

вычисления низшей теплоты сгорания.– М.: Из-во стандартов, 1992. – 23 с.

8. ГОСТ 305-82 Топливо дизельное. Технические условия.

9. EN 14214:2003 “Automotive fuels. Fatty

acid methyl esters (FAME) for diesel engines. Requirements and test methods”.

10. ГОСТ 11812-66 Масла растительные. Методы определения влаги и летучих веществ.

Получено 11.03.2011 г.

УДК 621.928.9

Приемов С.И.

Институт пищевой биотехнологии и геномики НАН Украины

МЕТОД РАСЧЕТА ЭФФЕКТИВНОСТИ УЛАВЛИВАНИЯ ПЫЛИ ЦИКЛОНАМИ

Запропоновано метод розрахунку ефективності вловлювання аерозолів в циклонних апаратах. Метод заснований на використанні характеристик турбулентних потоків та закономірностей переносу аерозолів в дифузійному приграничному шарі.

Предложен метод расчета эффективности улавливания аэрозолей в циклонных аппаратах. Метод основан на использовании характеристик турбулентных течений и закономерностей переноса аэрозолей в диффузионном пограничном слое.

A method of calculation of the efficiency of dust recovery in cyclones is proposed. Method is based on using the turbulence flow and laws of carrier of aerosols in diffusion frontier layer.

$D_{ц}$ – диаметр циклона;

$d_{эқв}$ – эквивалентный диаметр входного патрубка циклона;

d_{50} – медианный диаметр пыли;

$d_{η50}$ – диаметр частиц пыли, улавливаемых в циклоне с эффективностью 50 %;

$t_{г}$ – характерное время мелкомасштабных турбулентных пульсаций газа;

u – скорость газа;

$u_{ж}$ – динамическая скорость газа;

$u_{дпс}$ – конечная скорость частицы пыли (в конце ее продвижения через диффузионный пограничный слой перед соприкосновением с препятствием стенкой циклона);

ε – скорость диссипации турбулентной энергии газа ;

ζ – коэффициент гидравлического сопротивления;

η – эффективность очистки;

μ – коэффициент динамической вязкости;

ν – коэффициент кинематической вязкости;

ρ – плотность;

σ – стандартное отклонение распределения частиц пыли по размерам;

σ_{η} – стандартное отклонение распределения фракционных степеней очистки;

τ – время релаксации частиц пыли;

ω – нижний предел частоты турбулентных пульсаций наиболее энергоемких вихрей;

a – ширина входного патрубка циклона, отнесенная к его диаметру;

b – высота входного патрубка циклона, отнесенная к его диаметру;

$D_{пр}$ – размер препятствия (капля, стенка циклона);

D_e – диаметр выхлопного патрубка циклона (долях от диаметра циклона);

E – коэффициент захвата частицы препятствием.

Комплексы:

Re – число Рейнольдса;
Stk – число Стокса.

Индексы верхние:

p – расчет;
э – эксперимент.

Индексы нижние:

vx – на входе в циклон (во входном патрубке);
г – газ;
п – пыль;
фр – фракционный.

Сокращения:

дпс – диффузионный пограничный слой;
экв – эквивалентный.

Циклонные пылеуловители являются наиболее распространенными в различных отраслях промышленности, в связи с чем повышен интерес к усовершенствованию методов их инженерного расчета.

Наибольшее распространение для расчета эффективности циклонов получил вероятностный метод расчета, основанный на использовании логарифмически нормального закона распределения как частиц пыли по размерам, так и зависимости эффективности пылеулавливания в циклоне от диаметра улавливаемых частиц [1].

При использовании этого метода требуются сведения о двух параметрах, характеризующих работу циклона: $d_{\eta 50}$ и σ_{η} .

Величину $\lg \sigma_{\eta}$ для циклонов можно принять постоянной и равной 0,35 [2]; параметр $d_{\eta 50}$ определяется конструкцией циклона и

является единственной подлежащей определению величиной.

