

УДК 621.928.37+621.928.93

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

ПРИМЕНЕНИЕ ЛОПАСТНОГО РАСКРУЧИВАТЕЛЯ В ЦИКЛОННЫХ ПЫЛЕУЛОВИТЕЛЯХ

В статье представлена оригинальная конструкция раскручивателя, располагаемого в выхлопной трубе циклона и состоящего из цилиндрической части с радиальными, изогнутыми по направлению вращения газового потока лопастями и конуса. Профиль лопастей соответствует дуге окружности с углом входа, определяемым аэродинамикой газового потока в выхлопной трубе, и углом выхода, соответствующим осевому движению газа. Приведены графические зависимости, показывающие влияние геометрических параметров и высоты установки раскручивателя на сопротивление и эффективность циклонов, и определены его оптимальные параметры. Применение данного раскручивающего устройства позволяет снизить гидравлические потери в циклонных пылеуловителях ЦН-11 и ЦН-15 соответственно на 28–30% и 26–27,5%. Степень очистки при этом остается на прежнем уровне.

In the article the original design of the untwisting device which had in the exhaust tube of the cyclone separator and consisting of a cylindrical part with the radial, bent on a direction of twirl of a gas stream blades and a cone is presented. The profile of blades matches to a circular arc with an entrance angle defined by aerodynamics of a gas stream in the exhaust tube, and an outlet angle matching to axial traffic of gas. The graphical dependences showing the influence of geometric parameters and installation altitude of the untwisting device on pressure drop and efficiency of cyclone separators are resulted and its optimum parameters are defined. Application of the given deswirling device allows to lower hydraulic losses in cyclonic dedusters CN-11 and CN-15 accordingly on 28–30% and 26–27,5%. Separation efficiency thus remains at the same level.

Введение. По мере развития индустрии, увеличения единичной мощности технологических агрегатов возрастает количество промышленных выбросов в атмосферу, являющихся частью исходных, промежуточных или конечных продуктов, участвующих в технологическом процессе. С одной стороны, эти вещества могут представлять собой ценные материалы и их утилизация позволит снизить расход сырья и реагентов, а также себестоимость выпускаемой продукции. С другой стороны, они загрязняют окружающую атмосферу, вызывают разрушение строительных сооружений и оборудования, негативно влияют на здоровье людей. Таким образом, очистка промышленных выбросов с отходящими газами представляет одну из самых актуальных задач как в санитарном, так и в технологическом и экономическом отношениях [1].

Для сохранения чистоты атмосферы в условиях роста промышленного производства предъявляются высокие требования ко всем газоочистным аппаратам, среди которых наиболее распространены циклоны, широко применяемые для отделения пыли от газов в самых различных отраслях промышленности [2, 3].

Наибольшее распространение получили цилиндрические циклонные пылеуловители конструкции НИИОГАЗа (ЦН-11, ЦН-15, ЦН-15У, ЦН-24), среди которых в свою очередь чаще всего используются циклоны типа ЦН-15, обеспечивающие достаточно высокую степень

очистки при умеренном гидравлическом сопротивлении. Однако при одинаковой эффективности наиболее высокие технико-экономические показатели имеют аппараты ЦН-11. В связи с этим данный тип циклонов был включен Главпромстройпроектом Госстроя в унифицированный ряд пылеулавливающего оборудования как наиболее экономичный, эффективный и удобный для компоновки в группы [4].

Энергетические затраты в циклоне обусловлены различными факторами. Значительная их часть связана с вращательным движением газа и потерей кинетической энергии выходящего вихревого потока. Поэтому, если уменьшить интенсивность поперечной циркуляции потока, выходящего из аппарата, например, установкой перед выхлопным патрубком или внутри его специальных устройств, то можно существенно снизить гидравлическое сопротивление циклона. В этих целях предложена целая серия проектов различных вариантов раскручивателей [5, 6].

Учитывая вышесказанное, а также постоянно возрастающую значимость проблемы энергосбережения, совершенствование и внедрение устройств регенерации теряемой энергии является, безусловно, актуальной задачей.

Основная часть. На кафедре процессов и аппаратов химических производств разработана конструкция лопастного раскручивающего устройства, схематично представленная на рис. 1.

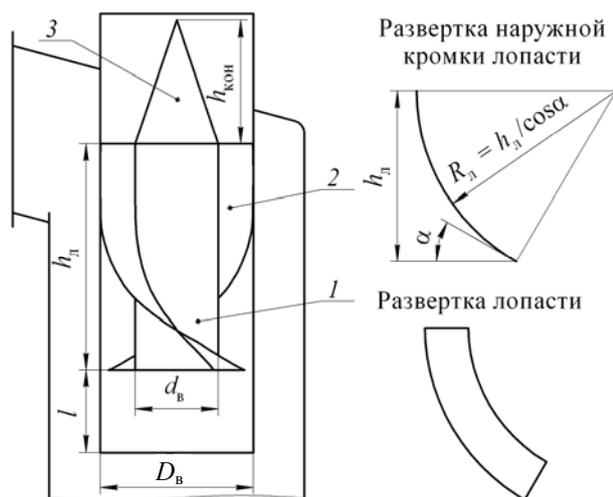


Рис. 1. Лопастной раскручиватель:

