]; д – фирмы Samsung Gwangju Electronics Co [39]; е – розетки [40]; 1 – корпус; 2 – входной патрубок; 3 – выхлопная труба; 4 – раскручиватель; 5 – направляющие перегородки; 6 – расширяющийся канал

Fig. 5. Deswirlers, installed in the exhaust tube: а – lamellar deswirlers – sprocket wheel [6]; б – device in the form of the turbine [37]; в – «screw diffuser» [38]; д – firm Samsung Gwangju Electronics Co [39]; е – sockets [40]; 1 – case; 2 – upstream end; 3 – exhaust tube; 4 – deswirlers; 5 – directing partitions; 6 – extending channel

В циклонах СДК-ЦН-33, имеющих малую площадь поперечного сечения выхлопной трубы, применение раскручивающих устройств практически не снижает гидравлическое сопротивление, которое обусловлено, главным образом, интенсивной циркуляцией в камере завихрения и наличием больших осевых скоростей на выходе.

Дж. М. Браун и В. Страус [31] для снижения потерь давления в циклоне предложили раскручиватель, состоящий из центрального тела с эллиптической передней частью, вокруг которой расположен ряд лопастей, и конической задней частью (рис. 4, в). При установке в выхлопную трубу центрального тела без лопастей коэффициент сопротивления циклона увеличился на 1,5%, а центрального тела с 2, 4, 8 и 16 лопастями – уменьшился. При использовании стандартного циклона Стейрманда диаметром 0,2 м наибольшее снижение гидравлического сопротивления (на 22,2%) было достигнуто с помощью раскручивателя с восемью лопастями. Эффективность очистки при этом практически не изменилась.

Влияние центрального тела с направляющими лопастями (рис. 4, д, е) на сопротивление циклонных аппаратов исследовано и другими учеными [32, 33]. Было установлено, что значительную роль играет число направляющих лопастей. Авторами [32] положительный результат в снижении потерь давления был достигнут только с помощью однолопастного раскручивающего устройства. Применение раскру-

чивателя с двумя и более лопастями, наоборот, увеличило сопротивление циклона.

А.С. Хоффман и др. [9], установив внутри выхлопной трубы четырехлопастной раскручиватель с изогнутыми лопастями (рис. 4, ж), снизили потери давления в циклоне на 21%, однако эффективность очистки при этом несколько ухудшилась, но была выше, чем при установке данного раскручивателя на входе выхлопной трубы (рис. 2, д).

О. Шиле, применив твердый центральный стержень, выполненный в виде трубки Вентури с лопатками на входе выхлопной трубы (рис. 4, г), уменьшил коэффициент потерь на трение с 17,4 до 10, т. е. достиг эффективного снижения сопротивления на 42% [19].

В. Барт [34, 35] приводит описание циклонного пылеуловителя диаметром 4 м, в котором потери давления, связанные с вращением потока, восстанавливаются в двух осевых вставках (рис. 4, з). Направляющие лопатки 6 преобразуют тангенциальную составляющую скорости в осевую, а в диффузоре 7 происходит нарастание статического давления. Конусообразная вставка 8 уменьшает перепад давления и устраняет повторный унос пыли из бункера. Конус 9, препятствуя образованию вторичных вихрей, уменьшает гидравлические потери. Гидравлическое сопротивление пылеуловителя составляет 300 Па при производительности 80000 м³/ч.

Пластинчатый раскручиватель типа «звездочка» (рис. 5, а) был установлен в циклоне диаметром 3 м

($D_{н}/D = 0,58$, $H_{ц}/D = 2,2$) для улавливания фрезерного торфа на Шатурской ГРЭС [6]. Раскручиватель состоял из 16 пластин высотой 2 м, что примерно соответствовало диаметру выхлопной трубы. По данным [6], коэффициент сопротивления при установке раскручивателя снизился с 3,9 до 1,63, а степень очистки воздуха несколько повысилась.

Применение подобного же устройства в циклонах ЛИОТ не дало положительных результатов. При незначительном снижении коэффициента сопротивления эффективность разделения при улавливании угольной пыли уменьшилась с 88,1% до 85,3% [36].

Расхождение приведенных экспериментальных данных свидетельствует о том, что действие раскручивателя зависит также от конструкции циклона. Для одних циклонов раскручивающее устройство оказывает благоприятное влияние, а для других – негативное.

Специалисты машиностроительного завода Аугсбурга и машиностроительного общества Нюрнберга разработали для снижения энергозатрат при очистке газа конструкцию циклона с перегородками в выхлопной трубе, представленную на рис. 5, б [37]. Запыленный газ через спиралеобразный входной патрубок 2 поступает в цилиндрическую часть корпуса 1 циклона, движется по спирали вниз и очищается от пыли, которая отбрасывается к стенке корпуса 1 аппарата и падает вниз. Очищенный воздух входит в расположенные в нижней части выхлопной трубы 3 подобные турбине направляющие перегородки 5 и разделяется на отдельные потоки, перемещающиеся вверх параллельно друг другу и плавно изменяющие направление движения. Далее в постепенно расширяющемся канале 6 происходит преобразование части кинетической энергии газа в статическое давление.

П. Шмидт и др. [38] предложили конструкцию циклона с двумя зонами разделения, в котором для ликвидации вращательного движения в выхлопной трубе установлено направляющее устройство – «винтовой диффузор» (рис. 5, с).

На рис. 5, d представлены специальные устройства для выпрямления потока в выхлопной трубе циклона, предложенные фирмой Samsung Gwangju Electronics Co [39]. Наиболее существенно (примерно на 16%) гидравлическое сопротивление циклона снижается с помощью выпрямляющего устройства типа F.

Варианты раскручивающих устройств исследованы также и Е.Ф. Кирпичевым [40]. В выхлопных трубах прямогоочного циклона диаметром 500 мм с тангенциальным подводом устанавливались следующие типы раскручивающих розеток (рис. 5, e):

1) из восьми радиальных лопаток с углом входа $\sim 30^\circ$ (к горизонту) и плавным переходом в вертикальное направление; плавные переходы лопаток (в плане) имеют форму секторов, расположенных с интервалами;

2) из восьми радиальных лопаток с углом входа $\sim 30^\circ$ (к горизонту) и плавным переходом в вертикальное направление; плавные переходы лопаток

(в плане) имеют форму секторов, расположенных без интервалов;

3) из восьми радиальных листов типа «звездочки» (в плане) без участка плавного перехода в вертикальное направление;

4) из трех радиальных лопаток с углом входа $\sim 30^\circ$ (к горизонту) и плавным переходом в вертикальное направление; плавные переходы лопаток (в плане) имеют форму секторов, расположенных почти без интервалов.