По двум этим параметрам, а также двум параметрам дисперсности улавливаемой пыли d_{50} , σ_{η} , определяют величину расчетного параметра «t» и общую степень очистки газового потока от пыли в циклоне [1]:

$$t = \frac{\lg d_{50} - \lg d_{\eta 50}}{\sqrt{\lg^2 \sigma_{\eta} + \lg^2 \sigma_{\eta}}}, \quad (1)$$

$$\eta_{\text{общ}} = \Phi(t) = \frac{100}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t e^{-\frac{t^2}{2}} dt, \quad (2)$$

где $\Phi(t)$ – интеграл Гаусса, который определяется по специальным вероятностным таблицам [1] или по следующим полученным автором зависимостям:

$$\eta_{\text{общ}} = 50 + 44t - 10t^2, \text{ (для } 50\% \leq \eta_{\text{общ}} \leq 98\%), \quad (3)$$

Табл. 1. Данные по оценке точности расчетов по формуле (3)

t	0,1	0,2	0,26	0,39	0,52	0,7	0,84	1,0	1,28	1,64	1,88	2,05
$\eta_{\text{общ}}^{\text{таб}}, \%$	54	58	60	65	70	76	80	85	90	95	97	98
$\eta_{\text{общ}}^{\text{р}}, \%$	54,3	58,4	60,5	65,6	69,7	76	79,6	85	89,7	95,2	97,38	98,2
$\Delta \eta, \%$	0,3	0,4	0,5	0,6	0,26	–	0,4	–	0,3	0,2	0,38	0,2

Табл. 2. Данные по оценке точности расчетов по формуле (4)

t	2	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7
$\eta_{\text{общ}}^{\text{таб}}, \%$	97,72	98,2	98,61	98,93	99,18	99,38	99,58	99,65
$\eta_{\text{общ}}^{\text{р}}, \%$	97,89	98,24	98,57	98,87	99,14	99,39	99,62	99,83
$\Delta \eta, \%$	0,17	0,04	0,04	0,06	0,04	–	0,04	0,18

$$\eta_{\text{общ}} = 105,4 - 15/t, \text{ (для } \eta_{\text{общ}} \text{ 98 \%)} \quad (4)$$

Ошибки при использовании зависимостей (3) и (4) невелики и соответственно составляют 0,3 и 0,07 %, что видно из табл. 1 и 2.

Ранее [3] для скрубберов (механических, Вентури) в результате анализа процесса осаждения частиц пыли на препятствии в приближении диффузионного пограничного слоя, получена зависимость для оценки относительной скорости между частицей и препятствием (капля, стенка циклона и т.д.) при их соприкосновении в условиях турбулентного газового потока:

$$u_{\text{дпс}} = [3u_{\text{ж}} + 0,24(v_{\text{r}}\varepsilon)^{1/4}] \left(\frac{1}{1 + \omega_e \tau_{\text{ч}}} \right) \exp\left(-\frac{t}{\tau_{\text{ч}}}\right). \quad (5)$$

В работе А.Т. Литвинова [4]] для оценки величины коэффициента захвата «Е» частицы препятствием предложена следующая, характерная для потенциального обтекания, зависимость:

$$E = \frac{\text{Stk}}{\text{Stk} + 0,59}. \quad (6)$$

В работе А.Л. Фрумкина [5] показано, что максимальному значению величины «Е» (для частиц в диапазоне диаметров до 10 мкм) соответствует размер препятствия $D_{\text{пр}} = 10^{-4}$ м, который и может быть принят при расчете значений числа Stk .

С учетом этих данных, в настоящей работе предложен метод расчета эффективности улавливания пыли в циклонных аппаратах, основанный на использовании характеристик турбулентных течений и закономерностей процесса осаждения частиц пыли на препятствии (стенке циклона) в диффузионном пограничном слое.

Расчет эффективности улавливания пыли в циклонных аппаратах при этом выполняется в следующей последовательности:

$$d_{\text{эКВ}} = \frac{2ав}{(а + в)} D_{\text{ц}}; \quad (7)$$

$$\text{Re} = \frac{u_{\text{вх}} d_{\text{эКВ}}}{\nu_{\text{r}}}; \quad (8)$$

$$u_{\text{ж}} = \frac{0,354u_{\text{вх}}}{1,8 \lg \text{Re} - 1,64}; \quad (9)$$

$$\omega_e = \frac{u_{\text{ж}}}{0,1d_{\text{эКВ}}}; \quad (10)$$

$$\varepsilon = u_{\text{вх}}^3 / d_{\text{эКВ}}; \quad (11)$$

$$\tau_{\text{ч}} = \frac{\rho_{\text{п}} d_{\text{п}}^2}{18\nu_{\text{r}}}; \quad (12)$$

$$t_{\text{r}} = 4 \left(\frac{\nu_{\text{r}}}{\varepsilon^3} \right)^{1/2}; \quad (13)$$

$$u_{\text{дпс}} = [3u_{\text{ж}} + 0,24(v_{\text{r}}\varepsilon)^{1/4}] \left(\frac{1}{1 + \omega_e \tau_{\text{ч}}} \right) \exp\left(-\frac{t_{\text{r}}}{\tau_{\text{ч}}}\right); \quad (14)$$

$$\text{Stk} = \frac{d_{\text{п}}^2 u_{\text{дпс}} \rho_{\text{п}}}{18D_{\text{пр}} \nu_{\text{r}}}, \text{ (при } D_{\text{пр}} = 10^{-4} \text{ м)}; \quad (15)$$

$$E = \frac{\text{Stk}}{\text{Stk} + 0,95} \approx \eta_{\text{фр}}; \text{ (пофракционная степень очистки)}; \quad (16)$$