- 1 – цилиндрическая часть (сердечник);
 2 – лопасти; 3 – конус; d_b – диаметр сердечника;
 D_b – внутренний диаметр выхлопной трубы;
 h_n – высота лопастей; $h_{кон}$ – высота конуса;
 l – высота установки раскручивателя;
 α – угол наклона передней кромки лопасти;
 R_n – радиус кривизны профиля лопасти

Раскручиватель, располагаемый в выхлопной трубе циклона, состоит из цилиндрической части 1 с радиальными, изогнутыми по направлению вращения газового потока лопастями 2 и конуса 3. Профиль лопастей 2 соответствует дуге окружности (в соответствии со средней линией профиля лопастей спрямляющего аппарата осевых вентиляторов [270]) радиусом R_n . Угол наклона передней кромки лопастей α определяется аэродинамикой газового потока в выхлопной трубе, а задней кромки – соответствует осевому движению газа.

Принцип работы разработанного устройства следующий: очищенный газ в виде вихревого потока поступает в выхлопную трубу и попадает на лопасти 2 раскручивателя, на которых происходит его плавное равномерное выпрямление. Благодаря конусу 3 обеспечивается постепенное расширение газового потока на все сечение выхлопной трубы. Сердечник 1 предназначен для ликвидации осевого обратного тока.

Достоинством данной конструкции раскручивающего устройства является равномерное по всей длине лопасти выпрямление газового потока, обеспечиваемое профилем лопаток, соответствующим дуге окружности.

Целью работы являлось определение геометрических параметров раскручивателя и высоты его установки в наиболее распространенных циклонных пылеуловителях ЦН-11 и ЦН-15.

Гидравлическое сопротивление. Для правильного и полного учета общего сопротивления циклона потери в нем следует определять по одному из следующих двух способов [7]:

а) при работе циклона на выхлоп – по разности между полным давлением на входе в циклон и давлением в объеме за ним (в атмосфере);

б) при работе циклона в сети – по разности полных давлений на входе в циклон и на достаточно большом расстоянии в прямом участке за ним, т.е. там, где поток уже полностью раскручен и выровнен по сечению (для циклона ЦН-15 не менее чем через 30 диаметров выхлопного патрубка).

Исследования гидравлического сопротивления циклонов ЦН-11 и ЦН-15, изготовленных из оргстекла с внутренним диаметром $D = 0,24$ м, проводились на незапыленном атмосферном воздухе на экспериментальной установке, представленной на рис. 2. Условная скорость газа изменялась в интервале $w_{ц} = 2,5$ –4 м/с, соответствующем практически используемому диапазону рабочих скоростей для данных типов циклонных аппаратов.

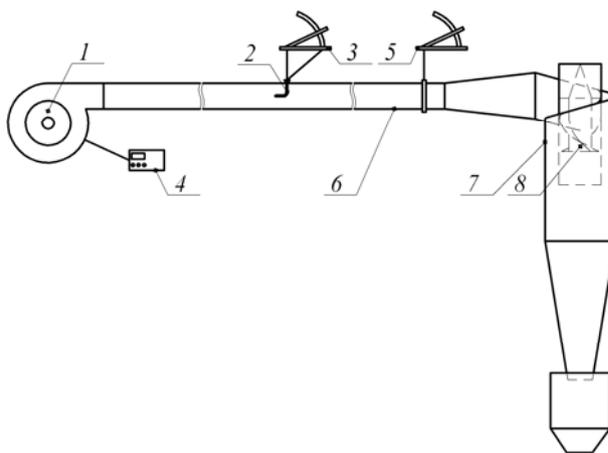


Рис. 2. Схема экспериментальной установки

для исследования гидравлического сопротивления:

- 1 – вентилятор; 2 – трубка Пито;
 3, 5 – микроманометры;
 4 – частотный преобразователь;
 6 – газоход; 7 – циклон;
 8 – раскручивающее устройство

Расход воздуха, транспортируемого через установку радиальным вентилятором 1, измерялся с помощью трубки Пито 2 и соединенного с ней микроманометра 3, а его регулирование производилось путем изменения частоты вращения рабочего колеса вентилятора 1 при помощи частотного преобразователя 4. Статическое давление в газоходе 6 перед входом потока в циклон 7 определялось с помощью коллектора и микроманометра 5.

Влияние раскручивателя на потери давления в циклоне оценивалось коэффициентом снижения сопротивления ϵ , %, определяемым по формуле

$$\varepsilon = 100 \cdot (1 - \Delta p_p / \Delta p),$$

где Δp_p , Δp – сопротивление циклона с раскручивающим устройством и без него, Па.

Число и высота лопастей. Расчетное определение числа и высоты лопастей раскручивателя не может дать достаточно надежных результатов. Поэтому влияние данных параметров на гидравлическое сопротивление циклонов изучено экспериментальным путем. Были исследованы раскручивающие устройства с числом лопастей $n = 1-6$ и высотой лопастей $h_{л} = (0,42-2,11) \cdot D_{в}$ при угле наклона передней кромки лопастей $\alpha = 30^\circ$ и относительном диаметре сердечника $d_{с} = 0,5 \cdot D$. Результаты исследований, представленные на рис. 3 и 4, соответствуют высоте установки раскручивателя $l = D_{в}$.