Раскручивающие розетки типов 1, 2 и 4, лопатки которых имели на начальном участке плавные переходы, устанавливались так, что направление входа потока в них совпадало с тангенциальным подводом циклона. Все раскручивающие розетки устанавливались на одинаковых расстояниях от конца выхлопной трубы. Результаты исследований, приведенные в табл. 1, показали, что наибольшее снижение сопротивления циклона (на 42%) при практически одной и той же эффективности очистки достигается с помощью трехлопаточного раскручивателя (тип 4), устанавливаемого в выхлопной трубе на начальном ее участке [40].

Таблица 1
Влияние раскручивающей розетки на характеристики циклона [40]

Table 1
The influence of the untwisting socket on characteristics of the cyclone separator [40]

Тип раскручивающей розетки	Коэффициент сопротивления	Степень очистки, %
1	55	~ 83
2	51	
3	85	
4	49	
Без раскручивающей розетки	85	

Раскручивающие устройства, устанавливаемые на выходе из циклона. К раскручивателям потока, располагаемым на выходе из циклона, относятся устройства в виде улитки (рис. 6).

По мнению некоторых исследователей (А. Дж. Тер Линдена, М.М. Зайцева, А.М. Гервасьева, И.Е. Идельчика и др.), применение улиточного выхода газа позволяет снизить потери напора без ухудшения качества очистки [6]. По данным И.Е. Идельчика [41] и НИИОГАЗ [2], улитка, установленная на выходе из выхлопной трубы, снижает потери давления в циклонах в среднем на 3–5%. Однако, по мнению Е.Ф. Кирпичева, улиточный отвод повышает потери напора по сравнению с циклоном без раскручивающего устройства [40].

Тем не менее, спиральный (улиточный) выход газа нашел широкое применение. Он значительно со-

кращает габариты и предпочтителен в тех условиях, когда высота ограничена или отводящий газоход расположен под прямым углом к оси циклона.

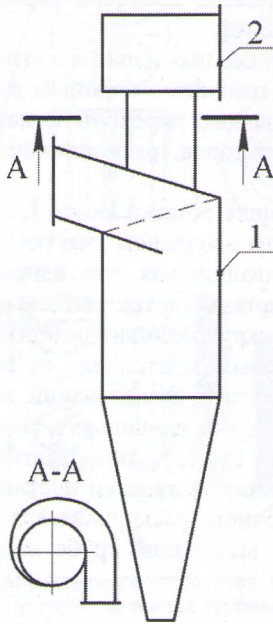


Рис. 6. Циклон с раскручивающей улиткой:
1 – циклон; 2 – улитка

Fig. 6. The cyclone separator with the untwisting scroll:
1 – cyclone separator; 2 – scroll

Уменьшение энергопотребления циклонов за счет модификации выхлопной трубы. По данным [42], гидравлическое сопротивление циклона снижается, если выхлопная труба имеет продольные вырезы. Такие конструкции выхлопных труб (рис. 7, а-с) использовались в циклонных аппаратах финской фирмы Суомен Кухалин Техдас и шведской фирмы Свенска Флэктфабрикен [6]. Использование выхлопной трубы с прямоугольными прорезями (рис. 7, а) позволяет снизить гидравлические потери в циклоне на 35% [42].

Аналогичной конструкции циклон представлен на рис. 7, b [43], на выхлопной трубе которого проделаны вырезы, направленные по образующей.

Положительный эффект в снижении потерь давления был достигнут и в циклонах с перфорированной (рис. 7, d) и сетчатой (рис. 7, e) выхлопными трубами [5, 19]. Использование первой с открытым нижним основанием практически не влияет на сопротивление циклона, а применение той же трубы, но с закрытым основанием – уменьшает потери давления на 10% [8]. Присоединение сетчатого вкладыша к нижней части выхлопной трубы снижает коэффициент сопротивления циклона с 17,4 до 13,9, примерно на 20% [19].

Также известны [44, 45] конструкции выхлопных труб с подобными треугольной форме вырезами (рис. 7, f) и спиральной прорезью (рис. 7, g).

