

УДК 621.928.37+621.928.93

**Д. И. Мисюля**, кандидат технических наук, ассистент (БГТУ); **В. В. Кузьмин**, кандидат технических наук, доцент (БГТУ); **В. А. Марков**, доктор технических наук, профессор (БГТУ)

### СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЦИКЛОННЫХ ПЫЛЕУЛОВИТЕЛЕЙ

В статье представлен аналитический обзор существующих конструкций циклонных пылеуловителей, перечислены их основные достоинства по сравнению с другими аппаратами аналогичного назначения. Приведена классификация циклонных пылеуловителей, описаны конструктивные особенности, достоинства и недостатки, области применения возвратно-поточных циклонов, прямооточных циклонов и вихревых пылеуловителей. Проанализированы факторы, влияющие на эффективность работы циклонных аппаратов. Предложены усовершенствованные конструкции циклонов типа ЦН.

The article presented an analytical review of existing designs of cyclone dust collectors, lists their main advantages compared to other vehicles of similar purpose. Classification of cyclone dust collectors, design features, advantages and disadvantages, application of back-and-flow cyclone, flow cyclone and whirl dust collectors are described. The factors influencing the efficiency of the cyclone apparatuses are analyzed. Advanced designs of cyclones CN are offered.

**Введение.** Проблема защиты окружающей среды от выбросов загрязненного газа чрезвычайно актуальна. По данным ООН, ежегодно в атмосферу выбрасывается 2,5 млн. т пыли. По мнению американских экологов [1], количество пыли, образующейся в промышленности, будет увеличиваться ежегодно на 4% за счет роста промышленного производства. Это потребует совершенствования существующего пылеулавливающего оборудования, среди которого наиболее часто используются циклонные пылеуловители.

Широкое распространение циклонных пылеуловителей на производстве обусловлено следующими достоинствами перед другими аппаратами аналогичного назначения [2–6]:

- 1) простота конструкции и сравнительно небольшая стоимость;
- 2) возможность функционирования в условиях высоких температур и давлений без каких-либо принципиальных изменений в конструкциях;
- 3) возможность улавливания и классификации абразивных включений при защите внутренних поверхностей циклонов специальными покрытиями;
- 4) высокая производительность и сохранение требуемого уровня фракционной эффективности очистки с ростом массовой концентрации твердой фазы;
- 5) возможность сухого осаждения продукта.

**Основная часть.** При всем многообразии конструктивного исполнения циклонные пылеуловители можно разделить на следующие группы [1]:

- возвратно-поточные (противоточные) циклоны;
- прямооточные циклоны;
- вихревые пылеуловители (ВПУ) или пылеуловители со встречными закрученными потоками (ВЗП).

**Возвратно-поточные циклоны.** Самыми распространенными сухими механическими пылеуловителями являются возвратно-поточные циклоны [7–14]. Их иногда называют обычными циклонами или просто циклонами.

История применения циклонов имеет вековую давность [15–17]. Термин «циклон» (cyclone), обозначающий круговой ветер, в научную литературу ввел Пиддингтон в 1842 г., латинизировав первую букву в греческом слове «kyklon» (вращающийся) [18]. Приоритет изобретения циклона принадлежит США: первый патент № 325521 на циклонный пылеуловитель был получен фирмой «Кникербокер Компани» в г. Джексон (штат Мичиган) в 1885 г. [19]. В Европе первая конструкция циклона была предложена О. М. Морзе и запатентована в Германии (№ 39219) 25 июля 1886 г. Серийное производство пылевых циклонов, начатое в Америке, привело к их широкому распространению в промышленности и, в первую очередь, на деревообрабатывающих предприятиях для сбора опилок и стружки, а спустя десятилетие – на цементных заводах с целью улавливания пыли из обжиговых печей. В Европе первые циклоны были введены в эксплуатацию на германских королевских заводах Фридриха-Августа в Потшappelе близ Дрездена [20]. С тех пор, непрерывно совершенствуясь, они распространились по всему миру, получая все новые и новые сферы применения.

В нефтеперерабатывающей промышленности циклонные пылеуловители используются для очистки газов от катализатора при каталитическом крекинге нефтепродуктов, в технологических и аспирационных системах сажевых производств [21, 22]. В химической промышленности [23, 24] циклоны применяются для очистки газов печей обжига серного колчедана,

при сушке суперфосфата, в технологических установках при производстве концентрированных и сложных минеральных удобрений. На пищевых производствах с помощью циклонов улавливают частицы сахара, барды, сухого жома после сушилок [25], а также они используются в качестве первой ступени очистки в системах аспирации и пневмотранспорта зерноперерабатывающих предприятий [26]. В целлюлозно-бумажной промышленности циклонные пылеуловители применяются в основном для очистки дымовых газов от энергетических утилизационных котлоагрегатов, работающих на древесном топливе, а также в качестве первой ступени золоулавливания при эксплуатации пылеугольных паровых котлов [27]. Широкое применение циклоны нашли на агломерационных фабриках черной и цветной металлургии [13, 28], для улавливания пыли при производстве строительных материалов [29, 30], в фаянсовом производстве [31], а также в аспирационных системах и во многих других случаях, где установка электрофильтров или тканевых фильтров не может быть осуществлена из-за недостатка места или экономически не оправдывается.

Несмотря на внешнюю простоту, в циклоне происходят сложные аэродинамические процессы, которые еще недостаточно изучены. Теоретические методы расчета не дают полного ответа на вопросы, связанные с проектированием циклонов, и не позволяют определить оптимальные параметры. Поэтому в различных отраслях промышленности распространены разнообразные конструкции одиночных, групповых и батарейных циклонов, разработанных на основе экспериментальных исследований.

Основными параметрами, характеризующими работу циклона, являются эффективность очистки и гидравлическое сопротивление, которые зависят от конструктивных особенностей аппарата и скорости движения газового потока.

В свое время из-за отсутствия стройной теории процесса циклонной очистки газов в поисках оптимальной по металлоемкости, гидравлическому сопротивлению и эффективности геометрии циклонов было создано неоправданно большое количество типов данного вида пылеуловителей [32]. По данным П. А. Коузова [33], только в СССР находили применение более 20 различных моделей циклонных аппаратов. Некоторое представление о разнообразии конструкционного оформления циклонов дают рис. 1 и 2.