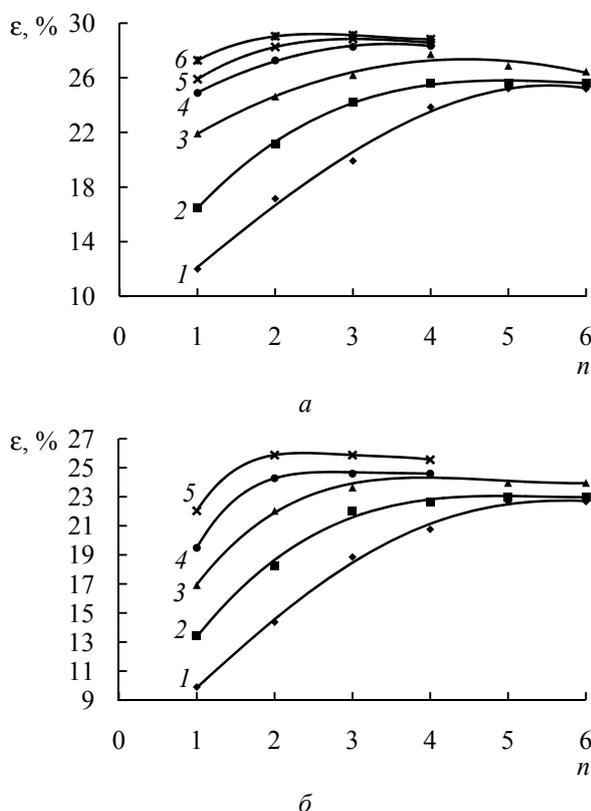


Рис. 3. Влияние числа лопастей n раскручивателя на коэффициент снижения сопротивления ε , %, циклонов ЦН-11 (а) и ЦН-15 (б) при различной высоте лопастей $h_{л}/D_{в}$:
1 – 0,42; 2 – 0,63; 3 – 0,85;
4 – 1,06; 5 – 1,27; 6 – 1,48

Из приведенных зависимостей видно, что влияние количества лопастей раскручивателя на коэффициент снижения сопротивления ε зависит от их высоты. С увеличением высоты лопастей максимум кривых смещается в сторону меньшего числа n . Наибольшее снижение со-

противления достигается путем установки двух- или трехлопастного раскручивателя с высотой лопастей соответственно $h_{л} = (1,48-1,69) \cdot D_{в}$ и $h_{л} = (1,27-1,48) \cdot D_{в}$. Немного меньшего эффекта можно добиться с помощью однолопастного устройства (рис. 4), однако высота лопасти при этом, как и высота цилиндрической части, значительно увеличивается, что приводит к росту его габаритов и затрат материала на изготовление.

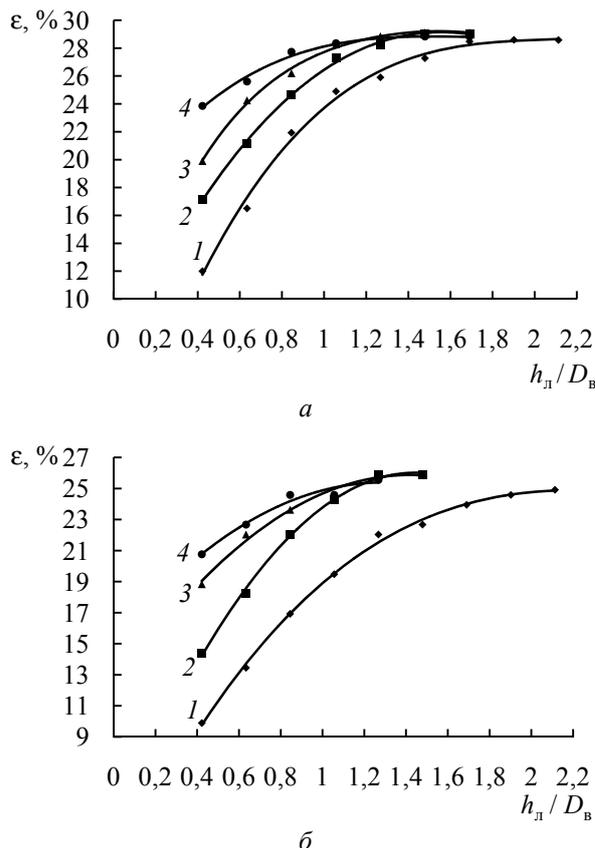


Рис. 4. Влияние высоты лопастей $h_{л}$ раскручивателя на коэффициент снижения сопротивления ε , %, циклонов ЦН-11 (а) и ЦН-15 (б) при различном числе лопастей n :
1 – 1; 2 – 2; 3 – 3; 4 – 4

При увеличении количества лопаток возрастают потери на трение вследствие увеличения суммарной поверхности лопаток. С ростом высоты лопастей раскручивание потока осуществляется более плавно, однако при этом увеличиваются потери на трение вследствие возрастания поверхности лопаток.