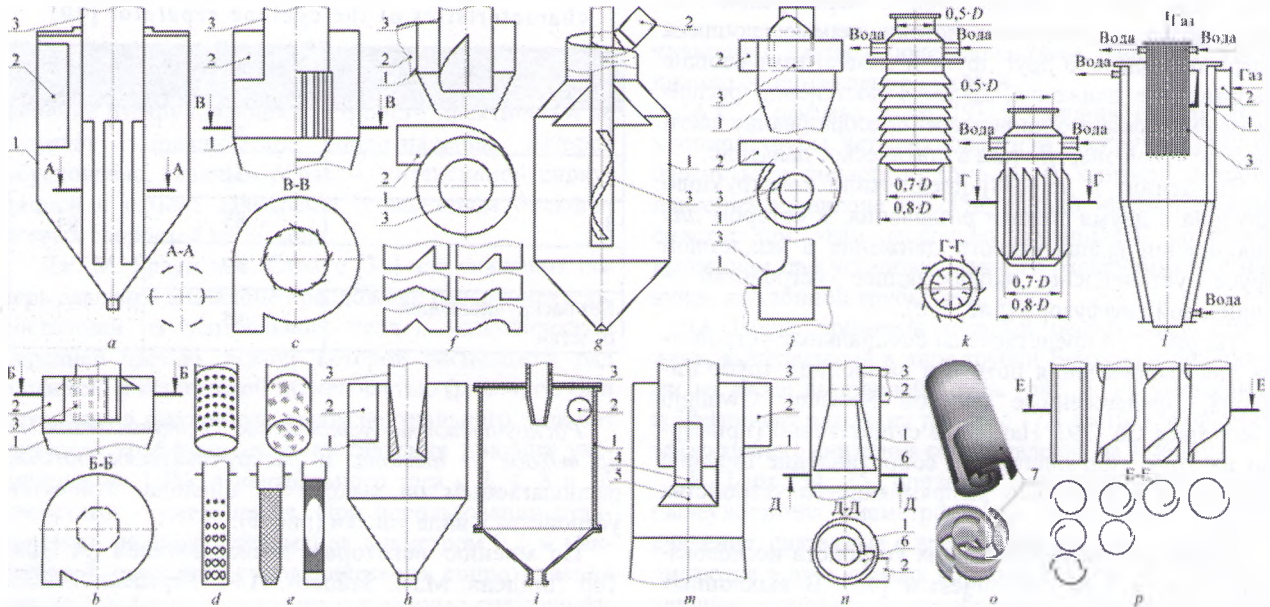


Рис. 7. Циклоны с различными по исполнению выхлопными трубами: а-с – с продольными вырезами [6, 42, 43]; d – перфорированной [5]; e – сетчатой [5, 19]; f – с подобными треугольным вырезами [44]; g – со спиральной прорезью [45]; h – в виде сопла Лавала [26]; i – в виде расширяющегося конуса [27]; j – с овально-цилиндрическим сечением [48]; k – с ребрами [49]; l – в виде кожухотрубчатого теплообменника [50]; m – с цилиндрическим патрубком и конфузуром [51]; n – с конической перегородкой [52]; o – со спиральными пластинами [53]; p – со щелевыми отверстиями [54]; 1 – корпус; 2 – входной патрубок; 3 – выхлопная труба; 4 – цилиндрический патрубок; 5 – конфузор; 6 – коническая перегородка; 7 – пластины

Fig. 7. Cyclone separators with various exhaust tubes on modification: a-c – with the longitudinal cuts [6, 42, 43]; d – perforated [5]; e – mesh [5, 19]; f – with similar triangular cuts [44]; g – with a spiral slot [45]; h – in the form of the Laval nozzle [26]; i – in the form of an extending cone [27]; j – with is oval-cylindrical cross-section [48]; k – with ribs [49]; l – in an aspect кожухотрубчатого the heat exchanger [50]; m – with a cylindrical connecting pipe and the confuser [51]; n – with a conic partition [52]; o – with spiral plates [53]; p – with slot-hole apertures [54]; 1 – case; 2 – upstream end; 3 – exhaust tube; 4 – cylindrical connecting pipe; 5 – confuser; 6 – conic partition; 7 – plates

Отвод газового потока через выхлопную трубу с различного рода вырезами и отверстиями обеспечивает практически такую же или немного меньшую степень очистки, как и без них, но при меньшем на 15–35% перепаде давления [26]. Недостатком данной системы вывода газа является возможность забивания пылью щелевых отверстий. По мнению А.Д. Мальгина, применение выхлопных труб с продольными вырезами оправдывается в тех случаях, когда циклоны используются в качестве предварительной ступени перед электрофильтрами или аппаратами мокрой очистки [6].

Снижение сопротивления циклонных аппаратов также достигается профилированием начального участка выхлопной трубы, например, в форме сопла Лаваля (рис. 7, *h*) [26], или выполнением нижней части выхлопной трубы конической расходящейся (рис. 7, *i*) [28]. По мнению Е. Мушельнауца и К. Бруннера [46], применение последней снижает потери давления на 15–20%.

По данным [47], циклон с модернизированной выхлопной трубой, нижняя половина которой выполнена в виде криволинейного диффузора с уменьшающимся по ходу углом расширения, благодаря устранению зоны циркуляции в выхлопной трубе имеет гидравлическое сопротивление на 28–30% меньше по сравнению с цилиндрической выхлопной трубой. При этом вследствие уменьшения притока газа из периферийных слоев, обогащенных пылью, общая эффективность очистки выше на 2% (концентрация пыли в отходящих газах уменьшается на 30%).

Также предложена [48] конструкция циклонного аппарата с выхлопной трубой, нижняя часть которой имеет овальное или яйцеобразное поперечное сечение, а верхняя часть – цилиндрическая (рис. 7, *j*). Благодаря овальной форме нижней части выхлопной трубы, имеющей большее поперечное сечение, крутка газа в циклоне уменьшается, снижая при этом трение между нисходящим и восходящим вихревыми потоками и, соответственно, потери давления.

Н.А. Козулин и А.И. Ершов [49] определили, что наличие с наружной стороны выхлопной трубы конических и продольных ребер (рис. 7, *k*) уменьшает

сопротивление циклона на 25–50%, однако при этом эффективность пылеулавливания снижается на 2–5%. Ими же вместе с В.П. Исаковым было отмечено [50], что сопротивление циклона с выхлопной трубой в виде кожухотрубчатого теплообменника (рис. 7, *l*) несколько ниже, чем с обычно применяемой гладкой трубой. Причина этого в спрямлении внутреннего винтового потока нижней трубной решеткой циклона-теплообменника.

На рис. 7, *m* представлен циклон, содержащий цилиндрический корпус 1, тангенциальный входной патрубок 2, выхлопную трубу 3 с коаксиально расположенным цилиндрическим патрубком 4, выступающим относительно плоскости входного отверстия выхлопной трубы 3. Патрубок 4 соединен с конфузуром 5, прикрепленным к выхлопной трубе 3 с помощью кронштейнов. Очищенный воздух через цилиндрический патрубок 4 с конфузуром 5 и кольцевую щель поступает в выхлопную трубу 3. Кольцевая щель гарантирует параллельное слияние двух вращающихся потоков воздуха, подсосываемых через данную щель и цилиндрический патрубок 4, обеспечивая минимальные потери давления. Применение предложенной конструкции выхлопной трубы позволяет снизить гидравлическое сопротивление циклона на 12,8% [51].

Циклон с присоединенной к нижнему краю выхлопной трубы разделительной перегородкой 6, имеющей форму разрезанного полого усеченного конуса, представлен на рис. 7, *n*. Расширяющаяся направляющая перегородка способствует плавному уменьшению поперечного сечения для прохода газового потока, постепенно уменьшая количество газа, проходящего между корпусом аппарата и перегородкой, снижая сопротивление. Также благодаря перегородке уменьшается трение между нисходящим и восходящим вихревыми потоками, что дополнительно снижает потери давления [52].

Авторами [53] для снижения в выхлопной трубе тангенциальных скоростей предложено к нижней ее части прикреплять две изогнутые по спирали пластины, являющиеся продолжением выхлопной трубы (рис. 7, *o*).