По конструкции ввода запыленного потока циклоны подразделяются на следующие типы:

1) с простым тангенциальным вводом газа (рис. 1 поз. 34, 40; рис. 2 поз. 1–5, 9–11, 21–24);

2) с тангенциальным вводом газа с винтовой верхней частью (рис. 1 поз. 1–9, 13–17, 31–33);

3) с простым спиральным вводом газа (рис. 1 поз. 10, 11, 18–26, 28, 29; рис. 2 поз. 7, 8, 12, 13, 18, 20);

4) со спиральным вводом газа с винтовой верхней частью (рис. 1 поз. 12, 30);

5) с осесимметричным вводом по направляющим лопаткам (рис. 1 поз. 44; рис. 2 поз. 6).

Циклоны бывают цилиндрические (рис. 1 поз. 1–6; рис. 2 поз. 1–5, 10, 11, 25–27) и конические (рис. 1 поз. 22–24, 28, 29). В цилиндрических циклонах корпус выполнен с удлиненной цилиндрической частью, а в конических – с удлиненной конической частью. Цилиндрические циклоны отличаются высокой производительностью, а конические – высокой эффективностью очистки, но и большим гидравлическим сопротивлением вследствие более интенсивного закручивания газового потока в конической части.

Цилиндрические циклоны НИИОГАЗ: ЦН-11, ЦН-15, ЦН-15У, ЦН-24 (рис. 1 поз. 1–4) предназначены для сухой очистки газов, выделяющихся при технологических процессах (сушка, обжиг, агломерация, сжигание топлива и т. д.), а также для очистки аспирационного воздуха. Они применяются на предприятиях черной и цветной металлургии, химической и нефтяной промышленности, промышленности строительных материалов, в машиностроении, энергетике. Не рекомендуются для использования при улавливании сильнослипающей пыли (особенно при малых диаметрах циклонов). Циклоны ЦН-15У (рис. 1 поз. 3) отличаются от других циклонов ЦН меньшей высотой и имеют более низкие технико-экономические показатели. Поэтому их применение может быть оправданно только в тех случаях, когда имеются ограничения газоочистой установки по высоте.

Конические циклоны НИИОГАЗ: СДК-ЦН-33, СК-ЦН-34, СК-ЦН-22 (СК-ЦН-34М) (рис. 1 поз. 22–24) предназначены для улавливания твердых частиц из технологических газов после реакторов и вспомогательных систем (пневмотранспорт, аспирация, пневмоуборка). Применяются в производстве технического углерода, в установках каталитического крекинга нефтепродуктов, дегидрирования бутана. Циклоны СК-ЦН-22 используются для улавливания пыли, обладающей высокой абразивностью частиц или их высокой слипаемостью.

Циклоны ЦМС-27 (рис. 1 поз. 5) разработаны специально для очистки дымовых газов в малых котельных и промышленных установках, работающих на естественной тяге дымовых труб.

Для улавливания пыли средней крупности в системах пневмотранспорта и в аспирационных установках зерноочистительных отделений мельниц на предприятиях по переработке зерна, деревообрабатывающих и других предприятиях разработаны циклоны-разгрузители ЦР (рис. 1 поз. 6) и ЦРк (рис. 1 поз. 7).

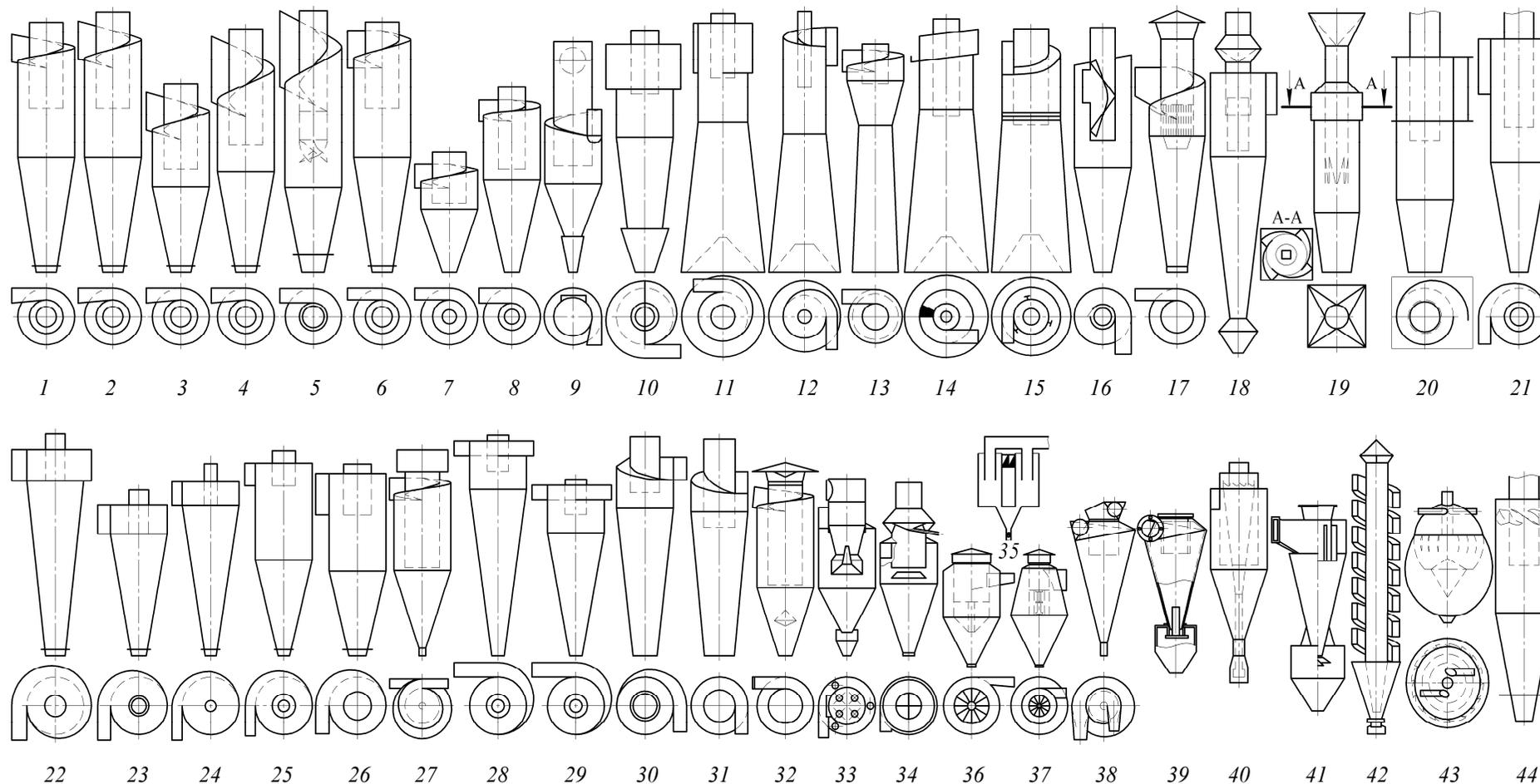


Рис. 1. Конструкции отечественных циклонов:

- 1 – ЦН-11; 2 – ЦН-15; 3 – ЦН-15У; 4 – ЦН-24; 5 – ЦМС-27; 6 – ЦР; 7 – ЦРк; 8 – ЛТА; 9 – ЦП-2; 10 – ЦПН-50; 11 – ЦОК (ВЦНИИОТ);  
 12 – ЦМ (универсальный ЦОК); 13 – РИСИ (ЦКК); 14 – РЦ; 15 – РЦП; 16 – ЦВР; 17 – Ц конструкции Гипродревпрома (Меркушева); 18 – ГДПЦ;  
 19 – элемент БЦ-512; 20 – элемент ПБЦ, БЦУ, БЦУ-М, «Энергоуголь»-512; 21 – элемент ЦБР-150у; 22 – СДК-ЦН-33; 23 – СК-ЦН-34;  
 24 – СК-ЦН-22 (СК-ЦН-34М); 25 – СЦН-40; 26 – СЦН-50; 27 – ЛИОТ; 28 – УЦ конструкции Древлпрома; 29 – УЦ-38 конструкции ВНИИЗ (Мельстроля);  
 30 – УЦМ; 31 – ОТИ; 32 – ЦОЛ; 33 – ЦККБ; 34 – К (ОЭКДМ «Клайпеда»); 35 – монопрофильный с плоским дном (НИПИОТстром);  
 36 – Гипродрева; 37 – бочкообразный Промстройпроекта; 38 – СИОТ; 39 – СИОТ-М; 40 – «Матрешка»; 41 – КЦЭ;  
 42 – винтообразный (Сыркина); 43 – сферический; 44 – элемент БЦ-2, ЦБ-254Р

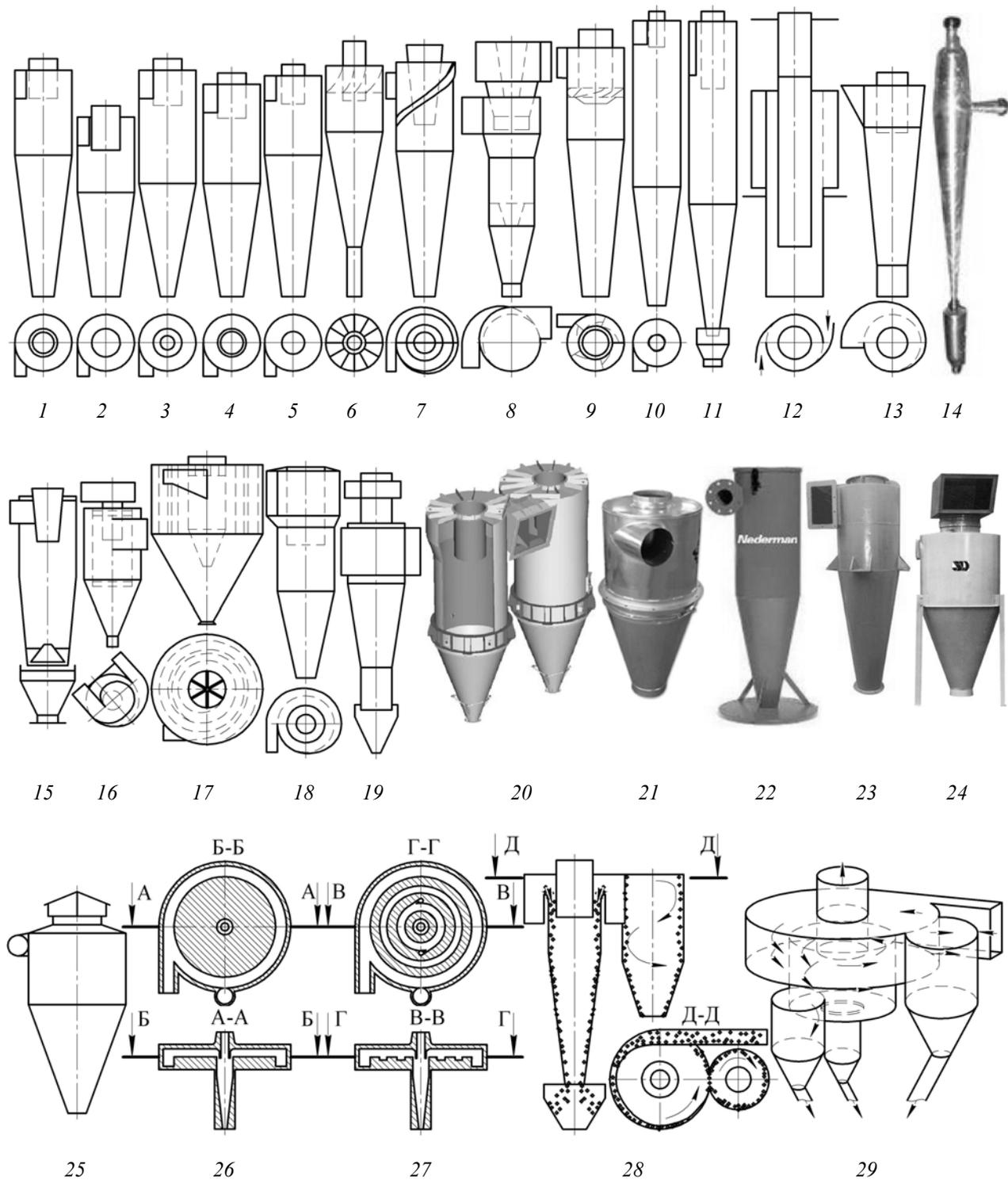


Рис. 2. Конструкции зарубежных циклонов:

- 1 – Стейрманда (высокоэффективный); 2 – Петерсона и Уитби; 3 – Лэппла;  
 4 – Свифта (общего назначения); 5 – Свифта (высокопроизводительный); 6 – чешского производства;  
 7 – Ван Тонгерена; 8 – Давидсона; 9 – Корсо; 10 – Дирго и Лейтха; 11 – T-4/63;  
 12 – Прат-Даниеля; 13 – фирмы Beth (Германия); 14 – фирмы S. Bose (Индия); 15 – Крейзеля;  
 16 – Ван Тонгерена (с обводом пыли); 17 – Полизиуса; 18 – фирмы Svenska Flaktfabriken (Швеция);  
 19 – Файфеля; 20 – высокоэффективный (НЕС) австрийской фирмы А ТЕС;  
 21 – фирмы Oneida air systems (США); 22 – фирмы Nederman (Индия);  
 23 – PABD; 24 – фирмы Samsoud (Франция); 25 – PACK; 26 – МК.І;  
 27 – МК.ІІ; 28 – МК6А; 29 – МК6С

Циклоны типа ЛТА (рис. 1 поз. 8) применяются для очистки воздуха от сухих крупных частиц и влажных мелких частиц древесных отходов от станков и пилорам. Также циклоны ЛТА используются в качестве циклонов-разгрузителей.

