

МЕТОД РАСЧЕТА ЭФФЕКТИВНОСТИ ЦИКЛОННЫХ ПЫЛЕ-ЗОЛОУЛОВИТЕЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДЕЙСТВИТЕЛЬНОГО ИНТЕГРАЛЬНОГО ПАРАМЕТРА ЗАКРУТКИ ПОТОКА.

Представлены результаты расчетов по использованию действительного интегрального параметра закрутки потока на входе в кольцевой канал корпуса циклона для разработки комплексного параметра пыле-золоулавливания, используемого при оценке величин параметров функции фракционной степени очистки циклонных пыле-золоуловителей.

Ключевые слова: закрученные потоки, циклонные пыле-золоуловители, интегральные параметры закрутки, эффективность очистки.

Обозначения:

\bar{a}, \bar{b} - высота и ширина входного канала (по отношению к диаметру циклона); D_c - диаметр

циклона; \bar{D}_e, \bar{R}_e - диаметр и радиус выходного патрубка (по отношению к диаметру циклона); $d_{\eta=50}$ - диаметр частиц, улавливаемых в циклоне на 50%; d_{50} - медианный диаметр пыли; $R_{вх}$ - радиус входа потока в циклон, равный $(R_c - a/2)$; $f_{вх}$ - площадь входного канала; M - осевая составляющая момента количества движения потока; K_1 - осевая

составляющая количества движения потока; $\bar{H}_{об}$ - общая высота циклона (по отношению к диаметру циклона); ξ - коэффициент гидравлического сопротивления циклона; ΔP - сопротивление циклона; u, ω - вращательная, осевая скорости, м/с;

r_1, r_2 - радиусы кольцевого канала; ρ - плотность потока;

V_c - скорость газа в горизонтальном сечении циклона; μ - динамический коэффициент вязкости; σ_{η} - дисперсия распределения фракционных степеней очистки;

σ_p - дисперсия распределения частиц пыли по размерам; $F_{вх}$ - действительное значение интегрального параметра закрутки на входе в кольцевой канал.;

Индексы. г - газ; об - общий; п - пыль; ц - циклон.

Постановка проблемы.

Циклонные пыле-золоуловители относятся к наиболее распространенным типам инерционного пылеулавливающего оборудования [1, 2], благодаря сравнительно высокой степени очистки от фракций пыли диаметром более 10 мкм, простоте конструкции, высокой производительности. Поэтому разработка более точных аналитических методов расчета параметров фракционных степеней очистки циклонных аппаратов является весьма актуальной задачей.

Объектом наших теоретических и экспериментальных исследований является обоснование возможности повышения точности аналитических методов расчета параметров фракционных степеней очистки циклонных аппаратов за счет использования действительного интегрального параметра закрутки потока на входе в кольцевой канал циклона.

Предмет исследований – циклонное пыле-золоулавливающее оборудование и разработка для выполнения аналитических расчетов эффективности очистки нового комплексного параметра золоулавливания на основе использования действительного интегрального параметра закрутки потока на входе в кольцевой канал циклона.

Цель работы

– теоретическое и экспериментальное обоснование возможности использования действительного интегрального параметра закрутки потока на входе в кольцевой канал для разработки комплексного параметра золоулавливания, используемого при оценке величин параметров функции фракционной степени очистки циклонных пыле-золоуловителей «d_η=50»;
 – создание более точных методов расчета общей эффективности золоулавливания в различных по конструктивному исполнению циклонных аппаратах с использованием наиболее достоверных экспериментальных данных очистки воздуха от пыли в типовом циклоне НИИОгаз «ЦН-15» [9].

Изложение основного материала

Теоретические исследования.

Для анализа интенсивности процессов теплообмена [1] и золоулавливания [2] в циклонных аппаратах успешно используется интегральный параметр закрутки потока Φ , который для кольцевого канала может быть записан в виде [1, 3]

$$\Phi = \frac{M}{K_1(r_2 - r_1)} = \frac{2\pi \int_{r_1}^{r_2} \rho u \cdot \omega r^2 dr}{2\pi \int_{r_1}^{r_2} \rho \cdot \omega^2 r dr} \quad (1)$$

Параметр Φ определяет отношение вращательного и осевого количества движения в интегральной форме и может быть эффективно использован для характеристики интенсивности закрутки потока в циклоне [1].

