

УДК 532.527

В. С. ЖЕРНАКОВ, Р. Р. УСМАНОВА

ОБОБЩЕНИЕ ЗАВИСИМОСТЕЙ МЕЖДУ РЕЖИМНО-КОНСТРУКТИВНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ, СТРУКТУРОЙ ПОТОКОВ И ИНТЕГРАЛЬНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ВИХРЕВОГО АППАРАТА

Разработан метод расчета, позволяющий определить оптимальные режимные параметры и конструктивные размеры барботажно-вихревого аппарата. Критерием оптимизации является минимальная стоимость очистки газа при обеспечении наибольшей эффективности пылеулавливания. *Пыль; очистка; эффективность очистки; гидравлическое сопротивление; лопасти; закрутка; стоимость очистки*

Проблема очистки газовых выбросов от мелкодисперсной примеси является одной из актуальных в газоочистке и давно выдвинута на первый план экспериментальных и теоретических исследований.

Одним из наиболее перспективных методов повышения эффективности пылеулавливания мелкодисперсных частиц является мокрая очистка. Для этого метода характерны сложные массообменные процессы в ходе взаимодействия газодисперсного потока с каплями орошающей жидкости, в результате чего изменяются скорость и концентрация фаз, определяющие газоочистку.

Имеющиеся исследования в данной области показывают сильную чувствительность выходных характеристик к режиму и конструкции аппарата, что свидетельствует о качественно различной гидродинамике потоков при разных значениях режимно-конструктивных параметров.

Таким образом, систематизированное рассмотрение гидродинамики и эффективности работы вихревых аппаратов, получение и обобщение зависимостей между режимно-конструктивными параметрами аппарата, создание эффективных и технологичных конструкций и освоение их серийного выпуска для широкого внедрения в промышленную практику является актуальной задачей.

1. РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ БАРБОТАЖНО-ВИХРЕВОГО АППАРАТА С РЕГУЛИРУЕМЫМИ ЛОПАСТЯМИ

Для оптимизации барботажно-вихревого аппарата были проведены экспериментальные

исследования. Эксперименты проводились по единой методике [2] сравнительных испытаний пылеуловителей на барботажно-вихревом аппарате с цилиндрической камерой длиной 0,6 м и диаметром 0,2 и 0,4 м.

Барботажно-вихревой аппарат с регулируемыми лопастями (рис. 1) содержит цилиндрическую камеру 6 с входной трубой 4. В цилиндрической камере 6 установлен завихритель 5 газового потока, представляющий собой четыре лопасти, изогнутые по синусоидальной кривой. Регулировка положения лопастей осуществляется путем поворота эксцентриков, скрепленных с цилиндрической камерой 6 посредством пружинных шайб и контргайек [1].

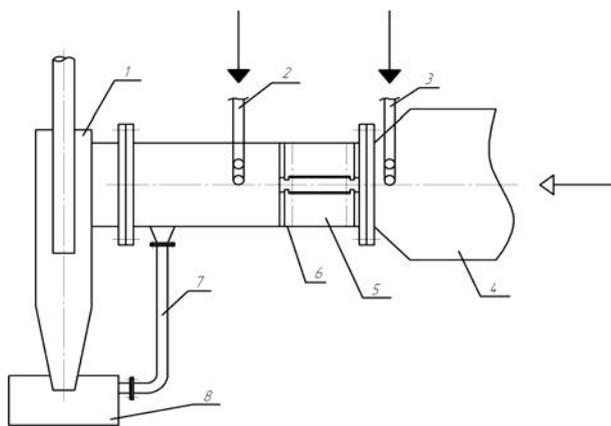


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – цилиндрическая камера; 2 – входная труба; 3 – завихритель; 4 – центральная форсунка; 5 – периферийные форсунки; 6 – труба перетока шлама; 7 – шламособорник; 8 – циклон

Барботажно-вихревой аппарат с регулируемыми лопастями работает следующим образом:

Перед завихрителем газового потока установлена центральная форсунка 3, а после завихрителя расположены периферийные форсунки 2, в которые подается орошающая жидкость. Отвод дисперсных частиц осуществляется по трубе перетока шлама 7 в шламоборник 8.