Циклоны ЦП-2 (рис. 1 поз. 9) предназначены для улавливания пыли после систем сушки или размола топлива парогенераторов, сжигающих твердое топливо в пылевидном состоянии. Также могут быть использованы для улавливания пыли как циклоны общепромышленного типа.

Циклоны ЦПН-50 (рис. 1 поз. 10) и СЦН-50 (рис. 1 поз. 26) разработаны для улавливания абразивной пыли в литейных производствах, энергетике, металлургии, при производстве строительных материалов.

Циклоны с обратным конусом ЦОК (рис. 1 поз. 11, 12) предназначены для очистки воздуха, удаляемого от местных отсосов, запыленного сухой, неслипающейся пылью, а также для очистки воздуха от абразивной пыли и, как исключение, слипающейся (сажи, талька).

Циклоны РИСИ (рис. 1 поз. 13), их еще называют циклонами с конусом-коагулятором, разработаны для очистки воздуха аспирационных систем от всех видов волокнистой и слипающейся пыли на предприятиях деревообрабатывающей промышленности (мебельные производства, полировальные процессы). Также применяются на масложировых предприятиях для улавливания пыли, образующейся при переработке семян хлопчатника, пыли шрота. Данный циклон отличается от других циклонов с обратным конусом наличием дополнительного элемента – конуса-коагулятора. Таким образом, его коническая часть состоит из двух конусов, соединенных основаниями.

Регулируемый циклон РЦ (рис. 1 поз. 14) имеет обратный конус, снабжен спирально-винтовым закручивающим аппаратом и регулирующим устройством. Данный циклон рекомендуется применять для улавливания пыли с повышенной влажностью или маслянистостью, склонной к слипанию, содержащей очень крупнодисперсную фракцию, обладающей повышенной абразивностью, и при необходимости регулирования режима работы аппарата.

Регулирующий циклон с перераспределяющими лопатками РЦП (рис. 1 поз. 15) разработан на базе циклона РЦ и отличается от него наличием на выхлопной трубе перераспределяющих лопаток.

Циклон с внутренней рециркуляцией ЦВР (рис. 1 поз. 16) предназначен для улавливания пыли сои и других видов сухой неслипающейся мелкодисперсной пыли.

Для улавливания древесной пыли в системах пневмотранспорта и аспирационных установках предложены циклоны конструкции Гипродревпрома (рис. 1 поз. 17).

Циклоны СЦН-40 (рис. 1 поз. 25) предназначены для очистки газов и аспирационного воздуха от мелкой и среднелдисперсной пыли, а также для улавливания абразивной пыли в химической и смежных отраслях промышленности. Рекомендованы для применения в качестве выносной ступени очистки в установках каталитического крекинга.

Циклоны ЛИОТ (рис. 1 поз. 27) разработаны для улавливания крупной сухой, неволокнистой, неслипающейся пыли с размером частиц более 25 мкм.

Циклоны УЦ конструкции Древлпрома (рис. 1 поз. 28) предназначены для очистки технологических выбросов деревообрабатывающих производств от неслипающейся, неволокнистой пыли, а также смесей пыли с сухими опилками и стружкой, а также в системах аспирации деревообработки при улавливании шлифовальной пыли.

Для улавливания мелкодисперсной пыли в системах пневмотранспорта и аспирационных установках в мукомольной, комбикормовой и других отраслях промышленности (например, в размольных и шелушильных отделениях мукомольных и крупяных заводов) разработаны циклоны УЦ-38 конструкции ВНИИЗ (рис. 1 поз. 29).

Циклоны типа УЦ с диаметром корпуса до 850 мм применяются в крахмалопаточной, масложировой отраслях для одиночной и батарейной установок. Они характеризуются высоким гидравлическим сопротивлением. Для снижения потерь давления разработан циклон УЦМ (рис. 1 поз. 30), который отличается от циклона УЦ спирально-винтовым входом.

Циклоны ОТИ (рис. 1 поз. 31) используются на зерноперерабатывающих и пищевых предприятиях в основном при групповой установке. Преимуществом данных циклонов является их значительная устойчивость к изменению скорости газа на входе  $\pm 35\%$ , что важно для систем, работающих с переменным режимом.

Циклоны ЦОЛ (рис. 1 поз. 32) предназначены для улавливания крупной зерновой пыли в аспирационных установках элеваторов и т. п. на предприятиях по хранению и переработке зерна в мукомольной промышленности.

Циклоны К (рис. 1 поз. 34) разработаны для улавливания древесных отходов в системах аспирации деревообрабатывающих цехов при небольшом содержании древесно-шлифовальной пыли.

Монопрофильные циклоны с плоским дном (рис. 1 поз. 35) используются в цементной промышленности.

Для улавливания крупных древесных частиц (стружки, опилок) размером более 40–60 мкм разработаны циклоны Гипродрева (рис. 1 поз. 36). Также для грубой очистки воздуха от неволокнистой пыли и древесных отходов можно применять бочкообразный циклон Промстройпроекта (рис. 1 поз. 37).

Циклоны типа СИОТ (рис. 1 поз. 38, 39) используются для улавливания сухой, неволокнистой, неслипающейся пыли в машиностроении и легкой промышленности.

Сравнительные испытания циклонов различного типа, выполненные в НИИОГАЗ и его Семibrатовском филиале, а также в институтах ЛИОТ и НИИСТО, показали, что рекомендуемая к применению номенклатура аппаратов рассматриваемого типа может быть ограничена цилиндрическими и коническими циклонами НИИОГАЗ [32].

