

УДК 621.928.9

Приемов С.И.

Институт пищевой биотехнологии и геномики НАН Украины

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОЛМОГОРОВСКОЙ ТЕОРИИ ТУРБУЛЕНТНОСТИ ДЛЯ РАСЧЕТА ЭФФЕКТИВНОСТИ УЛАВЛИВАНИЯ ПЫЛИ В ЦИКЛОНАХ

Запропоновано новий метод розрахунку ефективності вловлювання аерозолів в циклонних апаратах. Метод заснований на використанні колмогоровського мікромасштабу турбулентності.

Предложен новый метод расчета эффективности улавливания аэрозолей в циклонных аппаратах. Метод основан на использовании колмогоровского микромасштаба турбулентности.

A new method of calculation of the efficiency of aerosols recovery in cyclonis proposed. Metod is based on the use of kolmogorov microscale of turbulence.

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

$D_{ц}$ – диаметр циклона;

$D_{е}$ – диаметр выхлопного патрубка циклона, отнесенный к его диаметру;

d_{50} – медианный диаметр пыли;

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

u – скорость газа во входном патрубке циклона;

ε – скорость диссипации турбулентной энергии, равная $\varepsilon = u^3 / d_{экв}^2$;

η – эффективность очистки;

λ_0 – внутренний колмогоровский микромасштаб

турбулентности, равный $\lambda_0 = (v_{г}^3 / \varepsilon)^{0,25}$;

ν – коэффициент кинематической вязкости;

ρ – плотность;

ζ – коэффициент гидравлического сопротивления;

σ – стандартное отклонение распределения частиц пыли по размерам;

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

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

v – высота входного патрубка циклона, отнесенная к его диаметру.

Индексы верхние:

p – расчет;

ε – эксперимент;

таб – табличный.

Индексы нижние:

vx – на входе в циклон(во входном патрубке);

$г$ – газ;

$п$ – пыль;

экв – эквивалентный.

Циклонные пыле-золоуловители являются одними из наиболее распространенных в различных отраслях промышленности пылеуловителей, поэтому актуальным является повышенный 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 подлежащей определению величиной.

По двум этим параметрам, а также двум параметрам дисперсности улавливаемой пыли (d_{50}, σ_n), определяется величина расчетного параметра t [1]:

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

Общая степень очистки газового потока от пыли в циклоне окончательно рассчитывается по зависимости [1]:

$$h_{\text{общ}} = \Phi(t) = \frac{1}{2} \pi (\exp)^{\frac{t}{2}} dt, \quad (2)$$

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

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

Ошибки при использовании зависимостей (3) и (4) невелики и соответственно составляют 0,3 и 0,07 %.

Ранее [3], для механических скрубберов и скрубберов Вентури было установлено определяющее влияние на эффективность улавливания пыли параметра λ_0 , который по физическому смыслу является размером вихрей, для которых силы инерции и силы вязкости находятся в равновесии, то есть примерно равны. Это означает, что существуют вихри и меньшие, чем λ_0 , но они быстрее гасятся вязкостью, чем передают энергию еще более мелким вихрям.

Однородная и изотропная турбулентность является наиболее изученной, хотя использование такой модели турбулентности недостаточно корректно для описания реальных турбулентных течений, так как предположения об однородности и изотропности в таких течениях никогда не выполняются. Однако установлено, что совокупность мелкомасштабных возмущений (при числах Рейнольдса, намного превосходящим критическое значение) в малых по размерам пространственно-временных областях будет практически всегда однородной и изотропной. Поэтому реальную турбулентность, можно считать обладающей определенными свойствами, родственными изотропии.