Для сильно слипающейся пыли с практической точки зрения более предпочтительным является применение раскручивателя с меньшим числом лопастей, вследствие снижения поверхности для отложения пыли и опасности зарастания проходного сечения в выхлопной

трубе. Поэтому при улавливании такой пыли целесообразнее использовать однолопастной раскручиватель.

Диаметр сердечника. Как известно, размеры кольцевого канала, по которому происходит истечение газа из циклона, зависят от интенсивности вращения потока и диаметра выхлопной трубы. Большим тангенциальным скоростям соответствуют малые кольцевые площади.

Для получения зависимостей, определяющих влияние размера относительного диаметра сердечника раскручивающего устройства на гидравлическое сопротивление, была проведена серия опытов на различных вариантах двухлопастного раскручивателя: $d_b = (0,35-0,7) \cdot D_b$. Высота лопастей изменялась в пределах $h_n = (1,06-1,48) \cdot D_b$. Угол наклона передней кромки лопастей был одинаков и равнялся $\alpha = 30^\circ$. Результаты испытаний представлены на рис. 5 при условной скорости газа $w_{ц} = 3$ м/с.

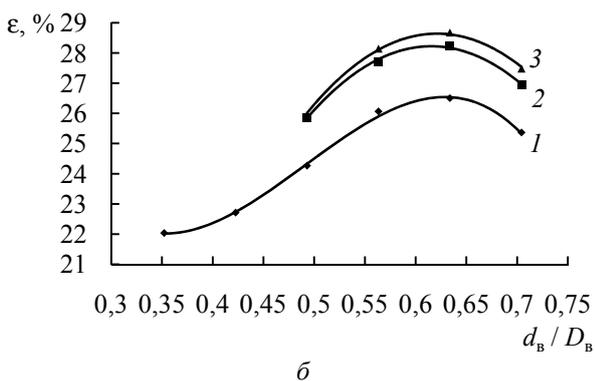
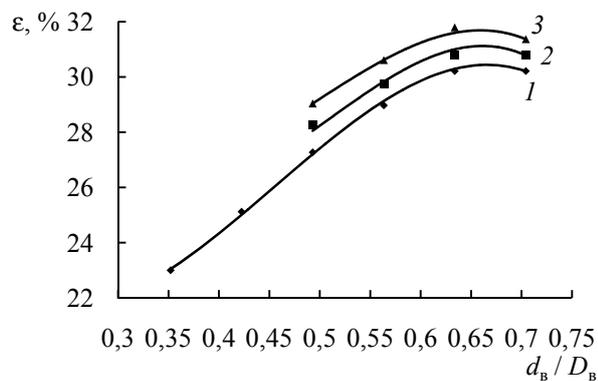


Рис. 5. Влияние диаметра сердечника d_b раскручивателя на коэффициент снижения сопротивления $\epsilon, \%$, циклонов ЦН-11 (а) и ЦН-15 (б) при различной высоте лопастей h_n/D_b : 1 – 1,06; 2 – 1,27; 3 – 1,48

Из данных зависимостей видно, что наибольшее снижение потерь давления в циклонах ЦН-11 и ЦН-15 достигается при $d_b = (0,62-0,7) \cdot D_b$ и $d_b = (0,55-0,65) \cdot D_b$ соответ-

ственно. При других условных скоростях газа кривые $\epsilon = f(d_b/D_b)$ подобны приведенным на рис. 5, причем отношение d_b/D_b , соответствующее максимальному значению ϵ , не вышло за пределы указанного диапазона. Выбор определенного значения диаметра сердечника из данного интервала может осуществляться с учетом конкретных условий проведения процесса. При очистке газов, содержащих большое количество мелкодисперсной пыли, а также при улавливании слипающейся пыли вследствие зарастания каналов для прохода газового потока предпочтительнее устанавливать раскручиватель с диаметром цилиндрической части ближе к нижнему пределу, что также способствует снижению его материалоемкости.

Первоначальные исследования по определению влияния числа и высоты лопастей раскручивающего устройства на гидравлическое сопротивление циклона проводились при относительном диаметре сердечника $d_b = 0,5 \cdot D_b$. Однако в результате последующих испытаний было установлено, что наибольший эффект в снижении потерь давления достигается при больших значениях диаметра. В связи с этим для уточнения числа и высоты лопастей был проведен ряд опытов с диаметром цилиндрической части раскручивателя $d_b = 0,63 \cdot D_b$ и $d_b = 0,56 \cdot D_b$ соответственно. Результаты исследований приведены на рис. 6.