Запыленный газ подается в цилиндрическую камеру 6, где завихритель 5 при помощи лопастей, закрепленных в радиальных пазах стержня, отклоняет поток и придает ему вращательное движение. Под действием возникающей при этом центробежной силы дисперсные частицы перемещаются к стенкам аппарата. Для регулирования положения лопастей на входе и выходе каждой лопасти 5 предусмотрены два выступа, посредством которых лопасть находится в контакте с парой эксцентриков. Эксцентриками осуществляется поворот лопастей на входном и выходном участках цилиндрической камеры 6 в различных направлениях, благодаря чему лопасти 5 устанавливаются в положение, соответствующее наибольшей эффективности пылеулавливания.

2. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОЧИСТКИ ВОЗДУХА

Исследования проводились на барботажно-вихревом аппарате с цилиндрической камерой диаметром 0,2 и 0,4 м. В качестве модельной системы были исследованы воздух и порошок талька с размером частиц $d = 2 \div 30$ мкм.

При этом определялась общая и фракционная эффективность очистки. Исследовалось влияние на показатель эффективности очистки режимных параметров, в качестве которых служили общий расход воздуха через барботажно-вихревой аппарат, расход воды, коэффициент закрутки K .

Установлено, что с увеличением расхода воздуха происходит возрастание коэффициента очистки (рис. 2).

Определены оптимальные с энергетической точки зрения границы пропускной способности аппарата: нижний предел соответствует условной скорости в сечении – 5 м/с, максимальный расход ограничен скоростью 15 м/с. При работе барботажно-вихревого аппарата ниже минимальной скорости происходит снижение степени очистки, выше максимальной – резкий рост гидравлического сопротивления.

Установлено также влияние коэффициента закрутки завихрителя K на величину эффективности пылеулавливания: с ростом K степень очистки возрастает. Определен диапазон величин K , при котором обеспечивается относи-

тельно высокая эффективность улавливания частиц ($K_{\min} = 5$, $K_{\max} = 8$). При $K = 1$ наблюдается значительное снижение эффективности очистки, при $K > 10$ эффективность остается практически на постоянном уровне, но потери давления в аппарате существенно возрастают. Исследовано влияние диаметра аппарата на эффективность очистки: с увеличением диаметра эффективность улавливания снижается, причем чем меньше медианный диаметр частиц, тем больше величина падения эффективности очистки.

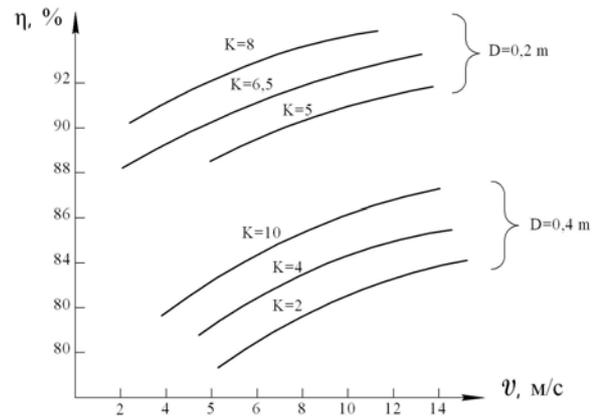


Рис. 2. Зависимость эффективности пылеулавливания от скорости газового потока (пыль: порошок талька, $d_m = 10$ мкм; $\sigma = 3,64$; $\rho_n = 2650$ кг/м³; $z = 5$ г/м³)

Проведен критический анализ существующих методов расчета эффективности улавливания центробежными пылеуловителями.

В области конструирования вихревых аппаратов не существует единой методики. Отсутствуют строго обоснованные универсальные рекомендации по рациональному выбору геометрических параметров вихревых аппаратов.

