Записки Ленинградского орденов Ленина и Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова, т. LV, вып. 1, 1968 г.

УДК 621.928.9

ИЗЫСКАНИЕ ПУТЕЙ УВЕЛИЧЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРЯМОТОЧНЫХ ЦИКЛОНОВ

Ю. В. Гуль

Применение циклонов — одно из основных направлений в решении проблемы оздоровления атмосферы на рабочих местах бурильщиков. Пылеотделение в этих аппаратах происходит за счет центробежной силы, которую получают частицы пыли при подаче потока воздуха с большой скоростью по касательной в цилиндрический кожух циклона.

Существует много конструкций циклонов, успешно применяющихся в различных отраслях промышленности. В большинстве из них запыленный воздух подводится в верхнюю часть циклона, откуда по спирали опускается до дна конической части, а затем, продолжая спиральное движение, поднимается вдоль оси и выходит за пределы циклона через выхлопную трубу. Выделение пыли происходит при движении потока вниз. Осажденная пыль удаляется через отверстие в нижней части циклона. Разнообразие конструктивных форм свидетельствует о недостаточной изученности механизма циклонной сепарации.

Существующие расчеты обеспыливания в циклонах основаны на принципе приравнивания центробежной силы, действующей на частицу пыли, при ее движении вместе с газовым потоком к силе сопротивления несущей среды относительному движению частицы.

Наименьший диаметр осаждаемых частиц, отделяемых в циклоне, определяется приравниванием времени, необходимого для движения частицы пыли от стенки выхлопной трубы к стенке циклона, к времени прохождения потока цилиндрической части циклона. Считают, что частица пыли, снесенная потоком к внешней стенке, является уловленной, откуда она падает в пылеотводящее отверстие.

Однако экспериментальная проверка не подтверждает соответствия действительности теоретическим расчетам. Оказывается, что для осаждения пыль должна пройти расстояние, в 2—3 раза превышающее расчетное [Батурин, 1950].

Исследователи отмечают также [Пирумов, 1961], что эффективность работы циклонов настолько ниже расчетной, что пользование расчетными формулами возможно лишь для качественной оценки интенсивности сепарационного процесса.

Одним из главных недостатков существующих конструкций циклонов является отсутствие резкой границы между нисходящим и восходящим потоками. В процессе работы циклона образуются вторичные токи (радиальный сток) [Пирумов, 1961], направленные по всей высоте аппарата от внешнего потока к внутреннему. Это загрязняет выходящий поток. В. Барт (1956) предложил учитывать радиальный сток, вводя второе необходимое условие сепарации частиц, т. е. равенства центробежной силы частицы, находящейся на границе осевого потока, увлекающей силе радиального стока

$$m \frac{w_в^2}{R_в} = 6\pi r \mu w_R,$$

где m — масса частицы, *кг·сек²/м*; r — радиус частицы, *м*; μ — коэффициент вязкости, *кг·сек/м²*; $R_в$ — радиус восходящего вихревого потока, *м*; $w_в$ — скорость потока на наружной части восходящего потока, *м/сек*.

Влияние этого течения может быть в значительной степени ослаблено глубиной погружения выхлопной трубы, что подтверждается конструкцией циклона ЛИОТ [Коузов, 1938], где выхлопная труба смягчает влияние радиального стока, создавая благоприятные условия для выделения аэрозольных частиц к наружной стенке циклона.

В промышленной практике используются циклоны (их называют прямоточными), конструкция которых не предусматривает контакта очищенного и неочищенного потока, что казалось бы должно положительно сказываться на эффективности их работы. По сравнению с другими типами циклонов прямоточные имеют минимальное аэродинамическое сопротивление и высокую производительность при малых габаритных размерах. Однако основным недостатком таких циклонов является их низкая эффективность, составляющая всего 65—75%. Поэтому применяются они при очистке значительных количеств газа, несущего крупные пылевые частицы.

Отсутствие удовлетворительной теории сепарации в циклонах затрудняет объяснение ряда явлений, наблюдаемых при их испытаниях, в частности, причину низкой эффективности прямоточных циклонов.

В настоящей работе излагаются результаты исследований некоторых явлений аэродинамики движущегося газа в циклонах, которые играют важную роль в процессе пылеотделения.