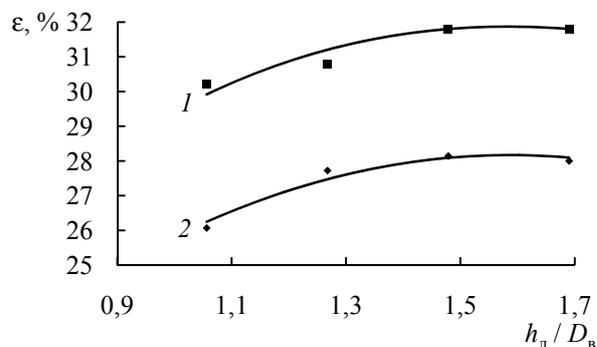
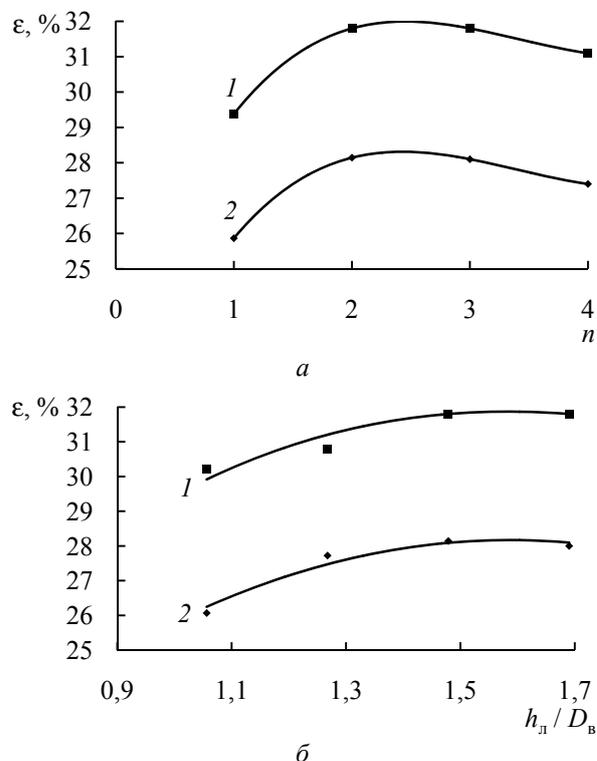


Рис. 6. Уточнение числа n (а) и высоты h_n (б) лопастей раскручивателя: 1 – ЦН-11; 2 – ЦН-15

Как и было получено ранее для диаметра сердечника $d_b = 0,5 \cdot D_b$, двух- и трехлопастные раскручивающие устройства показали практически одинаковые результаты (рис. 6, а). Увеличение высоты лопастей более $1,48 \cdot D_b$ (рис. 6, б) не приводит к дальнейшему снижению сопротивления циклонов.

Угол наклона передней кромки лопастей и высота конуса. Для безотрывного входа потока нижние края лопастей должны быть расположены под определенным углом к горизонтали, определяемым направлением скорости газового потока в выхлопной трубе. По данным аэродинамических исследований [8], данный угол для циклонов ЦН-11 и ЦН-15 составляет примерно 30° . Для изучения влияния угла наклона передней кромки лопастей на гидравлическое сопротивление циклонов была проведена серия опытов двухлопастного раскручивателя с диаметром сердечника $d_b = 0,56 \cdot D_b$ и высотой лопастей $h_l = 1,48 \cdot D_b$ при $l = D_b$, результаты которых приведены на рис. 7.

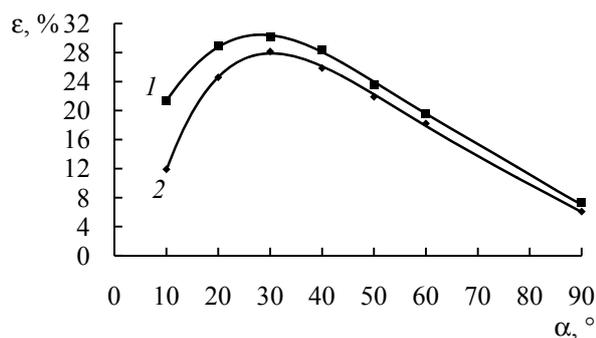


Рис. 7. Влияние угла наклона передней кромки лопастей α , °, раскручивателя на коэффициент снижения сопротивления циклонов ϵ , %:
1 – ЦН-11; 2 – ЦН-15

Можно заметить, что наибольшее снижение гидравлического сопротивления циклона ЦН-11 достигается при $\alpha \approx 29 \pm 2^\circ$, а ЦН-15 – при $\alpha \approx 31 \pm 2^\circ$. Уменьшение угла наклона передней кромки лопастей ниже указанных способствует дополнительному закручиванию газового потока и следовательно повышению потерь давления. При увеличении α происходит удар потока о переднюю поверхность лопасти, что также снижает величину ϵ . Для данных типов циклонов угол наклона передней кромки лопастей раскручивателя можно принять равным $\alpha = 30^\circ$.

Для выравнивания по сечению раскрученного газового потока, выходящего из кольцевого пространства между выхлопной трубой и цилиндрической частью раскручивателя, над сердечником установлен конус. Влияние высо-

ты последнего $h_{\text{кон}}$ на сопротивление циклона представлено на рис. 8, из которого видно, что при достижении $h_{\text{кон}} = 1,5 \cdot d_b$ сопротивление циклона остается практически постоянным.