А.Н. Колмогоров разработал теорию локально-изотропной турбулентности, в соответствии с которой статистические характеристики высокочастотной турбулентности с большим числом Рейнольдса полностью определяются в соответствии с выражениями:

$$\varepsilon = \frac{u_{\Gamma}^3}{d_{\text{ЭКВ}}}; \quad (5)$$

где $\Phi(t)$ – интеграл Гаусса, определяемый по специальным вероятностным таблицам [1] или по полученным в данной работе следующим зависимостям:

$$\lambda_0 = \left(\frac{v_{\Gamma}^3}{\varepsilon} \right)^{0,25}. \quad (6)$$

В настоящей работе, основываясь на результатах работы [4], предложен метод расчета эффективности улавливания пыли в циклонных аппаратах, основанный на использовании определяющего влияния на эффективность улавливания пыли величины λ_0 , рассчитываемой для условий входного патрубка циклона.

Целью работы является усовершенствование метода инженерного расчета циклонных пылеуловителей.

В табл. 1 и 2 приведены наиболее надежные экспериментальные данные для получивших наибольшее распространение в промышленности различных конструкций циклонов и расчетные значения величин $d_{\eta=50}^3$ и $d_{\eta=50}^p$, определяющих эффективность очистки в циклонах [7].

О значительном влиянии величины λ_0 на эффективность улавливания пыли можно судить по высокому значению коэффициентов корреляции между величинами λ_0 и $d_{\eta=50}^3$, которые для приведенных в табл. 1 циклонов составил: 0,985 и 0,76 – для циклонов табл. 2.

Это свидетельствует о том, что как и статистические характеристики высокочастотной турбулентности с большим числом Рейнольдса, так и величина параметра пофракционной степени очистки в циклонах $d_{\eta=50}^3$ определяются тремя величинами: коэффициентом вязкости несущей среды, ее плотностью и средней скоростью диссипации кинетической энергии ε .

Величины $d_{\eta=50}^3$ в табл. 1 рассчитывались по полученной из формулы (1) зависимости:

$$d_{\eta=50}^3 = (10)^{\lg d_{50} - t (\lg^2 \sigma_{\Pi} - \lg^2 \sigma_{\Pi})^{0,5}}. \quad (7)$$

Табл. 1. Данные по оценке эффективности очистки в циклонах с цилиндро-конической формой корпуса ($u_{cp} = 3,5$ м/с, $v_{\Gamma} \cdot 10^6 = 22,2$ Па·с/м², $D_{ц} = 0,6$ м, $\rho_{п} = 1930$ кг/м³)

Тип циклона	ЦН-15 [1]	ЦН-11 [1]	ЦН-24 [1]	ЦКТИ(Ц) [8]
$\lambda_0 \cdot 10^6$	30	23	52,7	21,7
$d_{\eta=50}^3$	4,5	3,65	8,5	4,12

Табл. 2. Данные по оценке эффективности очистки в циклонах с цилиндро-конической формой корпуса и разными технологическими параметрами