Наибольшее распространение на территории постсоветского пространства получили цилиндрические циклоны конструкции НИИОГАЗ, среди которых в свою очередь чаще всего используются аппараты типа ЦН-15, обеспечивающие достаточно высокую степень очистки при умеренном гидравлическом сопротивлении [34, 35]. Однако при одинаковой эффективности наиболее высокие технико-экономические показатели имеют циклоны ЦН-11 [36]. В связи с этим данный тип циклонов был включен Главпромстройпроектом Госстроя СССР в унифицированный ряд пылеулавливающего оборудования как наиболее экономичный, эффективный и удобный для компоновки в группы [13, 34, 37].

Эффективность очистки циклонами зависит от их диаметра. При увеличении диаметра циклона уменьшается центробежная сила, а следовательно, и степень очистки. Поэтому при очистке значительных количеств газов их объединяют в группу с общими подводом и отводом газов и бункером, т. е. в так называемый групповой циклон, либо используют батарейный циклон.

Батарейный циклон представляет собой пылеулавливающий аппарат, составленный из большого количества параллельно установленных циклонных элементов, объединенных в одном корпусе и имеющих общие подвод и отвод газов, а также сборный бункер. Батарейные циклоны могут быть составлены из обычных и прямоточных циклонных элементов. Последние обладают меньшей эффективностью и поэтому в качестве самостоятельных ступеней очистки используются редко. Чаще всего их применяют для предварительной очистки газов перед такими высокоэффективными аппаратами, как электрофильтры, рукавные фильтры и т. п. При этом прямоточные батарейные циклоны

встраиваются в форкамеру соответствующего аппарата, образуя с ним единую конструкцию двухступенчатого пылеуловителя.

Батарейные циклоны с возвратно-поточными элементами находят широкое применение в качестве золоулавливающих установок для очистки дымовых газов котельных, сжигающих малозольные топлива, рециркуляционных газов котлов от золы, сушильных газов систем пылеприготовления от невзрывоопасной угольной пыли, а также для очистки газов от многих других промышленных пылей [32].

Опыт эксплуатации батарейных циклонов с элементами разного диаметра показывает [32], что аппараты, составленные из большого количества циклонных элементов малого диаметра без отсоса газов из пылевого бункера, вопреки теоретическим соображениям работают недостаточно эффективно и надежно. Эффективность очистки в целом на 20–25% ниже эффективности отдельных элементов. Это вызывается перетоками газов из элементов с большим сопротивлением в элементы с меньшим сопротивлением.

Попытки снизить гидравлическое сопротивление циклонных пылеуловителей при одновременном уменьшении габаритов и получении целого ряда других преимуществ привели к разработке **прямоточных циклонов** (рис. 3) [32].

Циклоны ЦКТИ (рис. 3, а–в) предназначены для предварительной очистки дымовых газов перед электрофильтрами в системах золоулавливания, а также в качестве первой ступени очистки в любых отраслях, где имеет место высокая начальная запыленность, особенно при наличии у пыли абразивных свойств.

Для улавливания пыли на второй ступени газоочистки в химической и смежных отраслях промышленности разработан прямоточный конический циклон с нижним выводом газа НВГК (рис. 3, г).

Прямоточный циклон с промежуточным отбором пыли ПЦПО (рис. 3, д) – пылеуловитель общепромышленного назначения.

Как правило, при учете всех технико-экономических показателей, принимаемых во внимание при выборе пылеулавливающего аппарата, прямоточные циклоны не выдерживают сравнения с обычными циклонами из-за меньшей эффективности улавливания. Тем не менее в ряде специальных случаев их применение оказывается оправданным. На прямоточные циклоны большого диаметра удобно наносить футеровку и они имеют малое сопротивление. В связи с этим вертикальные футерованные прямоточные циклоны были рекомендованы ЦКТИ в качестве первой ступени очистки для ряда систем золоулавливания [32].

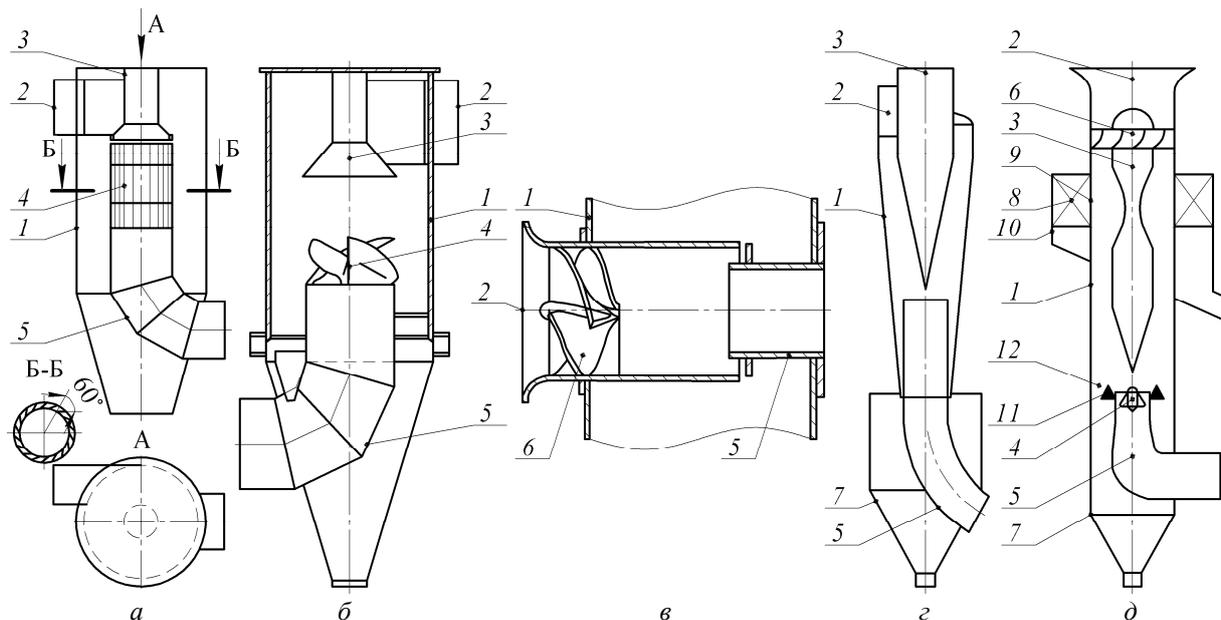


Рис. 3. Прямоточные циклоны:

*a* – ЦКТИ [14, 32]; *б* – ЦКТИ [14]; *в* – циклонный элемент ЦКТИ [14, 32]; *г* – НВГК