Значение интегрального параметра закрутки на входе в кольцевой канал, при предположении равномерности профилей скоростей на входе в циклонный закручиватель и аксиальной скорости в кольцевом канале, может быть определен по зависимости [3]:

$$\Phi_{\text{вх.г}} = \frac{\pi R_{\text{вх}} (R_{\text{г}}^2 - R_{\text{е}}^2)}{f_{\text{вх}} (R_{\text{г}} - R_{\text{е}})} \quad (2)$$

После преобразований зависимость (2) несложно приводится к виду:

$$\Phi_{\text{вх.г}} = \Phi_{\text{жвх}}^2 (1 + \bar{D}_{\text{е}}), \quad (3)$$

где $(\Phi_{жвх}^2)_m = \frac{\pi}{4} \left(\frac{1 - \bar{a}}{\bar{a}\bar{b}} \right)$ - для циклонов с тангенциальным входом [1];

$(\Phi_{жвх}^2)_{my} = \frac{\pi}{4} \left(\frac{1 + \bar{a}}{\bar{a}\bar{b}} \right)$ - для циклонов с тангенциально-улиточным входом

[1].

В [3] действительное значение интегрального параметра закрутки на входе в кольцевой канал «Фвх» определено как среднее по периметру канала во входном сечении и в результате обобщения опытных данных по теплообмену получено в виде:

$$\Phi_{вх} = 2,83 \left[\Phi_{жвх}^2 (1 + \bar{D}_e) \right]^{0,38} \quad (4)$$

Целью данной работы является проверка возможности использования действительного интегрального параметра закрутки потока на входе в кольцевой канал $\Phi_{вх}$ по зависимости (4) для расчетов эффективности золоулавливания в циклонных аппаратах.

В [2] была установлена возможность использования для оценки золоу-

лавливания комплекса $\Phi_{жвх}^2 \left(\frac{\bar{H}_{об}}{\bar{D}_e} \right)^{\frac{2}{3}}$, поэтому, по аналогии, рассмотрим

комплексный параметр вида

$$\Phi_{вх} \left(\frac{\bar{H}_{об}}{\bar{D}_e} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (5)$$

и установим его связь с параметром « $d\eta=50$ » циклонного процесса золоулавливания.

Для оценки степени влияния различных конструктивных и технологических параметров на эффективность золоулавливания в циклонах и разработки на основании результатов этой оценки математической модели процесса используем статистический корреляционный анализ имеющихся наиболее достоверных экспериментальных данных для различных циклонных золоуловителей. Это связано с тем, что, с одной стороны, по своей природе циклонные процессы сепарации пыли носят вероятностный характер [4], а, с другой, тем, что испытания циклонов разными исследователями выполнены в отличающихся условиях с большим количеством случайных ошибок на различных

стадиях исследований (при оценки дисперсности пыли, степени очистки, измерениях технологических параметров и др.).

Для проведения корреляционного анализа были выбраны наиболее известные циклонные золоуловители, а для оценки влияния предложенного комплексного параметра

(5) на эффективность золоулавливания были использованы наиболее достоверные экспериментальные данные НИИОгаз [5]. Устанавливалась корреляционная связь величин « $d_{\eta=50}$ » с разными параметрами:

$$x_1 = \xi_0 [6]; \quad x_2 = \left(\frac{R_y}{\Delta P} \right)^{\frac{2}{3}} [7]; \quad x_3 = \Phi_{жвх}^2 \left(\frac{\bar{H}_{об}}{\bar{D}_e} \right)^{\frac{2}{3}} [2]; \quad x_4 = \Phi_{ex} \left(\frac{\bar{H}_{об}}{\bar{D}_e} \right)^{\frac{2}{3}} .$$

В табл.1 приведены необходимые данные для оценки оптимального параметра золоулавливания.

Таблица 1. К оценке оптимального параметра золоулавливания

Параметр золоулавливания	Тип циклона									
	ЦН-11	ЦН-15			ЦН-15У	ЦН-24	СК-ЦН-33	СК-ЦН-34	СЦН-40	rху
		$\bar{D}_e = 0,59$	$\bar{D}_e = 0,5$	$\bar{D}_e = 0$						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
x1	250	160	164	303	170	80	600	1270	1900	0,75
x2	0,018	0,0172	0,0183	0,0121	0,0172	0,0172	0,0172	0,0172	0,0064	0,74
x3	16,9	12,64	14,1	16,39	10	6,98	33,29	45	60	0,833
x4	22	20	21,9	24,74	15,9	15,3	31,34	31,31	36,8	0,916
y = $d_{\eta 50}^{экс}$ *)	3,65	4,5	4,46	4,028	6	8,5	2,31	1,95	1,32	-
Источник информации	[9]	[9]	[12]	[12]	[5]	[5]	[5]	[5]	[14]	-

*) – для условий: $D_c = 0,6\text{ м}$; $\rho_p = 1930 \text{ кг/м}^3$; $\mu_g = 22,2 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}$; $V_g = 3,5 \text{ м/с}$; ; Величины коэффициентов корреляции « rху» рассчитывалась по [8].