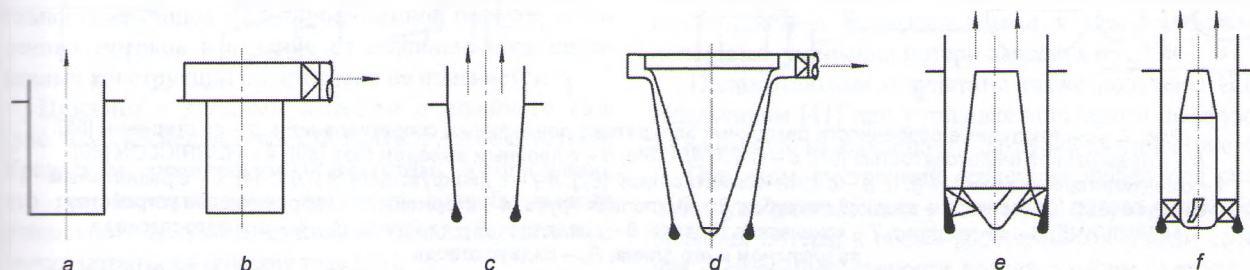


Рис. 8. Относительные величины коэффициентов потерь давления при различных конструкциях выхлопной трубы и вставок (значения даны по отношению к цилиндрической выхлопной трубе): $a - 1,0$; $b - 0,88$; $c - 0,69$; $d - 0,60$; $e - 0,56$; $f - 0,38$ [55]

Fig. 8. Relative magnitudes of loss factors of pressure at various designs of the exhaust tube and inserts (values are given in relation to the cylindrical exhaust tube): $a - 1,0$; $b - 0,88$; $c - 0,69$; $d - 0,60$; $e - 0,56$; $f - 0,38$ [55]

Применение данной конструкции выхлопной трубы снижает сопротивление циклонов диаметром 0,3 м примерно на 20% (циклона Лэппла – на 23,8%, циклона Стейрманда – на 22,7%,) и смещает максимум тангенциальных скоростей (в сечении на расстоянии 0,15 м ниже выхлопной трубы) к стенке аппарата. Последнее, по предположениям авторов, должно положительно влиять на эффективность очистки.

По данным работы [54], применение похожих конструкций выхлопных труб со щелевыми отверстиями (рис. 7, *p*) снижает энергопотребление циклонов на 25–50%.

Для снижения сопротивления циклонов учеными также предложены разнообразные формы выхлопных труб, снабженных раскручивателем. Сопоставление различных конструктивных решений, основанных на применении специальных раскручивающих устройств и модификации выхлопной трубы, приведено на рис. 8, на котором в относительных единицах указаны потери давления в сравнении с цилиндрической выхлопной трубой [55].

Другие способы снижения гидравлических потерь в циклонах. Китайские ученые из Пекинского университета [56] разработали весьма простой способ снижения гидравлических потерь, который применим для любого циклона и заключается в установке специального стержня определенного поперечного сечения и длины (рис. 9, *a*).

В качестве модели для исследования был взят высокоэффективный циклон Стейрманда диаметром 0,35 м. Стержень устанавливался внутри циклона аксиально, как показано на рис. 9, *a*. Один конец стержня фиксировался в точке *A*, а другой – внизу конуса или в бункере при том же полярном угле φ . При использовании двух стержней C_1 ($r = 90$ мм и $\varphi = 180^\circ$) один из них устанавливался с полярным углом $\varphi = 180^\circ$, а другой – $\varphi = 270^\circ$ (тип $2C_1$) [56]. Изменение полярного угла φ незначительно влияет на гидравлическое сопротивление циклона. Оптимальное положение верхнего конца стержня соответствует радиусу $r = 90$ мм, составляющему 51% от диаметра циклона, и полярному углу $\varphi = 180^\circ$.

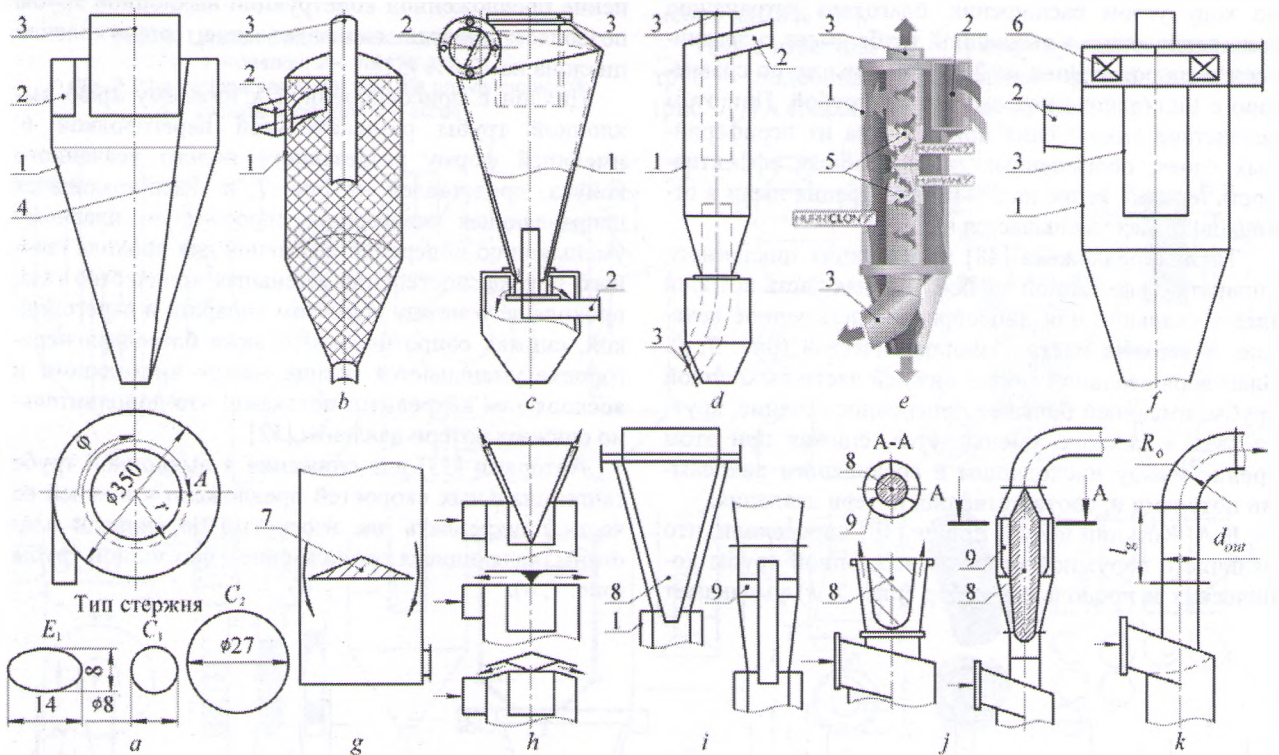


Рис. 9. Конструктивные особенности циклонных аппаратов с пониженным сопротивлением: *a* – со стержнем [56]; *b* – с повышенной шероховатостью [57]; *c* – СИОТ-М1 [58]; *d* – с двойным выводом газа [59]; *e* – HURRIVANE [60]; *f* – с вентилятором на выходе [61]; *g* – с конической тарелкой [62]; *h-j* – с диффузорами [41, 63, 64]; *k* – с радиальным отводом [65]; 1 – корпус; 2 – входной патрубок; 3 – выхлопная труба; 4 – стержень; 5 – направляющее устройство HURRIVANE; 6 – вентилятор; 7 – коническая тарелка; 8 – сердечник; 9 – пластина; d_{out} , l_g – диаметр газохода за циклоном и его длина; R_o – радиус отвода

