

АНАЛИЗ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ И РАСЧЕТ ПРОТИВОТОЧНЫХ ЦИКЛОНОВ И ВИХРЕВЫХ КАМЕР

Ключевые слова: противоточные циклоны, энергоёмкость процесса, гидравлическое сопротивление.

В данной статье проведен анализ энергоёмкости процесса центробежного пылеулавливания в циклонах (Ц), циклонных (ЦК) и циклонно-вихревых камерах (ЦВК). Расчет гидравлического сопротивления циклонов, циклонных и циклонно-вихревых камер является актуальной задачей и поэтому требует дальнейших исследований.

Keywords: counter cyclones, power consumption of process, hydraulic resistance.

This article analyzes the energy consumption of the process of centrifugal dust collection in cyclones (C), cyclone (CC) and the cyclone-vortex chamber (CVC). Calculation of hydraulic resistance of cyclones, cyclones and cyclone-vortex chamber is an urgent problem and therefore requires further study.

Основными аппаратами, применяемыми в практике отечественного пылеулавливания, являются высокопроизводительные противоточные циклоны НИИОГАЗ типа ЦН-11, ЦН-15, ЦН-15У, ЦН-24 и высокоэффективные – типа СК-ЦН-22, СК-ЦН-34, СК-ЦН-40, СДК-ЦН-33. Прямоточные циклоны, как правило, применяются в качестве первичных пылеуловителей и значительно реже из-за их малой эффективности. Вихревые аппараты со встречно закрученными потоками по причинам отсутствия надежных инженерных методик расчета и сложной аэродинамической структуры потока нашли еще меньшее применение.

Расход энергии на проведение данного процесса пропорционален объемному расходу газовой смеси и перепаду давления, определяемому гидравлическим сопротивлением. Последнее складывается из сопротивления на входе в аппарат, сопротивлений движения потока в аппарате и сопротивления на выходе из аппарата.

Основными конструктивными параметрами, влияющими на гидравлическое сопротивление циклонов и вихревых камер, являются: относительная площадь входного патрубка $\bar{F}_{\text{вх}} = 4 \cdot \bar{a} \cdot \bar{b} / \pi$; площадь выходного патрубка $\bar{F}_{\text{вых}} = \bar{d}^2$; диаметр выходной (выхлопной) трубы $\bar{d} = d/D$; радиус входного момента количества движения $\bar{R}_{\text{вх}} = 2 \cdot R_{\text{вх}} / D = 1 \pm \bar{a}$; (знак “+” используется для циклонов с улиточным закручивающим, а знак “-” – с простым тангенциальным закручивающим устройством); ширина и высота входного патрубка $\bar{a} = a/D$ и $\bar{b} = b/D$. Кроме того, на распределение скоростей в рабочей зоне циклонов и вихревых камер и их гидравлическое сопротивление влияют относительные размеры: общая высота H/D , высота цилиндрической $h_{\text{ц}}/D$ и конической $h_{\text{к}}/D$ частей аппарата, а также глубина погружения выхлопной трубы $\bar{L} = L/D$, где D – внутренний диаметр аппарата, м.

Гидравлическое сопротивление циклонов и вихревых камер определяется по уравнению:

$$\Delta P = \zeta_{\text{вх}} \cdot \rho_{\text{г}} \cdot V_{\text{вх}}^2 / 2, \quad (1)$$

где $\zeta_{\text{вх}}$ – коэффициент аэродинамического сопротивления, рассчитанный по скорости движения газа во входном патрубке $V_{\text{вх}}$, м/с; $\rho_{\text{г}}$ – плотность газовой фазы, кг/м³; $\Delta P = \Delta P_{\text{ст}} + \Delta P_{\text{дин}}$ – полный перепад давления во входном патрубке, Па; $\Delta P_{\text{ст}} = P_1 - P_2$ – статический и $\Delta P_{\text{дин}} = \rho_{\text{г}} \cdot V_{\text{вх}}^2 / 2$ – динамический перепады давления, Па; P_1 и P_2 – давления на входе в патрубок и выходе из аппарата, Па.

В таблице 1 представлены относительные размеры высокопроизводительных, а в таблице 2 – высокоэффективных циклонов НИИОГАЗ.