Прежде всего необходимо отметить, что движение каждой частицы газа происходит под влиянием нескольких сил: 1) инерционные силы F_1, возникающие при входе частиц в циклон через входной патрубок (на каждом из участков движения их уровень находится в соответствии со значением окружной скорости потока w); 2) силы, порождаемые поперечным и продольным градиентом давления

$$F_2 = \frac{dp}{dR} = \rho \frac{w^2}{R},$$

$$F_3 = \frac{dp}{dH},$$

где p — давление воздуха, *кГ/м²*; ρ — плотность воздуха, *кг·сек²/м⁴*; H — высота аппарата, *м*.

Равнодействующая этих сил $\overline{F} = \overline{F}_1 + \overline{F}_2 + \overline{F}_3$ и определяет движение газа в циклоне.

Необходимым условием равновесия между отдельными концентрическими слоями газового потока в циклоне является равенство

$$\frac{dp}{dR} = \rho \frac{w^2}{R}.$$

Известно, что полная окружная скорость частицы газа $w = \frac{C}{R}$ ($C =$ = const, характеризует напряжение циркуляции), т. е. изменяется обратно пропорционально расстоянию частицы до оси вращения, являясь касательной к радиусу-вектору. На самой оси вращения при $R = 0$, $w \to \infty$, почему ось является особой линией течения; вне оси окружные скорости везде конечны и однозначны.

Так как окружные скорости частиц различны для различных расстояний их от центра вращения, то и угловые скорости их будут также различны, т. е.

$$\omega = \frac{w}{R} = \frac{C}{R^2}.$$

Для различных R угловая скорость ω изменяется пропорционально квадрату расстояния. Частицы, различно удаленные от оси вращения, вра-

щаются с различными угловыми скоростями и потому смещаются друг относительно друга. Подобное вращение в отличие от статического называют динамическим.

Если вычислим интеграл произведения окружной скорости w какой-либо частицы на путь s, проходимый ею при изменении угла поворота α от 0 до 2π, получим

$$\int_0^{2\pi} w ds = \int_0^{2\pi} wR d\alpha = 2\pi wR = 2\pi C.$$

Эту величину в технике и называют циркуляцией $\Gamma = 2\pi C$. Данное выражение показывает, что Γ постоянно для всего течения жидкости при данном C. Величину $C = \frac{\Gamma}{2\pi}$ называют напряжением или интенсивностью циркуляции.

Величина постоянной C обусловливает величину окружной скорости w вращения частиц на одном и том же расстоянии R от оси О. Графически выражение $C = wR$ в координатах w и R представляется равнобокой гиперболой.

Различие скоростей движения воздуха в зависимости от радиуса вызывает большие касательные напряжения трения. Известно, что при ламинарном течении воздуха величина касательного напряжения трения определяется по формуле Ньютона

$$\tau = \mu \frac{dw}{dn},$$

где μ — коэффициент абсолютной вязкости, *кг·сек/м²*; n — нормаль к направлению течения воздуха.

Хотя структура потоков в циклонных аппаратах окончательно еще не исследована, есть все основания полагать, что они являются турбулентными и степень турбулентности зависит не только от числа Re, подсчитанного для чистого воздуха, но и от концентрации аэрозолей [Пирумов, 1961].

В связи с этим кроме рассмотренного касательного напряжения трения возникает еще так называемое кажущееся напряжение трения, которое обусловливается поперечным движением частиц газа. Поэтому полное касательное напряжение трения при турбулентности определится по формуле [Талиев, 1954]

$$\tau = \mu \frac{dw}{dR} + \rho l^2 \left(\frac{dw}{dR}\right)^2,$$

где l — длина пути перемешивания, пропорциональная среднему свободному движению частиц поперек потока воздуха, *м*.

Обычно длину перемешивания в какой-либо точке принимают прямо пропорциональной удалению этой точки до стенки канала.

Указанную формулу можно упростить, обозначив $\rho l^2 = \frac{dw}{dR}$ через $\mu_т$ и назвав его коэффициентом турбулентной или виртуальной вязкости

$$\tau = (\mu + \mu_т) \frac{dw}{dR}.$$

Вязкость и порожденные ею силы вязкости стремятся прекратить всякое движение жидкости, подобно трению между твердыми телами. Поэтому в циклонном аппарате влияние вязкости в первую очередь должно отражаться на уровне кинетической энергии потока, что интенсивно снижает скорость вдоль линии токов.

Точно определить длину пути потока в циклоне трудно. Обычно рассчитывают ее из условия одного-трех оборотов потока. Поэтому работу сил вязкости удобнее считать по высоте циклона.