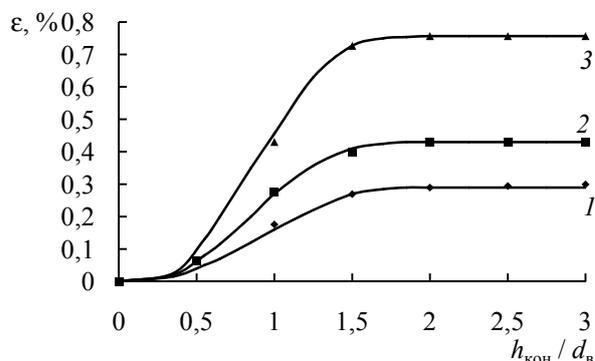


Рис. 8. Влияние высоты конуса $h_{\text{кон}}$ раскручивателя на коэффициент снижения сопротивления циклона ϵ , %, при различной скорости газа $w_{\text{ц}}$, м/с:
1 – 3; 2 – 3,5; 3 – 4

Также были проведены испытания раскручивателя с прикрепленными к нижнему основанию сердечника различными обтекателями (коническим с различным углом раскрытия и выполненным в виде кока). Однако результаты показали, что наличие нижнего обтекателя не оказывает никакого воздействия на сопротивление циклона, а только усложняет конструкцию устройства и увеличивает его материалоемкость.

Высота установки раскручивателя в выхлопной трубе. Раскручивающее устройство устанавливалось в различных положениях по высоте выхлопной трубы циклона (в качестве определяющего параметра использовалось расстояние l от нижнего среза выхлопной трубы до нижней кромки лопастей), как показано на рис. 1. При расположении нижнего края раскручивателя ниже входа в выхлопную трубу, отношение l/D_b принималось со знаком «–» ($l/D_b < 0$). В случае, когда верхний край устройства выходил за пределы выхлопного патрубка, над ним для заполнения потоком всего выходного сечения устанавливался дополнительный участок.

Результаты исследований, направленных на изучение влияния высоты установки раскручивателя на потери давления в циклоне при различных скоростях газа, приведены на рис. 9.

При опускании раскручивающего устройства в выхлопной трубе гидравлическое сопротивление циклона снижается, что связано с увеличением интенсивности крутки газового потока. Также можно отметить, что с увеличением скорости газа эффект снижения потерь давления несколько увеличивается. Для опре-

деления высоты установки раскручивателя необходимо проведение исследований влияния устройства на эффективность очистки.

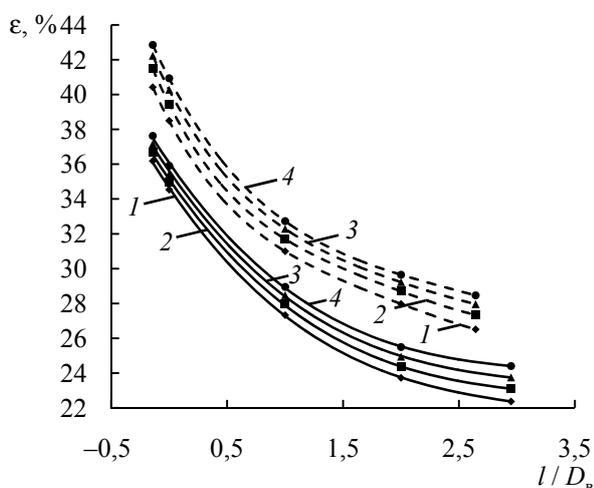


Рис. 9. Влияние высоты установки раскручивателя l на коэффициент снижения сопротивления ϵ , %, циклонов ЦН-11 (---) и ЦН-15 (—) при различной условной скорости газа $w_{ц}$, м/с:
1 – 2,5; 2 – 3; 3 – 3,5; 4 – 4

Эффективность очистки. Для определения высоты установки раскручивающего устройства в циклонах была проведена серия экспериментов на искусственно запыленном воздухе, целью которых являлась оценка влияния расположения раскручивателя в выхлопной трубе на эффективность очистки. Схема испытательного стенда приведена на рис. 10.

Расход воздуха, транспортируемого через установку радиальным вентилятором 1 , измерялся с помощью трубки Пито 2 и соединенного с ней микроманометра 3 , а его регулирование производилось путем изменения частоты вращения рабочего колеса вентилятора 1 при помощи частотного преобразователя 4 . Питатель 5 служил для подачи пыли в газопод. Концентрация пыли в очищенном воздухе на выходе из циклона 6 определялась с помощью промышленного цифрового стационарного прибора контроля массовой концентрации пыли «Sintrol-S304» 8 и регистратора S300 9 . В приборе «Sintrol-S304» 8 используется технология измерения запыленности посредством трибоэлектрического эффекта, при котором посредством столкновения частиц с сенсорным стержнем происходит динамическое взаимодействие между зарядом пылевых частиц и сенсором. Это взаимодействие индуцирует в стержне электрический сигнал, который фиксируется, распознается и обрабатывается при помощи электроники. Далее сигнал передается на регистра-