(прямоточный конический циклон с нижним выводом газа) [14];

*д* – ПЦПО (прямоточный циклон с промежуточным отбором пыли) [14];

1 – корпус; 2 – входной патрубков; 3 – вытеснитель потока (обтекатель); 4 – раскручиватель;

5 – выхлопной патрубков; 6 – осевой направляющий аппарат; 7 – бункер; 8 – радиальные пластины;

9 – окна промежуточного отбора; 10 – бункер промежуточного отбора;

11 – биконическая пылеотбойная шайба; 12 – кольцевая щель второго отбора

С точки зрения возможности широкого применения в инженерной практике проектирования газоочистных сооружений прямоточные циклоны существенно уступают возвратно-поточным по следующим причинам [14]:

- значительно меньшая проработанность технических характеристик;
- недостаточное количество данных по промышленному применению;
- отсутствие или труднодоступность необходимой технической документацией для их включения в проекты и для изготовления.

**Вихревые пылеуловители** (ВПУ) были разработаны значительно позже циклонов (в начале 60-х гг. XX в.). За прошедшее время создан целый ряд конструкций ВПУ (рис. 4). Опубликовано много статей о положительных результатах исследований и промышленного применения этих конструкций. Вместе с тем публикации нередко содержат противоречивые и не согласующиеся между собой данные, даже принадлежащие одним и тем же авторам [14].

Вихревые пылеуловители ВЗП (рис. 4, *a*) и ВЗП-М (рис. 4, *б*) предназначены для улавливания пыли (в том числе волокнистой, средне- и сильнослипающейся) в системах пневмотранспорта и аспирации; для проведения те-

пломассообменных процессов (сушки, грануляции и др.) в различных отраслях промышленности.

Вихревые пылеуловители ВЗП-Б (рис. 4, *в*) разработаны для очистки дымовых газов от золы и для улавливания мелкодисперсной пыли в энергетических установках.

Вихревые пылеуловители конструкции МИХМ (рис. 4, *г*) предназначены для улавливания пыли в системах пневмотранспорта и в аспирационных установках в химической и смежных отраслях промышленности.

Вихревые пылеуловители «Вихрь» (рис. 4, *д*) – аппараты общепромышленного назначения.

К основным преимуществам ВПУ перед циклонами следует отнести [14]:

- 1) более интенсивную сепарацию частиц по высоте аппарата;
- 2) более эффективное улавливание тонкодисперсной пыли (менее 5 мкм);
- 3) широкий диапазон нагрузок по газу и дисперсной фазе;
- 4) меньшую энергоёмкость.

Применение ВПУ, использующих для создания внешней спирали чистый воздух, перспективно для очистки высокотемпературных газов, так как изолирует стенки аппарата от воздействия запыленных горячих газов [38].

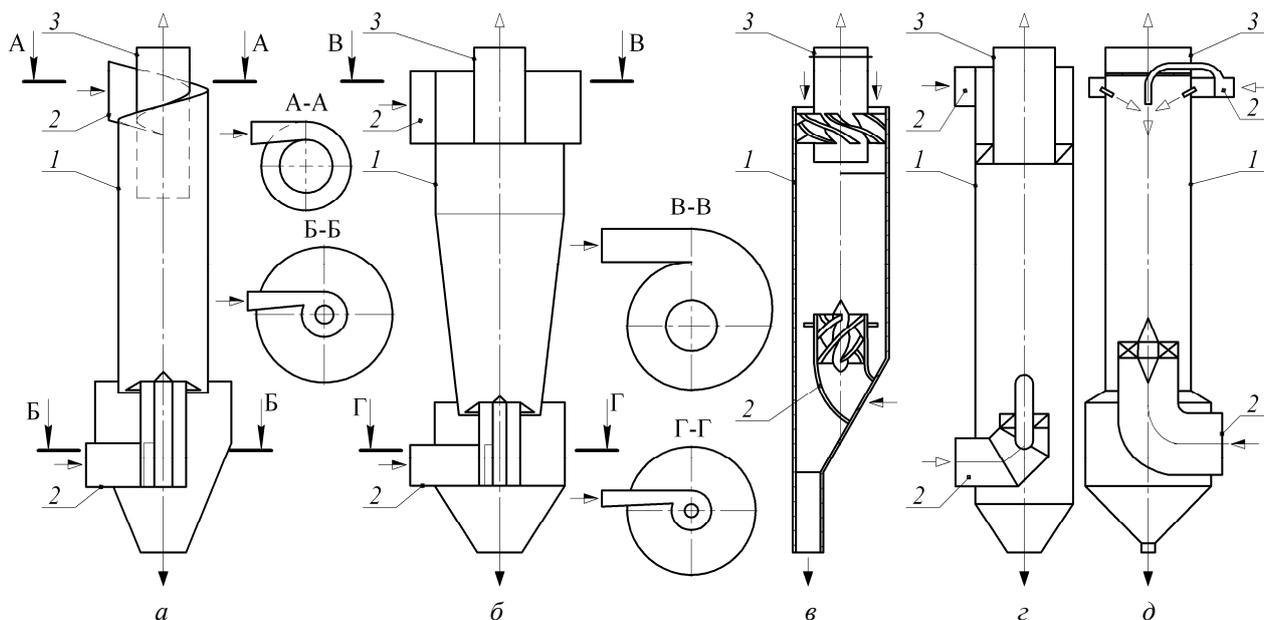


Рис. 4. Вихревые пылеуловители [14]:  
 а – ВЗП; б – ВЗП-М; в – ВЗП-Б; з – ВПУ конструкции МИХМ; д – «Вихрь»:  
 1 – корпус; 2 – патрубок для подачи газа; 3 – патрубок для отвода газа

Вихревые пылеуловители более эффективно улавливают мелкую пыль и предпочтительны при улавливании частиц размером менее 3 мкм [39, 40]. Для более крупных частиц целесообразно использовать обычные циклоны.

С целью минимизации энергозатрат и повышения эффективности улавливания твердых частиц при циклонной очистке газами разработаны усовершенствованные конструкции наиболее распространенных и универсальных циклонов НИИОГАЗ типа ЦН (рис. 5) [41–45].

В циклонах с лопастным раскручивателем (рис. 5, а) кинетическая энергия вращательного движения восходящего вихревого потока преобразуется в потенциальную энергию статического давления, что снижает общие потери давления. При одинаковой эффективности разделения они имеют на 26–30% меньшее гидравлическое сопротивление по сравнению со стандартными циклонами типа ЦН.