Таблица 1 - Относительные размеры высокопроизводительных циклонов НИИОГАЗ типа ЦН (D<2,0 м; d=0,59)

Тип аппарата	$\alpha_{\text{вх}}$, град	$\bar{a}$	$\bar{b}$	$\bar{L}$	$h_{\text{ц}}/D$	$h_{\text{к}}/D$
ЦН-11	11	0,	0,48	1,56	2,06	2,0
ЦН-15	15	26	0,66	1,74	2,26	2,26
ЦН-15У	15	-	0,66	1,50	1,51	1,5
ЦН-24	24	-	1,11	2,11	2,11	1,75

Окончание табл. 1

H/D	d_0/D	$l_{\text{в}}/D$
4,36	0,3-0,4	0,3
4,56		0,3
3,31		0,3
4,26		0,4

По данным таблиц 1 и 2 были вычислены значения геометрических и конструктивных параметров циклонов: площади входного или улиточного тангенциального патрубка $F_{\text{вх}} = \bar{a} \cdot \bar{b} \cdot D^2$, м²; кольцевого канала $F_{\text{к}} = \pi \cdot (D^2 - d^2) / 4 = F_{\text{Д}} \cdot (1 - \bar{d}^2)$, м²;

параметр крутки потока

$$K_{\text{T}} = F_{\text{вх}} / F_{\text{к}} = 4 \cdot \bar{a} \cdot \bar{b} / \left(\pi \cdot (1 - \bar{d}^2) \right);$$

интегральный конструктивный параметр крутки потока на входе в циклон $\theta_{\text{вх}} = \sin \varphi_{\text{вх}} \cdot \bar{R}_{\text{вх}} / K_{\text{T}}$, где $\varphi_{\text{вх}} = 90 - \alpha_{\text{вх}}$ – угол закрутки потока на входе, град. $\alpha_{\text{вх}}$ – угол наклона входного патрубка, град.

Таблица 2 - Относительные размеры высокоэффективных циклонов НИИОГАЗ типа СК и СДК

($D < 3,0$ м; и переменном d)

Тип аппарата	$\bar{d}$	$\bar{a}$	$\bar{b}$	$\bar{L}$
СК-ЦН-22	0,22	0,18	0,40	0,70
СК-ЦН-34	0,34	0,214	0,515	0,815
СК-ЦН-40	0,40	0,15	0,38	0,70
СДК-ЦН-33	0,334	0,264	0,535	0,835

продолжение табл. 2

h_k/D	H/D	d_0/D	l_b/D
2,60	3,30	0,18	0,30
2,11	2,925	2,229	0,2-0,3
3,0	3,835	0,20	0,3
3,0	3,835	0,334	0,2-0,3

Результаты вычисленных значений параметров $F_{вх}$, F_k , K_T , $\bar{R}_{ex}$ и $\theta_{вх}$ представлены в таблице 3.

Коэффициент аэродинамического сопротивления ζ_D , рассчитанный на пустое сечение циклона диаметром D с улиточным тангенциальным раскручивающим устройством и значения коэффициента аэродинамического сопротивления циклонов диаметром $D=0,5$ м – $\zeta_{D=0,5}$, работающим без раскручивающих устройств на выхлоп в атмосферу [11] представлены в таблице 3.

Таблица 3 - Расчетные значения конструктивных параметров и коэффициентов аэродинамического сопротивления циклонов НИИОГАЗ типов ЦН, СК и СДК

Параметры	Тип аппарата		
	ЦН-11	ЦН-15	ЦН-15У
$F_{вх}/D^2$	0,096	0,132	0,132
F_k/D^2	0,512	0,512	0,512
$\bar{F}_{ex}$	0,122	0,168	0,168
$\bar{R}_{ex}$	0,8	0,8	0,8
K_T	0,1875	0,258	0,258
$\theta_{вх}$	4,188	2,995	2,995
ζ_D	210	140	160
$\zeta_{вх}$	3,721	4,60	4,798
	250	163	170

Окончание табл. 3

ЦН-24	СК-ЦН-22	СК-ЦН-34	СК-ЦН-40	СДК-ЦН-33
0,222	0,072	0,110	0,057	0,141
0,512	0,747	0,694	0,659	0,697
0,310	0,092	0,140	0,0726	0,180
0,8	1,18	1,214	1,15	1,264
0,433	0,096	0,1585	0,086	0,202
1,688	12,29	7,86	13,36	6,25
90	-	1540	-	980
7,688	16,928	22,54	-	19,44
80	2000	1150	-	600

Для удобства анализа и сравнения энергозатрат различных типов циклонов, вычисленных по значениям коэффициента ζ_D , может быть использовано уравнение для связи коэффициентов аэродинамического сопротивления $\zeta_{вх}$ и ζ_D :

$$\zeta_{ex} = \zeta_D \cdot \bar{F}_{ex}^2 \quad (2)$$

Значения коэффициентов $\zeta_{вх}$, рассчитанные по экспериментальным данным различных авторов для циклонов, циклонных и циклонно-вихревых камер приведены ниже.