Предлагается методика расчета, единая с методикой расчета циклонов [3], по которой общая и фракционная эффективность пылеулавливания может быть определена аналитически:

$$\eta = 50 \cdot [1 + \Phi(x')], \quad (1)$$

$$\text{где } x' = \frac{\lg \left[\frac{d'_{50}}{d_{50} \cdot k \cdot 10^3 \cdot \sqrt{D \cdot \frac{\mu_r}{\rho_r} \cdot \vartheta_r}} \right]}{\sqrt{\sigma^2 + \lg^2 \left(\frac{d_{50}}{d_{16}} \right)}}$$

$$\eta_\phi = \frac{1}{2} \cdot [1 + \phi(x)],$$

$$x = \frac{\lg \left[\frac{d_u}{d_u \cdot k \cdot 10^3 \cdot \sqrt{D \cdot \frac{\mu_\Gamma}{\rho_\Gamma} \cdot \vartheta_\Gamma}} \right]}{\sigma}$$

При предварительных расчетах общий коэффициент очистки может быть определен графическим методом (рис. 3).

C является функцией только геометрических параметров аппарата и может быть рассчитана для проектируемых аппаратов по известной методике [4].

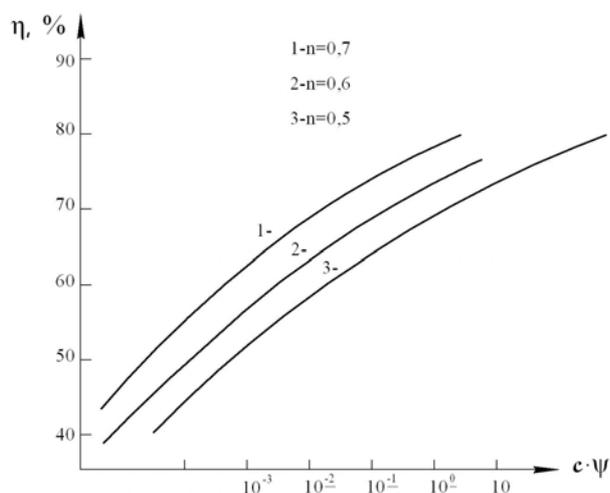


Рис. 3. Эффективность очистки газов в зависимости от произведения параметров $c \cdot \psi$

ψ – модифицированный инерционный параметр, характеризующий состояние пылегазовой смеси.

$$\psi = \frac{d_u^2 \cdot \rho_\Gamma \cdot \vartheta_\Gamma}{18 \cdot \mu_\Gamma \cdot D} \cdot (n+1).$$

Коэффициент n определяется по формуле

$$n = 1 - \left(1 - 0,0165 \cdot D^{0,15} \right) \cdot \left(\frac{T_\Gamma}{283} \right)^{0,3},$$

где T_Γ – абсолютная температура газа, К.

3. ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Исследовались потери давления в барботажно-вихревом аппарате в зависимости от его режимно-конструктивных параметров.

Установлено, что наиболее эффективным и экономичным является режим работы при $K = 5-8$ [5].

Предложена методика расчета потери давления и удельных энергозатрат на пылеулавливание, которые определяются по формулам

$$\Delta P = \xi \cdot \frac{\rho_\Gamma \cdot \vartheta^2}{2}, \text{ Па,}$$

$$E = \frac{\Delta P}{3600}, \text{ кВт} \cdot \text{ч} / 1000 \text{ м}^3.$$

Экспериментально установлена зависимость коэффициента гидравлического сопротивления от режимных и конструктивных параметров аппарата, которая складывается из коэффициента гидравлического сопротивления «сухого» аппарата

$$\xi_{\text{сух}} = \frac{1}{n} \left(\left(\frac{R}{r} \right)^{2n} - 1 \right) + \frac{1}{k^2} \cdot \left(\frac{\vartheta_2}{\vartheta_1} \right)^2,$$