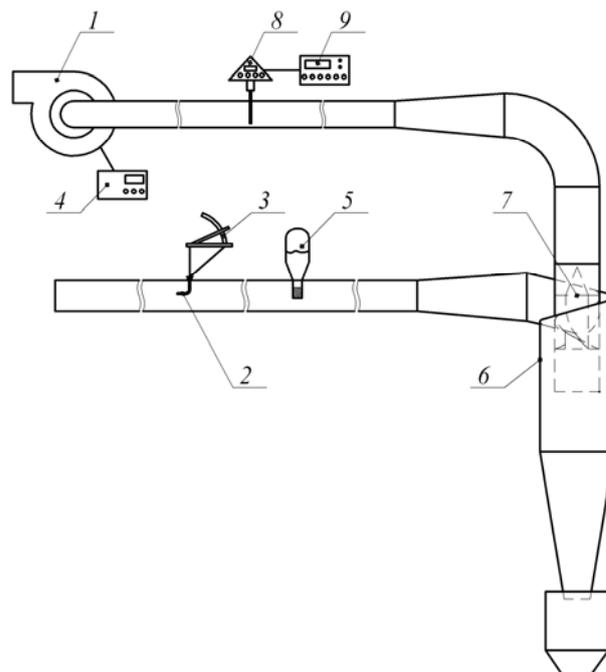


Рис. 10. Схема испытательного стенда для исследования степени очистки:

1 – вентилятор; 2 – трубка Пито; 3 – микроманометр; 4 – частотный преобразователь; 5 – питатель; 6 – циклон; 7 – раскручиватель; 8 – «Sintrol-S304»; 9 – регистратор S300

В качестве экспериментальной пыли использовались пшеничная мука высшего сорта марки М 54–28 по СТБ 1666–2006 и молотый керамический кирпич (СТБ 1160–99). Дисперсный состав мучной пыли определялся по результатам микроскопического анализа [9, 10], проведенного с помощью сканирующего электронного микроскопа JSM-5610 LV (Япония). Размер частиц молотого кирпича определялся методом лазерной дифракции с помощью лазерного анализатора размеров частиц Analyzette 22 MicroTec Fritsch GmbH (Германия). Данный прибор использует физический принцип рассеивания электромагнитных волн для определения распределения размера частиц.

Медианный диаметр частиц муки был равен $\delta_{50} = 29 \pm 1$ мкм, а молотого керамического кирпича – $\delta_{50} = 15,6 \pm 0,1$ мкм.

Начальная концентрация пыли в воздухе, поступающем в испытуемый циклон, была принята для всех опытов равной $c_{вх} = 3$ г/м³. Продолжительность каждого опыта составляла $\tau_{оп} = 300$ с. Количество подаваемой пыли $G_{п}$, г, необходимой для одного опыта, вычислялось по формуле

$$G_{п} = Q \cdot c_{вх} \cdot \tau_{оп}.$$

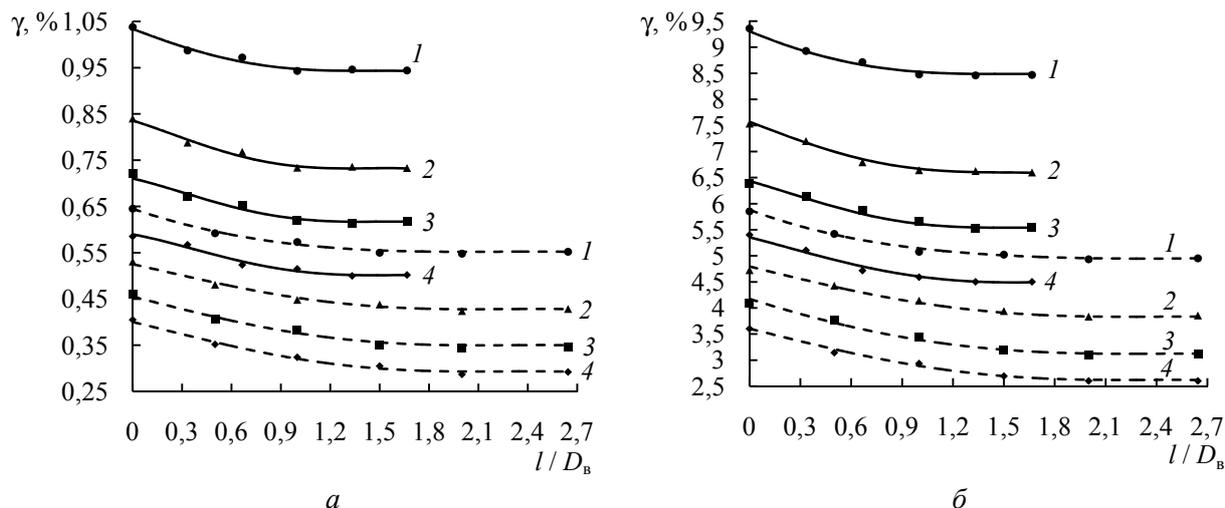


Рис. 11. Влияние высоты установки раскручивателя на коэффициент уноса частиц муки (а) и молотого керамического кирпича (б) в циклонах ЦН-11 (---) и ЦН-15 (—) при различной скорости газа $w_{г}$, м/с:
1 – 2,5; 2 – 3; 3 – 3,5; 4 – 4

Для получения достоверных результатов в соответствии с разработанной П. А. Коузовым «Единой методикой» на каждом скоростном режиме проводилось три опыта [11]. При наличии расхождений более 5% опыты повторялись.