величина $d_{\eta 50}$ определяется методом последовательного приближения при решении уравнения $\text{Stk} = 0,59$, когда принимается, что $d_{\text{п}} = d_{\eta 50}$; величина $d_{\eta 50}^{(ж)}$, с учетом влияния величин $D_{\text{ц}}$ и $D_{\text{е}}$, рассчитывается по зависимости:

$$d_{\eta 50}^{(ж)} = d_{\eta 50} \cdot (D_{\text{е}}/0,59)(D_{\text{ц}}/0,6)^{1/4}, \quad (17)$$

где показатель степени «1/4» при отношении диаметра циклона $D_{\text{ц}}$ к диаметру циклона, равному 0,6 м, принят в соответствии с [7];

по величине $d_{\eta 50}^{(ж)}$ и зависимостям 1-3 определяется общая степень очистки в циклоне.

В табл. 3 приведены экспериментальные и рассчитанные по предложенной методике расчета значения величин $d_{\eta 50}^{\text{э}}$ и $d_{\eta 50}^{\text{р}}$ (определяющих эффективность очистки в циклонах [6]), для 19-ти наиболее известных различных циклонов.

Средняя ошибка оценки величины $d_{\eta 50}^{\text{р}}$ для приведенных в табл. 3 циклонов составила 7,52 %.

Табл. 3. Данные по оценке эффективности очистки в циклонах различных конструкций

Тип циклона	ЦН-15 [1]	ЦН-11 [1]	ЦН-24 [1]	ЦКТИ (Ц) [8]	МИОТ [9]	СК-ЦН-34М [1]	СК-ЦН-33 [1]	СК-ЦН-34 [1]	[10]	[11]
a	0,26	0,26	0,26	0,2	0,26	0,18	0,264	0,21	0,2	0,26
b	0,66	0,48	1,1	0,6	0,8	0,4	0,535	0,52	0,4	0,7
$D_{ц}$, м	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	1,6	0,6
$d_{эКВ}$, м	0,224	0,202	0,25	0,18	0,236	0,149	0,212	0,18	0,427	0,228
D_e	0,59	0,59	0,59	0,59	0,5	0,22	0,33	0,34	0,203	0,5
ζ	160	250	80	210	92	2000	600	1270	4420	115
ρ , кг/м ³	1930	1930	1930	1930	2650	1930	1930	1930	2300	2200
$v_r \cdot 10^6$, м ² /с	25	25	25	25	15,3	25	25	25	35,53	15,3
$u_{ср}$, м/с	3,5	3,5	3,5	3,3	5,4	3,5	3,5	3,5	1,6	4,77
$u_{вх}$, м/с	16	22	9,6	21,6	20,4	38,2	19,5	25,16	15,7	20,57
$d_{\eta 50}^p$ МКМ	4,5	3,65	8,5	4,12	2,75 ^ж)	1,13	2,31	1,95	2,27 ^ж)	3,0 ^ж)
$d_{\eta 50}^p$ МКМ	4,5	3,85	7,0	3,92	2,66 ^ж)	1, 15	2,35	1,99	2,1 ^ж)	2,91 ^ж)

Продолжение табл. 3

Тип циклона	СЦН-40 [12]	[13]	РИСИ [14]	УЦ-38 [15]	ВЦНИОТ [15]	[16]	[17]	[18]	[19]
a	0,16	0,2	0,25	0,25	0,26	0,223	0,182	0,104	0,2
b	0,38	0,4	0,5	0,28	1,0	0,41	0,527	0,586	0,52
$D_{ц}$, м	0,3	0,3	0,2	0,8	0,37	0,3	0,55	0,512	0,25
$d_{эКВ}$, м	0,067	0,08	0,07	0,211	0,153	0,087	0,149	0,0906	0,0722
D_e	0,4	0,187	0,5	0,38	0,5	0,325	0,545	0,533	0,48
ζ	1300	1900	237	1640	85	985	425	130	130
ρ , кг/м ³	2600	1000	2200	2650	2650	2650	2070	3100	2650