Fig. 9. Design features of cyclonic apparatuses with the downgraded resistance: *a* – with the rod [56]; *b* – with the raised roughness [57]; *c* – SIOT-M1 [58]; *d* – with a double leading-out of gas [59]; *e* – HURRIVANE [60]; *f* – with the ventilating fan on an exit [61]; *g* – with a conic plate [62]; *h-j* – with diffusers [41, 63, 64]; *k* – with the radial tap [65]; 1 – case; 2 – upstream end; 3 – exhaust tube; 4 – rod; 5 – directing device HURRIVANE; 6 – ventilating fan; 7 – conic plate; 8 – core; 9 – plate; d_{out} , l_g – diameter of the flue behind the cyclone separator and its length; R_o – tap radius

При сохранении эффективности очистки стержень с эллиптическим поперечным сечением уменьшает потери энергии в циклоне до 20% (табл. 2). При установке цилиндрического стержня сопротивление может быть снижено более чем на 50%, однако эффективность разделения при этом падает на 4,8% [56].

Таблица 2

Снижение сопротивления циклона и его эффективности в зависимости от поперечного сечения стержня ($r = 90$ мм и $\varphi = 180^\circ$) [56]

Table 2

Decrease in pressure drop of the cyclone separator and its efficiency depending on the transverse rod cross-sections ($r = 90$ mm and $\varphi = 180^\circ$) [56]

Характеристика	Поперечное сечение стержня (тип)			
	E_1	C_1	$2C_1$	C_2
Снижение сопротивления циклона, %	19,4	29,2	38,8	53,2
Снижение эффективности циклона, %	0	0,3	1,4	4,8

Г. Россман [57] установил, что, увеличивая шероховатость внутренней поверхности корпуса циклона (рис. 9, *b*), можно снизить гидравлические потери в нем на 37%, в то время как степень очистки остается постоянной или уменьшается незначительно. Дополнительное увеличение шероховатости внутренней поверхности входного патрубка, выхлопной трубы и патрубка для отвода твердого материала вызывает усиление эффекта понижения сопротивления.

Как средство для увеличения производительности циклонов используют комбинированную подачу запыленных потоков на вход аппарата и вдоль оси навстречу друг другу [58]. Схема циклона СИОТ-М1 с комбинированной подачей запыленного газа показана на рис. 9, *c*. При одних и тех же потерях давления коэффициент местного сопротивления сухих циклонов с комбинированной подачей запыленного воздуха снижается в 2,0–2,5 раза в сравнении с нормализованными конструкциями, за счет чего производительность по газу может быть повышена в 1,4–1,5 раза. Эффективность циклонов с комбинированной подачей запыленных потоков в отличие от циклонов нормализованных конструкций практически не изменяется.

Циклоны с двойным выводом очищенного газа (рис. 9, *d*) исследовались СФ НИИОГАЗ совместно с Уральским химическим институтом. Установлено, что при использовании двойного способа вывода очищенного потока из циклона снижаются удельные энергозатраты на очистку газа [59].

Сочетая двойной вывод очищенного газа и направляющие устройства HURRIVANE, австрийское ООО «А ТЕС» разработало циклонный аппарат HURRICLON (рис. 9, *e*), имеющий большую эффективность очистки и меньшее гидравлическое сопро-

тивление. В сравнении с обычным циклоном потери давления и унос пыли в аппарате HURRICLON стандартного типа меньше, соответственно, на 25% и 50%, а в циклоне HURRICLON специального типа – меньше, соответственно, на 50% и 10% [60]. Широкое распространение данный аппарат получил на цементных заводах в Австрии, Турции, Колумбии, Индии и других странах.

Одним из способов снижения энергозатрат при центробежной очистке газа является использование энергии вращательного движения выходящего из аппарата очищенного потока для уменьшения мощности, затрачиваемой тягодутьевым устройством центробежного типа на перемещение им газа через пылеуловитель. Поскольку в таких устройствах передача энергии потоку осуществляется посредством его закручивания, то подача в тягодутьевое устройство уже вращающегося потока будет способствовать уменьшению потребляемой им мощности. По данным исследований [61], проведенных на циклоне ЦН-15, при установке радиального вентилятора непосредственно на выходе (рис. 9, *f*) его энергопотребление снижается на 15–20%.

В цилиндрических циклонах с гладкими внутренними стенками для отделения слипающихся и влажных материалов целесообразна установка конической тарелки (разделительной диафрагмы) (рис. 9, *g*) [62]. По данным А.П. Мезенцева [62], использование такой конструкции позволяет снизить аэродинамическое сопротивление на 30%.

На рис. 9, *h–j* представлены схемы циклонов, оборудованных диффузорами. Согласно одним исследованиям – при расстоянии между конусами кольцевого диффузора, равном 1/5 диаметра выхлопной трубы, и угле 20° снижение потерь напора пропорционально длине конуса; согласно другим – угол конусности диффузора не влияет на потери давления [63]. Увеличивая угол на 180° , то есть превращая кольцевой диффузор в пару параллельных пластинок (рис. 9, *h*), можно достичь снижения сопротивления, также как и в случае обычного конусного диффузора.

Ф.Б. Шнайдер [64] с помощью кольцевого диффузора (рис. 9, *i*) снизил сопротивление циклона на 34%, а установив обычный диффузор с цилиндрическим сердечником и прикрепленными к нему четырьмя лопастями, уменьшил потери давления на 24%.

Положительные результаты также получены И.Е. Идельчиком [41] при установке кольцевого диффузора на выходе из выхлопного патрубка циклона (рис. 9, *j*). При этом внутренний сердечник диффузора способствует радиальному растеканию потока в нем без больших потерь, а общее расширение площади сечения – снижению скорости потока в целом. Автор установил, что чем сильнее закручен поток в циклоне, тем больший эффект дает диффузор. Так, если для одиночного циклона ЦН-15 снижение сопротивления составляет примерно 14% (при скорости 4 м/с), то для циклона типа ЦНС-8, в котором крутка потока интен-

сивнее, это снижение составляет 15%. В случае группового циклона, состоящего из аппаратов ЦН-15, снижение общего сопротивления составляет 13%, а для случая с аппаратами ЦНС-8 – 17% [41].