По данным Якубова [1] вычисление коэффициента $\mathcal{K}_{вх}$ для ЦК производят по формуле:

$$\mathcal{K}_{вх} = 1,38 \cdot (\bar{F}_{вх} / (\bar{F}_{вх} \cdot \bar{L}^{0,5})) + 0,03 \quad (3)$$

В работе Стюртеванта [9] для Ц коэффициент $\mathcal{K}_{вх}$ рассчитывают по выражению:

$$\mathcal{K}_{вх} = 2,918/c_r \quad (4)$$

Другие авторы Шеферд и Лейпла [8] для Ц вычисляют коэффициент $\mathcal{K}_{вх}$ по формуле:

$$\mathcal{K}_{вх} = 16 \cdot \bar{F}_{вх} / \bar{d} \quad (5)$$

У авторов Касала, Мартинес-Бенета [10] коэффициент $\mathcal{K}_{вх}$ для Ц определяют по выражению:

$$\mathcal{K}_{вх} = 11,3 \cdot (\bar{F}_{вх} / \bar{d}^2)^2 + 3,33 \quad (6)$$

Тонконогий и Вышенский [2] для расчета коэффициента $\mathcal{K}_{вх}$ для ЦК используют формулу:

$$\mathcal{K}_{вх} = 0,5 + 60 \cdot \bar{F}_{вх}, \quad \bar{L} = 1,7; \bar{d} = 0,4 \quad (7)$$

Авторы Бухман, Вышенский, Устименко [4,5,6] для расчета коэффициента $\mathcal{K}_{вх}$ для ЦК ведут по формулам:

$$\mathcal{K}_{вх} = 0,225 \cdot n^{0,115} \cdot Re_{вх}^{0,170}; \quad \bar{L} = 1,812; \bar{d} = 0,4; \quad n = 1...4; \bar{F}_{вх} \cdot 10^2 = 3,19 \quad (8)$$

По данным Яковлева, Змейкова, Устименко [3, 4] вычисление коэффициента $\mathcal{K}_{вх}$ для ЦВК производят по формуле:

$$\zeta_{ex} = 2 \cdot Re_{ex}^{0,07} \quad (9)$$

Мельников, Сухович [7] рассчитывают коэффициент $\mathcal{K}_{вх}$ для ЦВК по выражению:

$$\zeta_{ex} = 0,08 Re_{ex}^{0,32} \quad (10)$$

Уравнения (3) - (7) предназначены для расчета гидравлического сопротивления центробежного оборудования в автомоделном режиме, когда коэффициент $\zeta_{вх}$ определяется лишь конструктивной особенностью аппарата.

Результаты расчетов по этим формулам для соответствующих геометрических параметров представлены на рисунке 1.

Уравнения (8) - (10) предназначены для расчета $\zeta_{вх}$ в не автомоделной области и являются функцией как конструктивных, так и режимных параметров $Re_{вх} = V_{вх} \cdot D \cdot \rho / \mu_r$, где μ_r – коэффициент динамической вязкости газа, Па·с. Анализ энергоемкости процесса центробежного пылеулавливания в не автомоделной по числу Рейнольдса области показывает некоторое увеличение значения $\zeta_{вх}$ в области чисел $Re_{вх}$ от $30 \cdot 10^3$ до $230 \cdot 10^3$.

Как следует из таблицы 3, наибольшее сопротивление имеют высокоэффективные циклоны типа СК и СДК, а наименьшее – циклонные камеры (по данным Якубова). Высокопроизводительные циклоны типа ЦН, а также ЦК, представленные в работе

Тонконового и Вышенского, принимают промежуточные значения гидравлического сопротивления. Коэффициент $\zeta_{вх}$ возрастает при увеличении $\bar{F}_{вх}$ и уменьшении параметра $\bar{d}$ (см. циклоны типа СК и

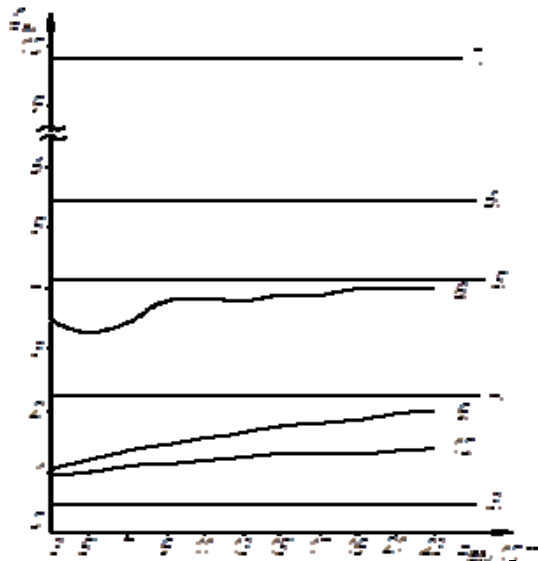


Рис. 1 - Зависимость коэффициента $\zeta_{вх}$ от режима движения газа $Re_{вх}$, по уравнениям (8)-(10) (на этом же рисунке прямыми линиями изображены значения $\zeta_{вх}$, полученные по уравнениям (3)-(7))