и потерь напора на транспорт жидкости

$$\xi_{\text{ТР}} = 4 \cdot \left(\frac{L}{G} \right)^{0,6} \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{k^2}}.$$

Окончательная зависимость для расчета орошаемого барботажно-вихревого аппарата

$$\xi_{\text{оп}} = \frac{1}{n} \left(\left(\frac{R}{r} \right)^{2n} - 1 \right) + \frac{\varepsilon^2}{K^2} \left(1 + \frac{\rho^*}{\rho_\Gamma} \right) \times \left(\frac{\vartheta_2}{\vartheta_1} \right)^2 + 4 \left(\frac{L}{G} \right)^{0,6} \sqrt{1 + \frac{1}{K^2}}. \quad (2)$$

Полученная формула учитывает наличие дисперсной фазы и частичную потерю закрутки потока. Учет потерь на транспорт жидкости выполнен путем формального применения принципа аддитивности ξ .

Интенсивность закручивания газового потока оценивалась геометрическим коэффициентом закрутки K_Γ

$$K_\Gamma = \frac{32}{\pi^2} \cdot \frac{\vartheta_\phi}{\vartheta_x} \cdot \frac{l}{D}.$$

Поскольку значение K_Γ не совпадает с истинным коэффициентом закрутки, то принимается следующее соотношение

$$K = 1,4 \cdot K_\Gamma^{0,72}.$$

Результаты опытов представлялись графическими зависимостями гидравлического сопротивления от режимно-конструктивных параметров (рис. 4, 5).

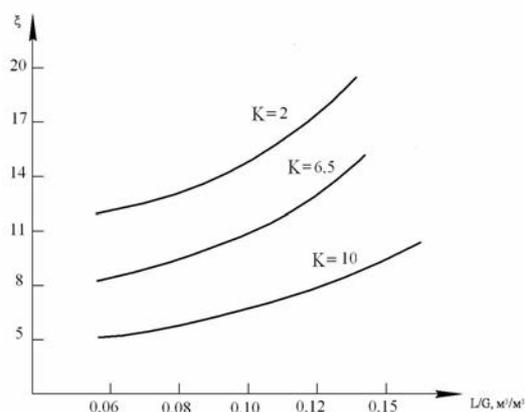


Рис. 4. Зависимость ξ от удельного орошения аппарата

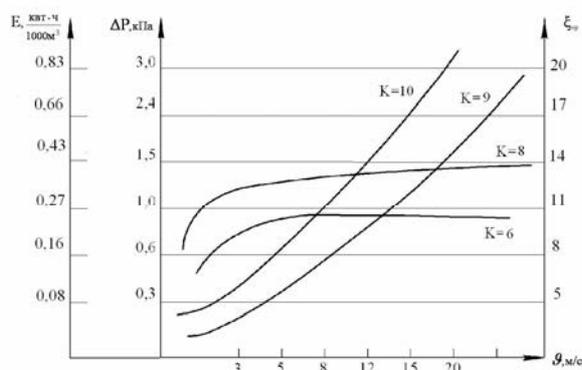


Рис. 5. Зависимость энергозатрат на пылеулавливание и гидравлического сопротивления от скорости газа в аппарате

4. РАСЧЕТ СТОИМОСТИ ПЫЛЕУЛАВЛИВАНИЯ

С помощью полученных ранее соотношений, связывающих эффективность пылеулавливания и гидравлическое сопротивление с режимно-конструктивными параметрами барботажно-вихревого аппарата, разработана методика расчета, позволяющая выбрать аппарат с такими режимными и конструктивными параметрами, при которых он бы обеспечивал требуемые технологические параметры при минимальной стоимости очистки.

Основными компонентами стоимости очистки являются стоимость пыли, неуловленной барботажно-вихревым аппаратом (C_n), и стоимость энергозатрат на протягивание через аппарат газового потока (C_3).