Установка кольцевого диффузора целесообразна не только при работе на выхлоп, но и в сети. В последнем случае диаметр участка за диффузором принимается равным диаметру его выходного сечения. В обоих случаях полезно в широком сечении участка за диффузором дополнительно установить радиальные пластины (рис. 9, *г*). Оптимальное число пластин для кольцевого диффузора равно трем. Применение последнего снизило коэффициент сопротивления циклона ЦН-15 при работе в сети на 16%. Сопротивление циклона может быть еще больше снижено, если пластины будут на входе плавно загнуты по направлению вращающегося потока.

Цилиндрический сердечник с лопастями Ф.Б. Шнайдера (рис. 9, *и*) и сердечник с радиальными пластинами И.Е. Идельчика (рис. 9, *ж*) можно рассматривать как раскручивающие устройства, устанавливаемые на выходе из циклона.

Поскольку кольцевой диффузор устанавливается за циклоном, он не влияет на эффективность очистки, что является его основным достоинством перед некоторыми раскручивающими устройствами, снижающими вместе с сопротивлением также и коэффициент очистки. Однако это приводит к значительному увеличению металлоемкости и габаритов по высоте.

Во втором издании Руководящих указаний на циклоны НИИОГАЗ [2] с целью снижения аэродинамического сопротивления групп была рекомендована установка кольцевых диффузоров на выхлопные трубы циклонов и исключены компоновки с отводом газов от циклонов через раскручивающие улитки. Это привело к неоправданному увеличению металлоемкости групповых циклонов [11]. Поэтому в дальнейшем институтами НИИОГАЗ и Гипрогазоочистка было принято решение возвратиться к компоновке групповых циклонов, рекомендуемой изданием Руководящих указаний 1961 г.

При работе циклона в сети часто возникает необходимость изменить направление потока в сторону от оси циклона (на 90°). С этой целью можно использовать радиальный отвод ($R_o/d_{out} = 1,5$) [2]. По данным НИИОГАЗа [2], данный отвод, установленный непосредственно за циклоном, не повышает его сопротивления. Только при расположении отвода далеко за циклоном ($l_g/d_{out} \geq 12$) его дополнительное сопротивление следует учитывать. Результаты специальных исследований [65] говорят о следующем. Максимальное суммарное сопротивление циклона и радиального отвода (рис. 9, *к*) получается при наибольшем удалении их один от другого ($l_g/d_{out} \geq 34$), т. е. именно тогда, когда за циклоном практически уже полностью реализуются все потери давления, в том числе и потери, связанные с раскручиванием потока (его выравниванием). Более того, при $l_g/d_{out} = 0$ общий коэффициент сопротивления становится даже

несколько меньше. Подобный характер зависимости объясняется тем, что установка радиального отвода способствует дополнительному раскручиванию потока за циклоном и, наоборот, одностороннее вращение потока за циклоном гасит в некоторой степени вторичные токи (парные вихри) в отводе.

Выводы

Анализ различных конструктивных решений, направленных на снижение энергопотребления циклонов, показывает, что не все направления имеют одинаковую перспективу развития. К неперспективным следует отнести пути, в результате которых наряду со снижением гидравлического сопротивления ухудшается эффективность очистки. К ним можно отнести применение выхлопных труб с различными прорезями, различных устройств в основной сепарационной зоне аппарата, например, стержней, увеличение шероховатости внутренней поверхности циклона.

Среди устройств, не оказывающих существенного влияния на эффективность очистки, как наиболее предпочтительные следует выделить раскручивающие устройства, преобразующие безвозвратно теряемую кинетическую энергию выходящего вращающегося потока в статическое давление.

Анализ известных конструкций раскручивателей позволяет сформулировать следующие подходы к разработке раскручивающих устройств для снижения гидравлического сопротивления циклонов:

1. Влияние раскручивающего устройства на характеристики циклона определяется не только конструкцией самого раскручивателя, но и конструкцией циклонного аппарата и расположением в нем раскручивающего устройства.

2. Раскручивающие устройства, устанавливаемые в нижней части циклона и на входе в выхлопную трубу, существенно снижают гидравлическое сопротивление, однако при этом уменьшается интенсивность вращения потока в сепарационной зоне циклона, что способствует увеличению выноса частиц в выхлопную трубу.

3. Устройства, устанавливаемые на выходе из циклона, не влияют на степень очистки, но в наименьшей степени снижают потери давления.

4. Наиболее перспективным является применение раскручивающих устройств, устанавливаемых внутри выхлопной трубы, которые, не ухудшая эффективности очистки, позволяют значительно снизить энергопотребление циклонов.

Список литературы

- Идельчик И.Е. К вопросу о гидравлическом сопротивлении циклонов // ИФЖ. 1969. Т. XVI, № 5. С. 899–901.
- Циклоны НИИОГАЗ. Руководящие указания по проектированию, изготовлению, монтажу и эксплуатации. Ярославль: Верхне-Волжское книжное изд-во, 1970.