Из табл. 1 следует, что $(r_{ху})_{\max} \cong 0,916$ принадлежит новому параметру (5).

Поэтому рассмотрим возможность его использования для оценки эффективности золоулавливания в циклонах. По приведенным в табл.1 данным на

рис. построена зависимость $d_{\eta 50} = f \left[\Phi_{ex} \left(\frac{\bar{H}_{об}}{\bar{D}_e} \right)^{\frac{2}{3}} \right]$.

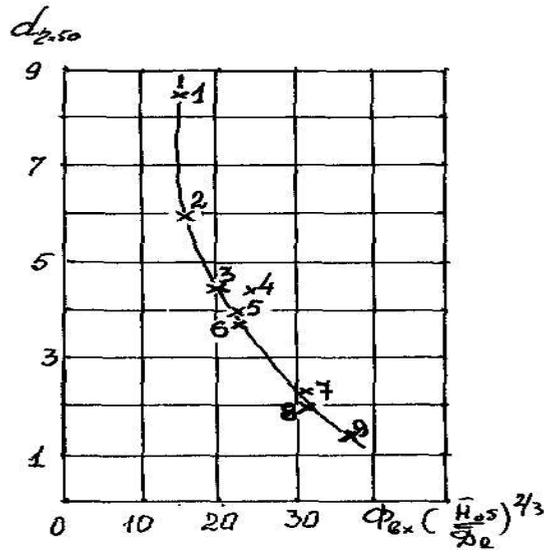


Рис.1 Зависимость параметра пофракционной очистки « $d_{\eta=50}^p$ » от величини

$$\Phi_{ex} \left(\frac{\bar{H}_{об}}{\bar{D}_e} \right)^{2/3}$$

ны комплексного параметра

После расчета по опытным данным коэффициентов ($a = 1200$; $b = -1,85$), может быть записано следующее уравнение:

$$d_{\eta=50} = 1200 \left[\Phi_{ex} \left(\frac{\bar{H}_{об}}{\bar{D}_e} \right)^{2/3} \right]^{-1,85} \sqrt[3]{\frac{D_u^*}{0,6} \cdot \frac{1930}{\rho_n^*} \cdot \frac{\mu_z^*}{22 \cdot 10^{-6}} \cdot \frac{3,5}{v_u^*}} \text{ мкм,} \quad (6)$$

где *) отмечены реальные условия работы циклонного золоуловителя.

Ранее НИИОгазом [6] была предложена зависимость вида :

$$d_{\eta_{50}} = 64,35 \cdot 10^5 \xi^{-0,51} \sqrt[3]{\frac{D_u^*}{0,6} \cdot \frac{1930}{\rho_n^*} \cdot \frac{\mu_z^*}{22 \cdot 10^{-6}} \cdot \frac{3,5}{v_u^*}} \quad (7)$$

и в [2] – зависимость:

$$d_{\eta_{50}} = 33 \left[\Phi_{жex}^2 \left(\frac{\bar{H}_{об}}{\bar{D}_e} \right)^{2/3} \right]^{-0,78} \sqrt[3]{\frac{D_u^*}{0,6} \cdot \frac{1930}{\rho_n^*} \cdot \frac{\mu_z^*}{22 \cdot 10^{-6}} \cdot \frac{3,5}{v_u^*}} \quad (8)$$

Для сравнения точности расчетов по зависимостям (6-8) в табл. 2 приведены результаты расчетов величины « $d_{\eta=50}$ » и их сравнение с опытными данными для различных по конструкции циклонов НИИОгаз.

Таблица 2. Оценка точности расчетов величины по зависимостям (6 – 8)

Параметр	ЦН-11	ЦН-15			ЦН-15У	ЦН-24	СК-ЦН-33	СК-ЦН-34	ЦЦН-40	$\frac{N\sigma}{\Sigma y}$	rxy
		$\bar{D}_e = 0,5$	$\bar{D}_e = 0,5$	$\bar{D}_e = 0,4$							
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	13
$d_{\eta 50}^{экс}$	3,65	4,5	4,46	4,028	6,0	8,5	2,31	1,95	1,32	-	-
$d_{\eta 50}^p$	3,97	4,73	4,73	3,2	7,22	7,79	2,065	2,065	1,536	0,06	0,9
$d_{\eta 50}^p$	3,85	4,836	4,77	3,49	4,69	6,89	2,464	1,68	1,37	0,128	0,7
$d_{\eta 50}^p$	3,64	4,56	4,18	3,72	5,48	7,35	2,15	2,16	1,35	0,065	0,8