Коэффициент очистки η , %, определялся с помощью зависимости

$$\eta = 100 \cdot (1 - c_{\text{вых}} / c_{\text{вх}}),$$

где $c_{\text{вых}}$ – объемная концентрация пыли в очищенном воздухе, определяемая по показаниям регистратора S300, г/м³.

Результаты исследований представлены на рис. 11 в виде графических зависимостей влияния высоты установки раскручивателя при различных скоростях газового потока на коэффициент уноса (проскока) γ , %, который связан с коэффициентом очистки следующим образом:

$$\gamma = 100 - \eta.$$

Из рис. 11 видно, что с увеличением скорости газа унос пыли в циклоне уменьшается. При опускании раскручивающего устройства ниже определенного положения коэффициент проскока возрастает, что можно объяснить раскруткой газового потока не только в выхлопной трубе, но и в основной сепарационной зоне циклона. Это положение соответствует высоте установки раскручивателя $l = 1,9 \cdot D_{\text{в}}$ для циклонов ЦН-11 и $l = 1,3 \cdot D_{\text{в}}$ для ЦН-15. При таком расположении раскручивающего устройства гидравлическое сопротивление аппаратов ЦН-11 и ЦН-15 снижается соответственно на 28–30% и 26–27,5% (рис. 9), а степень очистки остается на прежнем уровне.

Проанализировав вышеприведенные результаты экспериментальных исследований,

можно сделать заключение, что оптимальным с точки зрения снижения гидравлического сопротивления циклона является раскручиватель со следующими параметрами, приведенными в таблице.

Оптимальные параметры лопастного раскручивателя

Основные параметры раскручивателя	Оптимальное значение	
	ЦН-11	ЦН-15
Диаметр сердечника $d_{\text{в}}$	$(0,62-0,7) \cdot D_{\text{в}}$	$(0,55-0,65) \cdot D_{\text{в}}$
Число лопастей n	2	
Высота лопастей $h_{\text{л}}$	$1,48 \cdot D_{\text{в}}$	
Угол входа лопастей α	$29 \pm 2^\circ$	$31 \pm 2^\circ$
Высота конуса $h_{\text{кон}}$	$1,5 \cdot d_{\text{в}}$	
Высота установки в выхлопной трубе l	$1,9 \cdot D_{\text{в}}$	$1,3 \cdot D_{\text{в}}$

Заключение. Разработанное раскручивающее устройство по сравнению с существующими конструкциями раскручивателей (коническим лопастным, винто-лопастным и др.) дает больший эффект в снижении сопротивления циклонов ЦН-11 и ЦН-15 при сохранении степени очистки.

Литература

1. Ершов, А. И. Новые конструкции сепараторов для очистки промышленных газов / А. И. Ершов, И. М. Плехов, А. И. Бершевиц // Новые химические материалы: обзорная информация. – Минск: БелНИИТИ, 1973. – 36 с.
2. Газоочистное оборудование: каталог / сост.: Н. М. Васильченко [и др.]. – М.: ЦИНТИ-химнефтемаш, 1988. – 120 с.

3. Ладыгичев, М. Г. Зарубежное и отечественное оборудование для очистки газов: справочник / М. Г. Ладыгичев, Г. Я. Бернер. – М.: Теплотехник, 2004. – 694 с.

4. Швыдкий, В. С. Очистка газов: справочник / В. С. Швыдкий, М. Г. Ладыгичев. – М.: Теплоэнергетик, 2002. – 640 с.

5. Первов, А. А. Исследование устройств для снижения сопротивления циклонов / А. А. Первов // Обеспыливающие устройства промышленной вентиляции: материалы семинара, МДНТП, Москва, 14–15 сентября 1970 г. – С. 101–105.

6. Кирпичев, Е. Ф. Усовершенствование одиночных и батарейных циклонов и создание золоуловителей с прямоточными циклонными элементами / Е. Ф. Кирпичев // Очистка дымовых газов электростанций от золы: сборник / под ред. С. М. Шухера. – М.: БТИ ОРГРЭС, 1962. – С. 100–111.

7. Идельчик, И. Е. Гидравлическое сопротивление циклонов, его определение, величина

и пути снижения / И. Е. Идельчик // Механическая очистка промышленных газов / НИИОГАЗ; под ред. Б. Ф. Подошевникова. – М.: Машиностроение, 1974. – С. 135–159.

8. Первов, А. А. Экспериментальное исследование аэродинамики циклонов и разработка устройств для снижения их гидравлического сопротивления: дис. ... канд. техн. наук: 05.04.01 / А. А. Первов. – М., 1973. – 175 с.

9. Коузов, П. А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов / П. А. Коузов. – 3-е изд., перераб. – Л.: Химия, 1987. – 264 с.

10. Градус, Л. Я. Руководство по дисперсному анализу методом микроскопии / Л. Я. Градус. – М.: Химия, 1979. – 232 с.

11. Коузов, П. А. Единая методика сравнительных испытаний пылеуловителей для очистки аспирационного воздуха / П. А. Коузов, Г. А. Иофинов. – Л.: ВНИИОТ, 1967. – 101 с.

Поступила 28.02.2011