Анализируя отмеченные выше особенности аэродинамики в циклонном аппарате, приходим к выводу, что элементарная работа сил вязкости равна элементарному уменьшению запаса кинетической энергии E и должна соответствовать напряжению циркуляции C и силам вязкости среды τ.

$$\frac{dE}{dH} = \tau C.$$

С падением кинетической энергии потока снижаются центробежные силы. Нарушение равновесия $\frac{dp}{dR} = \rho \frac{w^2}{R}$ в концентрических слоях должно разрешиться перетеканием газа от внешних слоев к внутренним. Поэтому процесс должен сопровождаться непрерывным падением поперечного градиента давления в потоке, что подтверждается экспериментально при исследовании модели циклона в лабораторных условиях (рис. 1).

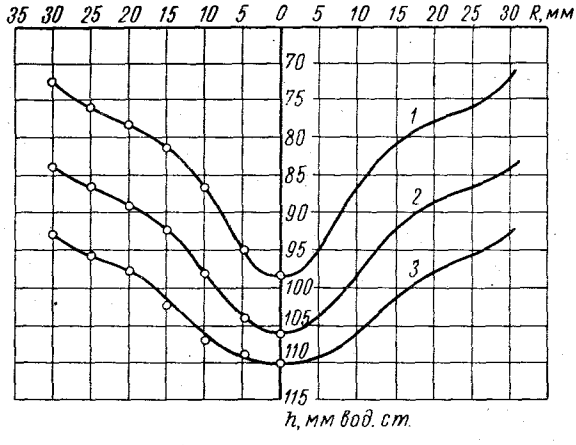


Рис. 1. Распределение статического давления в различных сечениях циклона на расстоянии от входа:
1 — 30; *2* — 50; *3* — 70 *мм*; h — разрежение.

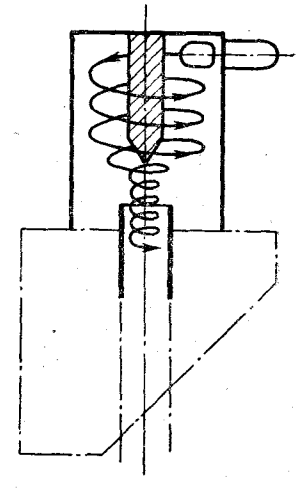


Рис. 2. Схема прямоточного циклона с центральным стержнем.

Перетекание газа в направлении оси аппарата вовлекает в движение неуспевшие выделиться пылевые частицы, что является одним из главных обстоятельств, снижающих эффективность циклонов. В прямоточном циклоне на газовый поток и частицы в нем действуют силы, аналогичные силам, наблюдающимся в обычном циклоне. Однако отсутствие выхлопной трубы в центре аппарата, а также обратного потока при высоких окружных скоростях должно вызывать весьма значительное разрежение вдоль оси. Поэтому поперечный градиент давления, а следовательно, и интенсивность перетекания газа от внешних слоев к внутренним в прямоточном циклоне должны быть выше, чем в обычных конструкциях.

Для повышения эффективности пылеотделителя вдоль оси прямоточного циклона располагается стержень (рис. 2), назначением которого является заполнение зоны низких давлений. Это обстоятельство, а также тормозящее влияние поверхности стержня вызывают перераспределение скоростей и давлений в потоке газа (рис. 3).

Экспериментальные исследования данной конструкции циклона проводились одновременно с испытаниями прямоточного циклона обычной конструкции.

Площади, располагающиеся под кривыми скоростей потока двух моделей циклонов (рис. 3, *а*) свидетельствуют об интенсивности работы сил вязкости в замеряемом сечении. (Замеры проводились в точках, равноотстоящих от входа.) Как видно, прямоточный циклон, снабженный центральным стержнем, более экономичен в удельной затрате энергии, что подтверждается

также замерами аэродинамического сопротивления Δh в обоих конструкциях при различном расходе воздуха Q (рис. 4). Из этого следует вывод, что падение кинетической энергии в прямоточном циклоне с центральным стержнем происходит менее интенсивно и процесс пылеотделения в нем, вследствие снижения интенсивности радиальных стоков, более устойчив.