В циклонах с раскручивающим устройством с рециркуляцией потока (рис. 5, б), наряду с преобразованием кинетической энергии вращательного движения восходящего вихревого потока в потенциальную энергию статического давления, осуществляется внутренняя рециркуляция наиболее концентрированного пылью потока из выхлопной трубы в бункер. Данные циклонные аппараты по сравнению со стандартными циклонами типа ЦН характеризуются большей эффективностью улавливания и пониженным на 19–23% гидравлическим сопротивлением.

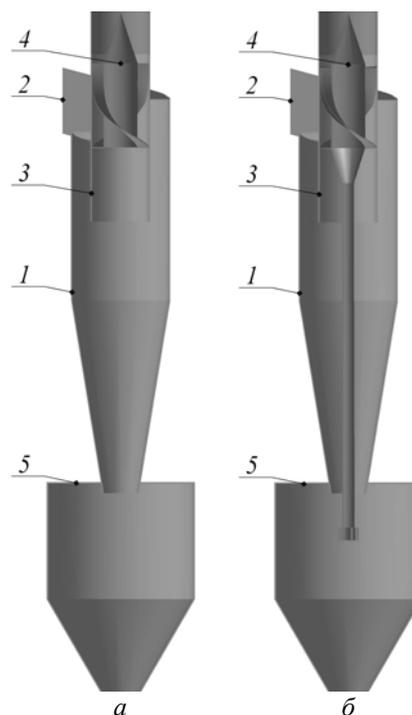


Рис. 5. Усовершенствованные конструкции циклонов типа ЦН:

а – с лопастным раскручивателем;  
 б – с раскручивающим устройством с рециркуляцией потока:

1 – корпус; 2 – входной патрубок; 3 – выхлопная труба; 4 – раскручивающее устройство; 5 – бункер

**Заключение.** Проанализировав существующие конструкции циклонных пылеуловителей, можно сделать следующие выводы:

1. Постоянное совершенствование циклонных пылеуловителей привело к созданию весьма широкого ряда конструкций данных аппаратов, которые можно разделить на возвратно-поточные циклоны, прямоточные циклоны и вихревые пылеуловители.

2. Прямоточные циклоны рационально использовать при пониженных требованиях к эффективности очистки газов, для улавливания крупнодисперсной пыли и минимизации энергетических затрат на проведение процесса.

3. Вихревые пылеуловители имеют наиболее высокую эффективность улавливания тонкодисперсной пыли, однако они более сложны конструктивно. Их применение оправданно при улавливании пыли с большим содержанием мелкой фракции.

4. Наибольшее распространение в качестве сухих механических пылеуловителей получили возвратно-поточные циклоны, среди которых наиболее универсальными являются циклоны ЦН-15, обладающие достаточно высокой эффективностью очистки при умеренном гидравлическом сопротивлении. Современные противоточные циклоны позволяют достаточно эффективно улавливать пыль с размером частиц 10 мкм и более.

Применение усовершенствованных конструкций циклонов типа ЦН позволит снизить энергетические затраты на проведение процессов очистки газов и повысить эффективность улавливания твердых частиц.

### Литература

1. Асламова, В. С. Прямоточные циклоны. Теория, расчет, практика / В. С. Асламова. – Ангарск: Ангарская гос. техн. акад., 2008. – 233 с.

2. Ужов, В. Н. Подготовка промышленных газов к очистке / В. Н. Ужов, А. Ю. Вальдберг. – М.: Химия, 1975. – 216 с.

3. Пирумов, А. И. Обеспыливание воздуха / А. И. Пирумов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1981. – 296 с.

4. Щелоков, Я. М. Повышение эффективности циклонных аппаратов / Я. М. Щелоков // Промышленная энергетика. – 2008. – № 8. – С. 44–45.

5. Карпов, С. В. Высокоэффективные циклонные устройства для очистки и теплового использования газовых выбросов / С. В. Карпов, Э. Н. Сабуров; под ред. Э. Н. Сабурова. – Архангельск: Изд-во Архангельского гос. техн. ун-та, 2002. – 504 с.

6. Greenfield, R. R. High efficiency cyclone dust collector / R. R. Greenfield // Filtration and separation. – 1989. – Vol. 26, № 4. – P. 272–274.

7. Завьялов, С. В. Новое газоочистное и пылеулавливающее оборудование в Республике Беларусь: справ.-информ. материал / С. В. Завьялов,

Д. Н. Абрамович. – Минск: БелНИЦ «Экология», 2003. – 94 с.

8. Газоочистное оборудование: каталог / сост.: Н. М. Васильченко [и др.]. – М.: ЦИНТИ-химнефтемаш, 1988. – 120 с.

9. Тимонин, А. С. Инженерно-экологический справочник: в 3 т. / А. С. Тимонин. – Калуга: Изд-во Н. Бочкаревой, 2003. – Т. 1. – 917 с.

10. Швыдкий, В. С. Очистка газов: справ. изд. / В. С. Швыдкий, М. Г. Ладыгичев. – М.: Теплоэнергетик, 2002. – 640 с.

11. Тимонин, А. С. Основы конструирования и расчета химико-технологического и природоохранного оборудования: справочник: в 3 т. / А. С. Тимонин. – Калуга: Изд-во Н. Бочкаревой, 2002. – Т. 2. – 1025 с.

12. Завьялов, С. В. Газоочистное и пылеулавливающее оборудование, выпускаемое заводами-изготовителями Российской Федерации: сб. справ.-информ. материалов / С. В. Завьялов, Д. Н. Абрамович; Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь. – Минск: РУП «БелНИЦ «Экология», 2006. – 174 с.

13. Старк, С. Б. Газоочистные аппараты и установки в металлургическом производстве: учеб. для вузов / С. Б. Старк. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1990. – 400 с.

14. Лазарев, В. А. Циклоны и вихревые пылеуловители: справочник / В. А. Лазарев. – 2-е изд., перераб. и доп. – Н. Новгород: Фирма ОЗОН-НН, 2006. – 320 с.

15. Зиганшин, М. Г. Проектирование аппаратов пылегазоочистки / М. Г. Зиганшин, А. А. Колесник, В. Н. Посохин. – М.: «Экспресс – 3М», 1998. – 505 с.

16. Эрикссон, С. Е. История развития циклонов / С. Е. Эрикссон // Применение гидроциклонов на зарубежных обогатительных фабриках: сборник переводных статей / под ред. А. И. Поварова. – Л., 1961. – Вып. 130. – С. 17–24.