$v_r \cdot 10^6$, м ² /с	15,3	15,3	15,3	15,3	15,3	15,3	34,0	15,3	15,3
u_{cp} , м/с	1,6	1	2,8	1,3	3,5	2,33	3,6	3,2	3,4
u_{bx} , м/с	20,66	9,81	17,0	14,6	10,57	20	29,5	9,66	25,7
$d_{\eta 50}^p$, МКМ	1,39 ^{ж)}	1,27 ^{ж)}	2,4 ^{ж)}	2,4 ^{ж)}	3,37 ^{ж)}	1,85 ^{ж)}	3,0 ^{ж)}	2,79 ^{ж)}	1,64 ^{ж)}
$d_{\eta 50}^p$, МКМ	1,45 ^{ж)}	1,51 ^{ж)}	2,6 ^{ж)}	2,24 ^{ж)}	3,74 ^{ж)}	1,73 ^{ж)}	3,3 ^{ж)}	2,9 ^{ж)}	1,27 ^{ж)}

Для сравнения приведенных в табл. 3 результатов расчета, в табл. 4 приведены данные для расчета величин $d_{\eta 50}^p$ по предложенной НИИОгаз [6] зависимости:

$$d_{\eta 50}^p = 64,35 \cdot \zeta^{-0,51} \quad (18)$$

(для условий работы циклона: $D_{\text{ц}} = 0,6$ м; $V_r = 3,5$ м/с; $\mu_r = 22,2 \cdot 10^{-6}$ Па·с; $\rho_{\text{ч}} = 1930$ кг/м³); при необходимости пересчет на другие условия может быть осуществлен по формуле:

$$d_{\eta 50}^{ж)} = d_{\eta 50} \sqrt{\frac{D_{\text{ц}}^{ж)} \cdot 3,5}{0,6 \cdot V_{\text{ц}}^{ж)}} \cdot \frac{\mu_r^{ж)}}{22,2 \cdot 10^{-6}} \cdot \frac{1930}{\rho_{\text{п}}^{ж)}}}, \text{ МКМ}, \quad (19)$$

где величины, отмеченные знаком ^{ж)}, соответствуют реальным условиям работы циклонного золоуловителя.

Средняя ошибка при оценке величины $d_{\eta 50}^p$ по зависимости (18) для приведенных в табл. 4 циклонов (19 шт.) составила 21,46 %, что в 2,9 раза выше, чем при расчетах величины $d_{\eta 50}^p$ по зависимости (17).

Следует отметить, что, кроме высокой точности расчетов, предлагаемый метод расчета позволяет прогнозировать величину $d_{\eta 50}$ при изменении степени турбулентности газового потока на входе в циклон, что невыполнимо при использовании известных методов

Табл. 4. К оценке эффективности очистки в циклонах

№ циклона	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ζ	160	250	80	210	95	2000	600	1270	4420	115
$d_{\eta 50}^p$	4,5	3,65	8,5	4,12	2,75 ^{ж)}	1,15	2,35	2,73	2,27 ^{ж)}	3,0 ^{ж)}
$d_{\eta 50}^p$	4,77	3,85	6,88	4,21	3,67 ^{ж)}	1,39	2,57	1,75	2,5 ^{ж)}	3,82 ^{ж)}
Ошибка расчета, %	6,0	5,48	19,1	2,43	33,5	20,9	9,3	35,9	10,0	27,3

Продолжение табл. 4

№ циклона	11	12	13	14	15	16	17	18	19
ζ	1300	250	80	210	85	985	425	130	130
$d_{\eta 50}^p$	1,39 ^{ж)}	1,27 ^{ж)}	2,41 ^{ж)}	2,4 ^{ж)}	3,37	1,85 ^{ж)}	3,0 ^{ж)}	2,79 ^{ж)}	1,64 ^{ж)}
$d_{\eta 50}^p$	1,34	2,276	2,164	1,84	4,05	1,18	2,38	2,9 ^{ж)}	1,27 ^{ж)}
Ошибка расчета, %	3,6	44	10,37	23,33	20,17	36,42	20,67	10,75	65,8

Примечание: номера циклонов соответствуют нумерации в табл. 3.

расчетов циклонов.

Таким образом, предлагаемый метод позволяет с высокой точностью рассчитывать эффективность очистки в циклонах от промышленных пылей и значительно сократить затраты времени и объем экспериментальных работ при разработке новых видов золоуловителей или по их подбору при решении различных задач в области механики аэрозолей.