Стоимость очистки определяется по формуле:

$$C_0 = C_n + C_3.$$

Стоимость неуловленной пыли C_n уменьшается с ростом эффективности работы аппарата η , с уменьшением начальной концентрации пы-

ли z_1 , и с уменьшением стоимости уловленной пыли C_y :

$$C_n = (1 - \eta) \cdot z_1 \cdot C_y.$$

Стоимость электроэнергии, затрачиваемой на пылеулавливание, возрастает с увеличением гидравлического сопротивления аппарата и рассчитывается по формуле:

$$C_3 = \Delta P \cdot Q \cdot r \cdot C_{ТЭ}.$$

Полное выражение для расчета стоимости очистки одного кубометра газа можно получить с учетом формулы (1) для расчета эффективности и формулы (2) для расчета гидравлического сопротивления.

ВЫВОДЫ

1. Разработан метод расчета общей и фракционной эффективности пылеулавливания, учитывающий геометрические параметры аппарата.

2. Разработан метод расчета гидравлического сопротивления барботажно-вихревого аппарата, учитывающий конструктивные параметры завихрителя и наличие дисперсной фазы.

3. Полученные формулы послужили основой для разработки методики расчета барботажно-вихревого аппарата. Разработанная методика позволяет рассчитывать аппараты оптимальной геометрии, работающие в оптимальном режиме.

Критерием оптимизации является минимальная стоимость очистки единичного объема газа при обеспечении требуемой эффективности пылеулавливания.

4. Разработанный метод может быть использован при расчете и конструировании аппаратов газоочистки, так как составляющие его соотношения определяют связь между технологическими характеристиками пылеуловителей и их геометрическими и режимными параметрами.

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

d'_{50} – медиана распределения частиц пыли на входе в аппарат, м;

d_{50} – диаметр частиц, улавливаемых с эффективностью 50%, м;

ϑ_T – условная скорость газа в аппарате, м/с;

μ_T – динамическая вязкость газа, Н · с/м²;

$\rho_{ч}$ – плотность частиц, кг/м³;

d_{16} – диаметр частиц на входе в аппарат, при котором масса всех частиц, имеющих размер меньше, чем d_{16} , составляет 16% от общей массы пыли, м;

σ – величина, характеризующая дисперсию частиц;
 K – коэффициент, для данного аппарата получен
 $K = 34,76$;
 D – диаметр аппарата, м;
 R – радиус аппарата, м;
 r – радиус вихря, м;
 L, G – объемные расходы жидкости и газа, м³/с;
 v_1, v_2 – скорость газа на входе и выходе из аппарата, м/с;
 ε – коэффициент потери закрутки потока;
 K – коэффициент закрутки завихрителя;
 n – показатель вихревого движения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патент РФ № 2234358. Барботажно-вихревой аппарат с регулируемыми лопастями / Р. Р. Усманова [и др.], 2004. Бюл. № 23.
2. Адлер Ю. П., Марков Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1986. 279 с.
3. Ужов В. Н., Вальдберг А. Ю. Подготовка промышленных газов к очистке. М.: Химия, 1975. 216 с.
4. Leith D., Licht W. Aiche, symposium series // Air. 1971.12 p.
5. Usmanova R. R., Panov A. K., Zaikov G. E. Complex aerohydrodynamic research and the efficiency of arresting particles for barbotage – rotation // Journal of the Balkan tribological association. 2006. № 3. P. 368–373.

ОБ АВТОРАХ



Жернаков Владимир Сергеевич, проф., зав. каф. сопротивления материалов. Дипл. инж.-мех. (УАИ, 1967). Д-р техн. наук по тепловым двигателям ЛА (УГАТУ, 1992). Иссл. в обл. механики деформируемого твердого тела.



Усманова Регина Равилевна, доц. той же каф. Дипл. инж.-мех. (УГНТУ, 2000). Канд. техн. наук по машинам, агрегатам и процессам (УГНТУ, 2004). Иссл. в обл. аэрогидродинамики и массопередачи в аппаратах вихревого типа.