3. Durch Fliehkraft wirkender Staubabscheider: pat. 99163 DE, kl. 50: Müllerei / Danneberg & Quandt in Berlin; patentirt 24.02.1897; ausgegeben 03.09.1898.
4. Zyklonabscheider: pat. 3624086 DE, IPC⁴ B 04 C 5/103 / H.D. Maury, W. Buslowski, O. Kleffmann, B. Kraft; anmelder Orenstein & Koppel AG. – P 3624086.9; anmeldetag 17.07.1986; offenlegungstag 21.01.1988.
5. Device for reducing pressure loss of cyclone dust collector: pat. 6679930 US, IPC⁷ B 01 D 45/12 / H.S. An, K.S. Lim, D.J. Kwak, B.S. You, S.H. Lee; assignee LG Electronic Inc. – 10/048125; filed 15.03.2000; pub. 20.01.2004.
6. Первов А.А. Экспериментальное исследование аэродинамики циклонов и разработка устройств для снижения их гидравлического сопротивления: дисс. ... канд. техн. наук. М., 1973.
7. Centrifugal separator: pat. 2010128 US, cl. 209–144 / G. D. Arnold; applicant – № 53341; filed 17.09.1931; pub. 06.08.1935.
8. Shepherd C.B., Lapple C.E. Flow pattern and pressure drop in cyclone dust collectors // Ind. Eng. Chem. 1939. Vol. 31, No 8. P. 972–984.
9. Hoffmann A.C., Peng W., Dries H. [et al.]. Effect of pressure recovery vanes on the performance of a swirl tube, with emphasis on the flow pattern and separation efficiency // Energy Fuels. 2006. Vol. 20, No 4. P. 1691–1697.
10. Первов А.А. Аэродинамические исследования циклонов НИИОГАЗа с устройствами для снижения гидравлического сопротивления // Механическая очистка промышленных газов / НИИОГАЗ; под ред. Б.Ф. Подошвенникова. М.: Машиностроение, 1974. С. 160–170.
11. Биргер М.И., Вальдберг А.Ю., Мягков Б.И. [и др.] Справочник по пыле- и золоулавливанию / под общ. ред. А.А. Русанова. М.: Энергия, 1975.
12. Straightening instrument and cyclone: pat. 5180257 US, IPC⁵ B 65 G 53/60 / R. Narishima, T. Ogiri, Y. Kawamura, H. Iwakawa; applicant Onoda Cement Co, Ltd. – № 627462; filed 14.12.1990; pub. 19.01.1993.
13. Fluid stream directing means: pat. 2506298 US, cl. 183–80 / R. Griffen; applicant American Blower Corp. – № 767777; filed 09.08.1947; pub. 05.02.1950.
14. Циклон для сепарации газовых смесей: а. с. 224296 СССР, МПК В 01 d, кл. 50 e, 3/10 / А.Д. Мальгин. – № 1074878/23-26; заявл. 28.04.1966, опублик. 06.08.1968.
15. Мальгин А.Д., Первов А.А., Трофимов Д.М. Очистка дымовых газов в батарейных циклонах с рециркуляцией потока // Промышленная энергетика. 1972. № 2. С. 27–28.
16. Fliehkraftabscheider: pat. 49384 DDR, IPK B 02 h, kl. 50 e, 3/10 / W. Kutter; patentinhaber W. Kutter. – WP 50 e / 105737; anmeldetag 27.07.1964; ausgabetag 05.08.1966.
17. Dip pipe for facilities for the separation of substance mixtures: pat. 5275730 US, IPC⁵ B 65 G 53/60 / J. Keuschnigg; patentinhaber Voest-Alpine Krems Finaltechnik GmbH, J. Keuschnigg. – № 838798; filed 18.03.1992; pub. 04.01.1994.
18. Schwaiger G. Reducing pressure loss // International Cement Review. 1998. March. P. 59–63.
19. Страус В. Промышленная очистка газов / пер. с англ. Ю.Я. Косога. М.: Химия, 1981.
20. Первов А.А. Исследование устройств для снижения сопротивления циклонов // Обеспыливающие устройства промышленной вентиляции: сборник. Материалы семинара МДНТП, 14–15 сентября 1970. М., 1970. С. 101–105.
21. Первов А.А. Конструктивные особенности устройств для снижения гидравлического сопротивления циклонов // Очистка дымовых газов: сборник. 3–71–5. М.: НИИИнформтяжмаш, 1971. С. 17–24.
22. Устройство для преодоления сопротивлений в циклонном аппарате: а. с. 147444 СССР, кл. 50 e, 3 / Н.А. Козулин, А.И. Ершов. № 722456/25-8; заявл. 20.03.1961; опублик. 21.05.1962.
23. Ершов А.И. Исследование характеристик циклонного утилизатора тепла для запыленных газов: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. Л., 1961.
24. Циклонный пылеуловитель: а. с. 718133 СССР, МПК² В 01 D 45/14 / Н.И. Стоянов, А.Г. Большаков, Г.М. Долгих, Ю.В. Кванин; № 2504794/23-26; заявл. 08.07.1977; опублик. 28.02.1980.
25. Ершов А.И., Исаков В.П., Каган С.Ф., Ягнов И.М. Усовершенствование аппаратурно-технологической схемы производства окиси цинка // Лакокрасочные материалы и их применение. 1965. № 6. С. 54–57.
26. Сабуров Э.Н., Карпов С.В., Осташев С.И. Теплообмен и аэродинамика закрученного потока в циклонных устройствах / под ред. Э.Н. Сабурова. Л.: Издательство Ленинградского университета, 1989.
27. Zyklon: pat. 4135171 DE, IPC⁵ B 04 C 5/103, B 04 C 5/12 / H.-G. Faßbinder; anmelder Applikations- und Technikzentrum für Energieverfahrens-, Umwelt- und Strömungstechnik. – P 4135171.1; anmeldetag 24.10.1991; offenlegungstag 29.04.1993.
28. Stairmand C.J. Pressure drop in cyclone separators // Engineering. 1949. Vol. 168, No. 4369. P. 409–412.
29. Xu H.Q. Experimental Study of Cyclones // Exp. Tech. Management (in Chinese). 1984. Vol. 1. P. 35–43.
30. Fliehkraftstaubabscheider: pat. 1507817 DE, IPC B 04 c, kl. 50 e, 3/10 / H. Weinberg; anmelder Kastrup KG. – P 1507817.8 (K 58957); anmeldetag 07.04.1966; offenlegungstag 02.01.1970.
31. Browne J.M., Strauss W. Pressure drop reduction in cyclones // Atmospheric Environment. 1978. Vol. 12, No. 5. P. 1213–1221.
32. Griffiths A.J., Yazdabadi P., Syred N. The use of centre bodies and de-swirl vanes in the exhaust of cyclone dust separators // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. 1996. Vol. 210. P. 193–203.
33. Improvements in or relating to dust separators: pat. 646087 GB, cl. 23, A1a / applicant Corinth Ltd. – № 7696/48; filed 13.03.1948; pub. 15.11.1950.