Выводы

Предложен метод расчета эффективности улавливания пыли в циклонных аппаратах, основанный на использовании характеристик турбулентных течений и закономерностей процесса осаждения частиц пыли на препятствии (стенке циклона) в диффузионном пограничном слое.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Справочник по пыле- и золоулавливанию.* / Под ред. А.А. Русанова. – М.: Энергоатомиздат. – 1983. – 312 с.
2. *Булгакова Н.Г., Янковский С.С.* Методика графоаналитического расчета полной и фракционной эффективности пылеулавливающих аппаратов // *Механическая очистка промышленных газов.* – М.: Машиностроение. – 1974. – С. 21.
3. *Приемов С.И.* Улавливание и рекуперация кормовых и пищевых аэрозолей мокрым коагуляционным методом // *Дисс...д.т.н.* – Л.: – 1990. – 366 с.
4. *Литвинов А.Т.* Об оценке эффекта захвата крупными частицами или каплями жидкости мелких частиц и о влиянии гидрофильности частиц на коэффициент захвата // *Инж. - физ. журн.* – 1969. – Т. 16. – № 6. – С. 1052–1061.
5. *Фрумкин А.Л.* Некоторые вопросы теории очистки рудничного воздуха от витающей пыли при помощи орошения // *Изв. АН СССР, ОНТ.* – 1955. – № 11. – С. 129–134.
6. *Вальдберг А.Ю., Курсанова Н.С.* К расчету эффективности циклонных пылеуловителей // *Теор. Основы хим. технологии.* – 1989. – Т. 23. – № 4. – С. 555–556.
7. *Польковский Г.Б., Бляхер И.Г., Савицкая Л.Ф.* Исследование влияния отношения диаметра выхлопной трубы к диаметру циклона, расчет его сопротивления и повышение эффективности // *Труды УНИХИМ.* – 1982. – вып. 54. – С. 16 – 20.
8. *Курсанова Н.С.* Новые исследования в области центробежной сепарации пыли. Обз. информ. НИИОгаз // *ЦНИНТИХИМНЕФТЕМАШ.* – М.: – 1989. – 58 с.
9. *Самсонов В.Т.* Универсальный циклон МИОТ // *Водоснабжение и санитарная техника.* – 1992. – № 4. – С. 17–19.
10. *Дубинская Ф.Е., Пантюхов Н.А., Вальдберг А.Ю., Падва В.Ю.* Очистка газов чугунолитейных вагранок // *Пром. энергетика* – 1982. – № 10. – С. 45–46.
11. *Приемов С.И.* Новый метод расчета эффективности пыле- и золоулавливания и гидравлического сопротивления циклонных аппаратов // *Экотехнологии и ресурсосбережение.* – 2000. – № 3. – С. 76–78.
12. *Карпухович Д.Т.* Влияние относительной высоты цилиндрической части корпуса циклона на его характеристики // *Химическое и нефтяное машиностроение.* – 1986. – № 10. – С. 17–18.
13. *Вальдберг А.Ю., Курсанова Н.С.* Практическая реализация вероятностно-энергетического метода расчета центробежных пылеуловителей // *Химическое и нефтяное машиностроение.* – 1994. – № 9. – С. 26–28.
14. *Приемов С.И.* Сравнительный анализ методов интенсификации улавливания золы в циклонных аппаратах // *Экотехнологии и ресурсосбережение.* – 2001. – № 2. – С. 73–76.
15. *Коузов П.А.* Сравнительная оценка эффективности циклонов различных типов // *Науч. работы институтов охраны труда ВЦСПС* – 1969. – вып. 60. – С. 6–13.
16. *Gloger und Gunter Niendorf.* Untersuchung an einem Modellzyklon über den Eifluss über verschiedene geometrischer parameter auf Abscheidegrad und Druckverlust // *Chem. Heft Techn., 22. Jq. Heft 9* – September – 1970 – P. 525–532.

17. *Приемов С.И.* Расчет и разработка системы золоулавливания парового котла ДКВР–10/13 при сжигании шелухи гречихи // Пром. теплотехника. – 2003. – Т. 25. – № 5. – С. 50–53.

18. *Лузин П.М., Мацнев В.В., Резник В.А. и др.* Разработка и результаты промышленных испытаний батарейных золоуловителей новой

конструкции // Теплоэнергетика. – 1982. – № 1. – С. 52–55.

19. *Новиков Л.М., Инюшкин Н.В., Ведерников В.Б.* Сравнительные испытания прямоточного циклона и циклона НИИОгаз типа ЦН–15 // Химическая промышленность. 1980. – № 1. – С. 50.

Получено 14.01.2011 г.