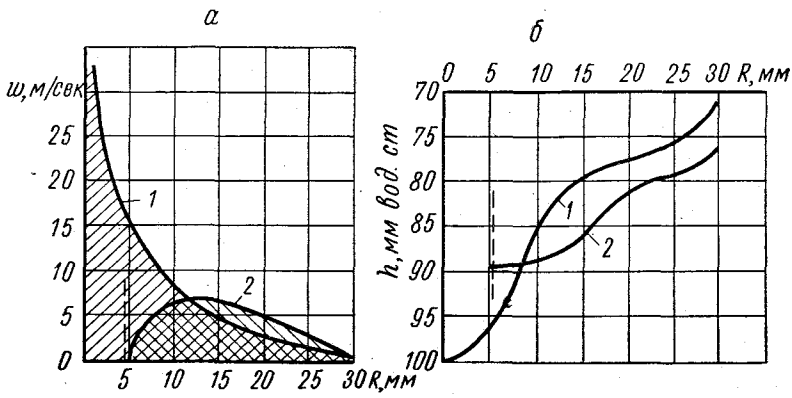


Рис. 3. Распределение скоростей (*а*) и давлений воздуха (*б*) в прямоточных циклонах:

1 — обычного типа; *2* — с центральным стержнем.

Для исследования эффективности работы циклона принята существующая методика [Коузов, 1938], которая предусматривает предварительное запыление входящего в циклон воздуха путем равномерной подачи заранее взвешенной порции пыли с помощью питателя. Начальная концентрация пыли принималась около 5000—6000 *мг/м*^{3}, что наиболее близко к средней величине концентрации в практике обеспыливания в горном деле вблизи от источников пылевыделения. В испытаниях использовалась колчеданная и угольная пыль крупностью 0—200 μ. Опыты продолжались 3—10 *мин*. Осажденная пыль в бункере циклона взвешивалась с точностью до 1 *мг* и степень очистки определялась как

$$\varepsilon = \frac{P_2}{P_1} 100\%,$$

где P_1, P_2 — вес пыли соответственно в первоначальной навеске и осажденной, *кг*.

При исследовании эффективности работы циклонов проводилось по пятнадцати опытов с каждой конструкцией.

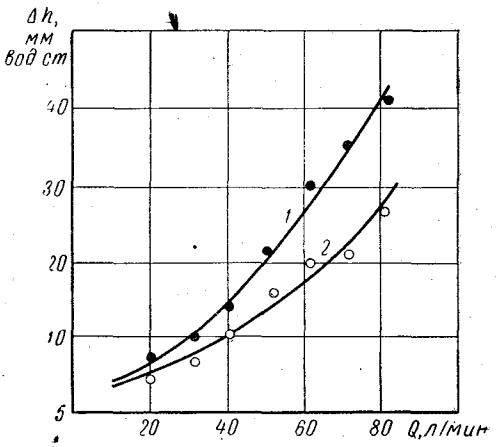


Рис. 4. Сопротивление прямоточных циклонов:

1 — обычного типа; *2* — с центральным стержнем.

Испытания показали высокую эффективность прямоточного циклона с центральным стержнем (98—99,5%). Одновременно испытывавшийся прямоточный циклон без центрального стержня имел эффективность 86—92%.

Исследованиями установлено, что наиболее эффективные результаты в работе циклона наблюдаются при длине камеры осаждения $2D$ (D — диаметр корпуса циклона, *м*), длине центрального стержня $1{,}6\,D$ с диаметром $0{,}4$—$0{,}5\,D$. Исследования проводились на уменьшенной модели. При переходе

к реальным условиям расчет конструкции и режима работы циклона производится с использованием критериев Стокса и Фруда [Коузов, 1938], лежащих в основе моделирования циклонов.

Выводы

1. Основным недостатком существующих конструкций циклонов является отсутствие резкой границы между нисходящим и восходящим потоками.

2. Исследована причина возникновения вторичных токов, снижающих эффективность работы циклонов.

3. Разработана конструкция прямоточного циклона с центральным стержнем, снижающим интенсивность радиального стока.

4. Исследованиями установлены оптимальные параметры предложенной конструкции прямоточных циклонов.

5. Испытания показали высокую эффективность пылеулавливания разработанной конструкции циклона (98—99,5%).

ЛИТЕРАТУРА

Батурин В. В. Основы промышленной вентиляции. Профиздат, 1950.

Коузов П. А. Очистка воздуха от пыли в циклонах. Лен. ин-т охр. тр., 1938.

Пирумов А. И. Аэродинамические основы инерционной сепарации. Госстройиздат, 1961.

Талиев Н. А. Аэродинамика вентиляции. Госстройиздат, 1954.