17. Сабуров, Э. Н. Теория и практика циклонных сепараторов, топок и печей / Э. Н. Сабуров, С. В. Карпов; под ред. Э. Н. Сабурова. – Архангельск: Изд-во Архангельского гос. техн. ун-та, 2000. – 568 с.

18. Откуда пошло слово «циклон» // Наука и жизнь. – 1969. – № 5. – С. 149.

19. Jackson, R. Mechanical equipment for removing grit and dust from gases / R. Jackson. – Leatherhead: The British Coal Research Association, 1963. – 281 p.

20. Сабуров, Э. Н. Циклонные устройства в деревообрабатывающем и целлюлозно-бумажном производстве / Э. Н. Сабуров, С. В. Карпов; под ред. Э. Н. Сабурова. – М.: Экология, 1993. – 368 с.

21. Процессы и аппараты нефтегазопереработки и нефтехимии: учеб. для вузов / А. И. Скобло [и др.]. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2000. – 677 с.
22. Владимиров, А. И. Основные процессы и аппараты нефтегазопереработки: учеб. пособие для вузов / А. И. Владимиров, В. А. Щелкунов, С. А. Круглов. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2002. – 227 с.
23. Скрыбин, Г. М. Пылеулавливание в химической промышленности / Г. М. Скрыбин, П. А. Коузов. – Л.: Химия, 1976. – 63 с.
24. Коузов, П. А. Очистка газов и воздуха от пыли в химической промышленности / П. А. Коузов, А. Д. Мальгин, Г. М. Скрыбин. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Химия, 1993. – 320 с.
25. Стабников, В. Н. Процессы и аппараты пищевых производств / В. Н. Стабников, В. М. Лысянский, В. Д. Попов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Агропромиздат, 1985. – 503 с.
26. Вентиляция, кондиционирование и очистка воздуха на предприятиях пищевой промышленности: учеб. пособие для студентов вузов / Е. А. Штокман [и др.]; под ред. Е. А. Штокмана. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Изд-во АСВ, 2007. – 632 с.
27. Ситтиг, М. Защита окружающей среды в целлюлозно-бумажной промышленности / М. Ситтиг; пер. с англ. Б. М. Гуткина. – М.: Лесная пром-сть, 1981. – 278 с.
28. Пылеулавливание в металлургии: справ. изд. / В. М. Алешина [и др.]; под ред. А. А. Гурвица. – М.: Металлургия, 1984. – 336 с.
29. Банит, Ф. Г. Пылеулавливание и очистка газов в промышленности строительных материалов / Ф. Г. Банит, А. Д. Мальгин. – М.: Стройиздат, 1979. – 351 с.
30. Балтренас, П. Б. Обеспыливание воздуха на предприятиях стройматериалов / П. Б. Балтренас. – М.: Стройиздат, 1990. – 184 с.
31. Красовицкий, Ю. В. Обеспыливание промышленных газов в фаянсовом производстве / Ю. В. Красовицкий, А. В. Малинов, В. В. Дуров. – М.: Химия, 1994. – 272 с.
32. Справочник по пыле- и золоулавливанию / М. И. Биргер [и др.]; под общ. ред. А. А. Русанова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 312 с.
33. Коузов, П. А. Сравнительная оценка циклонов различных типов / П. А. Коузов // Обеспыливание в металлургии: сборник / под ред. Я. А. Штромберга. – М., 1971. – С. 185–196.
34. Ладыгичев, М. Г. Зарубежное и отечественное оборудование для очистки газов: справ. изд. / М. Г. Ладыгичев, Г. Я. Бернер. – М.: Теплотехник, 2004. – 694 с.
35. Юдашкин, М. Я. Пылеулавливание и очистка газов в черной металлургии / М. Я. Юдашкин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1984. – 320 с.
36. Циклоны НИИОГАЗ. Руководящие указания по проектированию, изготовлению, монтажу и эксплуатации / под науч. ред. В. Н. Ужова. – Ярославль: Верх.-Волж. книж. изд-во, 1970. – 95 с.
37. Коузов, П. А. Указания по расчету циклонов А6-52: методические материалы для проектирования / П. А. Коузов, Ф. М. Гулишамбаров, А. Я. Мозгов; под ред. А. Я. Мозгова. – М.: ВНИИОТ ВЦСПС, 1971. – 53 с.
38. Кирсанова, Н. С. Новые исследования в области центробежной сепарации пыли / Н. С. Кирсанова. – М.: ЦИНТИхимнефтемаш, 1989. – 56 с. – (Обзорная информация. Серия ХМ-14, Промышленная и санитарная очистка газов).
39. Медников, Е. П. Вихревые пылеуловители / Е. П. Медников. – М.: ЦИНТИхимнефтемаш, 1975. – 44 с. – (Обзорная информация. Серия ХМ-14, Промышленная и санитарная очистка газов).
40. Сажин, Б. С. Пылеуловители со встречными закрученными потоками / Б. С. Сажин, Л. И. Гудим. – М.: НИИТЭХИМ, 1982. – 46 с. – (Обзорная информация. Серия ХМ-14, Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов. – Вып. 1 (38)).
41. Мисюля, Д. И. Применение лопастного раскручивателя в циклонных пылеуловителях / Д. И. Мисюля, В. В. Кузьмин, В. А. Марков // Труды БГТУ. – 2011. – № 3: Химия и технология неорганич. в-в. – С. 162–169.
42. Мисюля, Д. И. Новая конструкция лопастного раскручивателя циклонного аппарата / Д. И. Мисюля, В. В. Кузьмин, В. А. Марков // Энергетика – Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 2010. – № 5. – С. 57–60.
43. Мисюля, Д. И. Устройство для снижения энергопотребления циклонов / Д. И. Мисюля, В. В. Кузьмин, В. А. Марков // Экология и промышленность России. – 2010. – № 9. – С. 20–22.
44. Мисюля, Д. И. Влияние раскручивающего устройства на эффективность очистки в циклонах / Д. И. Мисюля, В. В. Кузьмин, В. А. Марков // Промышленная энергетика. – 2011. – № 4. – С. 37–39.
45. Мисюля, Д. И. Разработка и исследование раскручивающего устройства для снижения сопротивления циклонов / Д. И. Мисюля, В. В. Кузьмин, В. А. Марков // Труды БГТУ. Сер. III, Химия и технология неорганич. в-в. – 2010. – Вып. XVIII. – С. 202–205.