Сопоставляя значения расчетных и экспериментальных величин « $d_{\eta 50}^p$ », оценим адекватность описания опытных значений по зависимостям (6-8) с помощью величины « σ » [8]:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (d_{\eta 50}^p - d_{\eta 50}^{экс})^2}{N-1} (1-r^2)} \quad (9)$$

Значения коэффициентов корреляции и величин « σ » приведены в табл. 2. Принято, что расчет по математической модели адекватно описывает экспериментальные данные при условии [8]:

$$\frac{N\sigma}{\sum d_{\eta 50}^{экс}} \ll 0,1 \quad (10)$$

Из рассмотрения табл. 2 видно, что зависимость (6) наиболее адекватно описывает экспериментальные данные и может быть использована при расчетах параметра пофракционной степени очистки для циклонов в широком диапазоне изменения конструктивных и технологических параметров.

Определению в данном методе расчета подлежит только параметр « $d_{\eta 50}$ », так как остальные задаются или устанавливаются опытным путем.

Экспериментальные исследования.

В качестве примера расчета циклона рассмотрим циклон НИИОгаз ЦН-15 при следующих конструктивных и технологических параметрах [9]:

$D_c = 0,45\text{м}; \bar{a} = 0,26; \bar{b} = 0,66; \bar{D}_e = 0,59; \bar{H}_{об} = 4,26; V_c = 3,1 \text{ м/с}; \mu_g = 18,3 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}; \rho_p = 2650 \text{ кг/м}^3; d_{50} = 8\text{мкм}; \sigma_p = 3,5; \lg \sigma_{\eta} = 0,35; \eta_{общ}^{экс} = 71,7\%$.

Рассчитываем параметр золоулавливания (4)

$$\Phi_{ex} = 2,83 \left[0,785 \frac{(1-0,26)(1+0,59)}{0,26 \cdot 0,66} \right]^{0,38} = 5,365.$$

По зависимости (6) рассчитываем величину « $d_{\eta 50}$ »:

Серія: інформатика, обчислювальна техніка та кібернетика

$$d_{\eta_{50}}^p = 1200 \left[5,36 \left(\frac{4,26}{0,59} \right)^{2/3} \right]^{-1,85} \sqrt{\frac{0,45}{0,6} \cdot \frac{1930}{2650} \cdot \frac{18,3 \cdot 10^{-6}}{22 \cdot 10^{-6}} \cdot \frac{3,5}{3,1}} = 3,36 \text{ мкм}$$

параметр общей эффективности улавливания «t» [5] равен

$$t = \frac{\lg d_{50} - \lg d_{\eta_{50}}}{\sqrt{\lg^2 \sigma_n + \lg^2 \sigma_\eta}} = \frac{\lg 8 - \lg 3,36}{\sqrt{\lg^2 3,5 + (0,35)^2}} = 0,582.$$

Общая степень очистки определяется по таблицам [8] или при их отсутствии - по следующим эмпирическим зависимостям [15]:

$$\eta_{\text{общ}} = 50 + 44t - 10(t)^2, \quad (\text{для } 50\% \leq \eta_{\text{общ}} \leq 98\%)$$

При этом расчетная степень очистки $\eta_{\text{общ}}^p = \Phi(0,582) = 72,1\%$, практически, совпадает с опытной величиной $\eta_{\text{общ}}^{\text{экс}} = 71,7\%$.

В табл. 3 приведены оценки величин $\eta_{\text{общ}}^p$ и $\eta_{\text{общ}}^{\text{экс}}$ для различных циклонных золоуловителей с резко отличающимися конструктивными и технологическими параметрами.

Таблица 3. Сравнение расчетных и экспериментальных степеней

золоулавливания циклонных аппаратов

Тип циклона,	Dц, м	\bar{a}	\bar{b}	$\Phi_{\text{н}} \left(\frac{H_{\text{н}}}{D_{\text{н}}} \right)^2$	d_{50} мкм	σ_p	ρ_p , кг/м ³	μ_g 10 ⁻⁶	Vц, м/с	η^p %
ЦН-15	0,45	0,26	0,66	20	8	3,5	2650	18,3	3,1	71,5
Тер-Лин	0,05	0,167	0,67	31,9	14,5	7,63	2650	18,3	2,15	92,5
Gloger	0,3	0,223	0,41	26,31	20	2,9	2,650	18,3	2,33	96,2
Н-ГАЗ	0,3	0,2	0,4	48	12	1,85	1000	18,3	1,6	98
Н-ГАЗ	1,6	0,2	0,4	45,72	13	4,67	2300	25	1,6	82,2
СЦН-40	0,3	0,16	0,38	36,8	12	3,6	2600	18,3	1,6	93,5
ЦН-11	0,5	0,26	0,48	22	8	3,5	2650	18,3	2,58	72,1
УЦ-38	0,8	0,248	0,28	36,2	8	3,5	2650	18,3	1,3	78,6