СДК). Меньшим значениям коэффициента $\zeta_{вх}$ соответствуют большие гидравлические потери. Отсюда следует, что коэффициент $\zeta_{вх}$ дает неверную информацию об оптимальной работе циклонов и циклонных камер: минимальное значение $\zeta_{вх}$ отвечает наилучшим условиям аэродинамической работы аппарата, а максимальное – наилучшим. Поэтому расчет гидравлического сопротивления циклонов, циклонных и циклонно-вихревых камер рекомендуется выполнять по уравнению (1), в котором в качестве коэффициента аэродинамического сопротивления следует использовать ζ_D , т.к. данный коэффициент правильно отражает затраты энергии аппарата на организацию циклонного процесса. Аппарату с меньшим гидравлическим сопротивлением ΔP соответствует меньшее значение величины ζ_D .

Исследования гидравлического сопротивления аппаратов вихревого типа комплексной очистки газов [12] проводились по коэффициенту гидравлического сопротивления ζ_D , рассчитанному по скорости движения газа в контактной зоне тепломассообменной камеры.

В других исследованиях на основе анализа аэродинамических закономерностей вихревого пылегазо-разделителя [13] и контактного теплообменника вихревого типа [14] также получены подтверждения правильной оценки энергозатрат по скорости дви-

жения закрученного потока газа или пара в контактной зоне оборудования.

Литература

1. Якубов Г.В. Исследование некоторых закономерностей движения потока в циклонных камерах: Автореф. канд. дис. Алма - Ата, 1971.
2. Тонконогий А.В., Вышенский В.В. Исследования конвективного теплообмена на моделях циклонных камер. - Проблемы теплоэнергетики и прикладной теплофизики. Вып. 1. Алма - Ата., 1964.
3. Змейков В.Н., Яковлев А.Т. Экспериментальное исследование влияния распределенности подводов на аэродинамику плоской вихревой камеры. - Проблемы теплоэнергетики и прикладной теплофизики. Вып.12. Алма - Ата, 1977.
4. Устименко Б.П. Процессы турбулентного переноса во вращающихся течениях. - Алма - Ата: Наука, 1977. - 228 с.
5. Бухман М.А. Экспериментальное исследование аэродинамики и конвективного теплообмена в циклонных камерах с распределенным по периметру подводом воздуха: Автореф. канд. дис. Алма - Ата, 1970.
6. Вышенский В.В. Изучение конвективного теплообмена в циклонной камере. - Изв. АН КазССР. Сер. энергетическая. 1961. Вып. 2 (20).
7. Мельников В.К., Сухович Е.П. Конвективный теплообмен в вихревой камере. - Изв. АН ЛатвССР. Сер. физ. и техн. наук. 1967. № 2.
8. Коузов П.А., Мальгин А.Д., Скрыбин Г.М. Очистка от пыли газов и воздуха в химической промышленности. - Л.: Химия, 1982. - 256 с.
9. Shepherd C.B., Lapple C.E. Flow pattern and pressure in cyclone dust collectors. - Ind. and Eng. Chem. 1939. Vol. 31, № 8.
10. Stairmand C.J. Pressure drop in cyclone separators. - Engineering. 1949. Vol. 21, № 10.
11. Casal J, Martinez - Benet J.M. A better way to calculate cyclone pressure drop. - Chem. Eng. 1983. Vol.
12. Алексеев В.В. Исследование гидравлического сопротивления аппарата вихревого типа комплексной очистки газов / Алексеев В.В., В.О. Лукин, Поникаров И.И. // Вестник Казанского технологического университета. Т. 16. №7; М-во образ. и науки России, Казан. Нац. Исслед. Технол. Ун-т. - Казань: КНИТУ, 2013. - 217 с.
13. Алексеев В.В. Исследование аэродинамических закономерностей вихревого пылегазо-разделителя / Алексеев В.В., Поникаров И.И., Алексеев П.В. // Вестник Казанского технологического университета. Т. 16. №20; М-во образ. и науки России, Казан. Нац. Исслед. Технол. Ун-т. - Казань: КНИТУ, 2013. - 217 с.
14. Москалев, Л.Н. Исследование влияния аэродинамических закономерностей входного потока на конструктивные параметры контактного теплообменника вихревого типа / Москалев Л.Н., Поникаров С.И., Поникаров И.И., Алексеев В.В. // Вестник Казанского технологического университета. Т. 15. №10; М-во образ. и науки России, Казан. Нац. Исслед. Технол. Ун-т. - Казань: КНИТУ, 2012. - 240 с.