34. Verfahren und Vorrichtung zur Wiedergewinnung der Drallenergie von Zyklonabscheidern: pat. 926647 DE, kl. 50 e, 3/10 / W. Barth; anmeldetdag 22.04.1951; ausgegeben 21.04.1955.
35. Barth, W. Entstaubung // Brennstoff-Wärme-Kraft. 1955. Bd. 7, No 4. S. 159–160.
36. Бутаков С.Е. Аэродинамика систем промышленной вентиляции. М.: Профиздат, 1949.
37. Durch Fliehkraft wirkender Luftreiniger mit im Luft-Abzugrohr angeordneten festen Scheidewänden: pat. 134360 DE, kl. 50 e / Vereinigte Maschinenfabrik Augsburg und Maschinenbaugesellschaft Nürnberg. – anmeldetdag 03.10.1901; ausgegeben 02.09.1902.
38. Schmidt P. Zyklonabscheider mit Schraubenspalt-Diffusor // Staub. Reinhaltung der Luft. 1985. Bd. 45, No 4. S. 163–165.
39. Air guide for cyclone discharge pipe: pat. 2418877 GB, IPC⁷ B 04 C 5/12, B 04 C 5/26, B 04 C 5/28 / Jang-keun Oh, Sung-cheol Lee; applicant Samsung Gwangju Electronics Co, Ltd. (KR). – 0506920.8; filed 05.04.2005; pub. 12.04.2006.
40. Кирпичев Е.Ф. Усовершенствование одиночных и батарейных циклонов и создание золоуловителей с прямоточными циклонными элементами // Очистка дымовых газов электростанций от золы: сборник; под ред. С.М. Шухера. М.: БТИ ОРГРЭС, 1962. С. 100–111.
41. Идельчик И.Е. Гидравлическое сопротивление циклонов, его определение, величина и пути снижения // Механическая очистка промышленных газов / НИИОГАЗ; под ред. Б.Ф. Подошвенникова. М.: Машиностроение, 1974. С. 135–159.
42. Ludewig, H. Modellversuche am zyklon über den einfluß der tauchrohrtiefe auf abscheidegrad und druckverlust // Maschinenbautechnik. 1958. Bd. 7, No. 8. S. 416–421.
43. Fliehkraftabscheider: pat. 49385 DDR, IPK B 02 h, Kl. 50 e, 3/10 / E. Schlender; inhaber E. Schlender. – WP 50 e / 105748; anmeldetdag 29.01.1963; ausgabetag 05.08.1966.
44. Zyklonabscheider: pat. 3524084 DE, IPC⁴ B 04 C 5/13 / A. Abelitis; anmelder Klöckner-Humboldt-Deutz AG. – № P 3524084.9; anmeldetdag 05.07.1985; offenlegungstag 11.12.1986.
45. Abzugsrohr für Zyklon-Staubabscheider: pat. 494107 DE, kl. 12 e gr. 2 / I. Loeser; patentirt 28.03.1928; ausgegeben 19.03.1930.
46. Muschelknautz E., Brunner K. Untersuchungen an zyklonen // Chem.-Ing.-Tech. 1967. Bd. 39, No. 9/10. S. 531–538.
47. Дьяков В.В., Рожнева В.К., Платонов А.М., Рабинович В.Б. Снижение сопротивления циклона // Известия вузов. Горный журнал. 1981. № 6. С. 51–54.
48. Cyclone: pat. 2137906 GB, IPC³ B 04 C 5/13, B 04 C 5/081, B 04 C 5/26 / M. Kiyosawa, E. Sonoda, N. Inoue; applicant UBE Industries Ltd. (JP). – № 8409267; filed 10.04.1984; pub. 17.10.1984.
49. Козулин Н.А., Ершов А.И. Исследование теплообмена в циклонном аппарате с различным исполнением теплопередающих поверхностей // Изв. вузов. Энергетика. 1961. № 6. С. 82–87.
50. Козулин Н.А., Ершов А.И., Исаков В.П. Охлаждение газов с трехокисью сурьмы в циклонном теплообменнике // Цветные металлы. 1964. № 1. С. 81–82.
51. Циклон: а. с. 1519781 СССР, МПК4 В 04 С 5/12 / А.В. Рябов, М.Л. Левинзон, Н.А. Кошарская; заявитель Специальный проектно-конструкторский институт Министерства тракторного и сельскохозяйственного машиностроения СССР – № 4190245/23-26; заявл. 04.02.1987; опубли. 07.11.1989.
52. Materials separation apparatus and method of materials separation: pat. 2896744 US, Cl. 183–83 / H. M. Chapman; applicant – № 599197; filed 20.07.1956; pub. 28.07.1959.
53. Noriler D., Vegini A.A., Soares C. [et al.]. A new role for reduction in pressure drop in cyclones using computational fluid dynamics techniques // Brazilian J. of Chem. Engng. 2004. Vol. 21, No. 1. P. 93–101.
54. Schmidt P. Ungewöhnliche Zyklonabscheider // Chem.-Ing.-Tech. 1990. Bd. 62, No. 7. S. 536–543.
55. Bohnet M. Zyklonabscheider zum trennen von gas/feststoff-strömungen // Chem.-Ing.-Tech. 1982. Bd. 54, No. 7. S. 621–630.
56. Wang L.Z., Ye L. Reducing pressure drop in cyclones by a stick // Aerosol Sci. Technol. – 1999. Vol. 31, No. 2–3. P. 187–193.
57. Zyklon: pat. 10023009 DE, IPC⁷ B 04 C 5/08, B 04 C 5/02 / G. Rossman; patentinhaber Voest-Alpine industrianlagenbau GmbH (AT). – 10023009.1; anmeldetdag 11.05.2000; offenlegungstag 07.12.2000.
58. Платонов А.М. Экономичные сухие циклоны с комбинированной подачей закрученных запыленных потоков // Пром. и санитарная очистка газов: науч.-техн. сб. 1984. № 5. С. 2–3.
59. Штокман Е.А. Очистка воздуха: учеб. пособие. М.: Изд-во АСВ, 2007.
60. Kroihls S., Stoiber W., Keuschnigg J. Reducing pressure loss and saving energy with a vortex finder vane system // World Cement. 1997. October. P. 50–55.
61. Кузьмин В.В. Гидродинамика потоков и эффективность очистки в циклонно-роторном пылеуловителе: дис. ... канд. техн. наук. Минск, 2005.
62. Мезенцев А.П. Очистка воздуха от пыли в центробежных аппаратах с разделительной диафрагмой и вихревых пылеуловителях // Бумажная промышленность. 1983. № 4. С. 26–28.
63. Jackson R. Mechanical equipment for removing grit and dust from gases. – Leatherhead: The British Coal Research Association. 1963.
64. Schneider F.V. Reduction of pressure drop across cyclone dust collectors // General Electric Review. 1950. Vol. 53, No. 2. P. 22–29.
65. Идельчик И.Е., Штейнберг М.Е. Некоторые результаты исследования циклонов ЦН-15, работающих в сети // Химическая промышленность. 1970. № 2. С. 154–155.