Из рассмотрения данных табл. 3 следует, что предлагаемый комплексный параметр золоулавливания (5) позволяет, с достаточной для практических расчетов точностью, рассчитывать эффективность очистки различных циклонных пыле-золоуловителей при характерных для внутритрубных течений значениях интенсивности турбулентности воздушного потока на струйном участке входного патрубка циклонов - до 5%. Использование предлагаемого метода дает возможность значительно сократить затраты времени и объем экспериментальных работ при разработке нового циклонного пылеулавливающего оборудования или подбору типового для решения различных задач механики аэрозолей.

Данный метод расчета позволяет рассчитывать эффективность очистки различных циклонных пыле-золоуловителей при обычных значениях интенсивности турбулентности воздушного потока на струйном участке входного патрубка циклонов - до 5%.

Создание методов расчета эффективности очистки различных циклонных пыле-золоуловителей при повышенных значениях интенсивности

турбулентности воздушного потока на струйном участке входного патрубка циклонов (более 5%) является целью дальнейших исследований авторов.

Выводы

В данной публикации предложен новый аналитический метод расчета общей и фракционной степеней очистки в различных циклонных золоуловителях, использование которого дает возможность значительно повысить точность расчетов, сократить затраты времени и объем экспериментальных работ при разработке новых видов золоуловителей или при их подбору для решения различных задач в области механики аэрозолей.

Библиография

1. Халатов А.А., Авраменко А.А., Шевчук И.В. Теплообмен и гидродинамика в полях центробежных массовых сил: В 4-х т.- Киев: Ин-т техн. теплофизики НАН Украины, 2000.- т. 3: Закрученные потоки- 474 с.
2. Приемов С.И. К расчету эффективности золоулавливания и гидравлического сопротивления циклонных аппаратов // Промышленная теплотехника – 2004 – т. 26- №4 – с. 47-52.
3. Сабуров Э.Н. Аэродинамика и конвективный теплообмен в циклонных нагревательных устройствах. Л., 1982.
4. Коузов П.А. Расчет эффективности циклонов. //Научн. работы инс-в охраны труда ВЦСПС – 1969-вып. 61.
5. 5 Справочник по пыли-и золоулавливанию // Под ред. А.А. Русанова – М. – Энергоатомиздат – 1983-312 с.
6. Вальдберг А.Ю., Кирсанова И.С. К расчету эффективности циклонных пылеуловителей //Теор. основы хим. технол. – 1989- т.23 № 4 Burkholz A. Charakterisierung von Tragheisabcheidern durch praktische Kennralien.- Chem. Ing. Tech. 48, Jahrg.-1976-N4-s.555-556.
7. Справочник по теории вероятности и математической статистике /В.С. Королюк, Н.И. Портенко, А.В. Скороход и др.- М.: Наука-1985 – 640 с.
8. Коузов П.А. Сравнительная оценка эффективности циклонов различных типов // Научн. тр. ин-в охр. труда ВЦСПС- 1969- вып. 60 с. 3-13.
9. Ter Linden A.I.- Proc. Instn Mech. Engrs, 160, 233 (1942).
10. Gloger und Gunter Niendorf Unter suchunger an einem Modellzyklon uber den Eiflub uber verschiede ner geometrischer parameter auf Abscheidegrad und Druckverlust // Chem. Heft Techn., 22. Iq. Heft 9 – September-1970- p. 525-532.
11. Вальдберг А.Ю., Кирсанова И.С. Практическая реализация вероятностно-энергетического метода расчета центробежных пылеуловителей. //Хим. и нефт. машиностроение. – 1994- № 9 – с. 26-28.
12. Дубинская Ф.Е., Пантюхов Н.А., Вальдберг А.Ю. и др. Очистка газов чугунолитейных вагранок //Промышл. энергетика – 1982- №10 – с. 45-46.
13. Карпухович Д.Т. Влияние относительной высоты цилиндрической части корпуса циклона на его характеристики //Хим. и нефт. машиностроение. – 1986- № 10 – с. 17-18.
14. Приемов С.И. Метод расчета эффективности улавливания пыли циклонами // Промышленная теплотехника -2011-т.33-№4-С.93-99.