Циклон	ЦН-15 [1]	ЦН-11 [1]	ЦН-24 [1]	ЦКТИ(Ц) [8]	МИОТ [9]	4БЦШ [10]	[11]	[10]	[12]	[10]
a	0,26	0,26	0,26	0,2	0,26	0,197	0,18	0,26	0,26	0,26
b	0,66	0,48	1,1	0,6	0,8	0,39	0,53	0,66	0,7	0,48
u_{cp}	3,5	3,5	3,5	3,3	5,4	1,77	3,6	4,1	4,77	3,6
$u_{вх}$	16	22	9,6	21,6	20,4	11,95	29,5	18,8	20,57	22,7
$v_{\Gamma} \cdot 10^6$	25	25	25	25	15,3	15,3	34,0	15,3	15,3	15,3
$D_{ц}$	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,3	0,55	0,45	0,6	0,5
$\rho_{п} \cdot 10^3$	1,93	1,93	1,93	1,93	2,65	2,65	2,07	2,65	2,2	2,65
$d_{эКВ}$	0,23	0,20	0,25	0,18	0,24	0,089	0,15	0,17	0,227	0,17
d_{50}	—	—	—	—	35	8,0	3,6	8,0	14,0	12,0
$\sigma_{п}$	—	—	—	—	4,6	4,0	5,0	4,0	2,1	4,0
$\eta^3, \%$					93,7	78,0	54,4	75,0	94,9	84,0
$\eta^p, \%$ (9)	—	—	—	—	94,2	79,0	53,2	75,8	94,74	85,3
$\eta^p, \%$ (8)					94,3	78,4	52,0	75,8	94,74	85,6
D_e	0,59	0,59	0,59	0,5	0,5	0,6	0,545	0,6	0,5	0,59
t^3	—	—	—	—	1,53	0,77	0,11	0,67	1,64	0,99
$d_{\eta=50}^3$	4,5	3,65	8,5	4,12	2,7	2,54	2,953	2,82	2,322	2,453
$d_{\eta=50}^p$ (9)	4,5	3,69	6,87	3,53	2,49	2,394	3,12	2,56	2,37	2,2
$d_{\eta=50}^p$ (8)	5,0	3,9	8,65	3,69	2,51	2,47	3,24	2,56	2,38	2,15
$\lambda_0 \cdot 10^6$	30	23	52,7	21,7	17,8	14,38	21,9	17,4	17,4	15,1

Величины $d_{\eta=50}^P$ в табл.1 рассчитывались по следующим зависимостям:

$$d_{\eta=50}^P = (d_{\eta=50}^3)_{\text{ЦН-15}} \cdot (\lambda_0 / \lambda_{0\text{ЦН-15}})^{3/4} \cdot (D_{\text{ц}}/0,6)^{1/4} \cdot (1930/\rho_{\text{п}})^{1/2} \cdot (D_{\text{е}}/0,59), \text{ мкм}; \quad (8)$$

$$d_{\eta=50}^P = (0,16 \cdot \lambda_0 \cdot 10^6 + 0,22) \cdot (D_{\text{ц}}/0,6)^{1/4} \cdot (1930/\rho_{\text{п}})^{1/2} \cdot (D_{\text{е}}/0,59), \text{ мкм}; \quad (9)$$

или после подстановки в зависимость (5) экспериментальных значений

$d_{\eta=50}^3$ и λ_0 для циклона ЦН–15:

$$d_{\eta=50}^P = 4,5 \cdot (\lambda_0/30 \cdot 10^{-6})^{3/4} \cdot (D_{\text{ц}}/0,6)^{1/4} \cdot (1930/\rho_{\text{п}})^{1/2} \cdot (D_{\text{е}}/0,59), \text{ мкм}. \quad (10)$$

Ошибка оценки величины $d_{\eta=50}^P$ по уравнению (10) для приведенных в табл. 1 циклонов составила 8,44 % и 8,73 % – по уравнению (9), что соответствует величине средней ошибки 0,45 % при оценке расчетных значений η^P .

С учетом этого, а также того обстоятельства, что величины отклонений в расчетах «уноса» пыли для циклонов не должны превышать 15 % [13], можно сделать вывод о возможности выполнения расчетов величины $d_{\eta=50}^P$ по зависимостям (9) и (10).

Циклоны с конической формой корпуса более высокоэффективны, чем циклоны с цилиндро-конической формой корпуса, и имеют иную зависимость между $d_{\eta=50}^3$ и λ_0 , что и было отмечено в [12] при описании зависимости $d_{\eta=50}^3$ от интегрального параметра закрутки. Для таких циклонов коэффициент корреляции между величинами λ_0 и $d_{\eta=50}^3$ также весьма

высок и составляет величину 0,986 для приведенных в табл. 3 циклонов с одинаковыми технологическими параметрами ($u_{\text{ср}} = 3,5$ м/с; $v_{\text{г}} \cdot 10^6 = 22,3$; $D_{\text{ц}} = 0,6$ м; $\rho_{\text{п}} = 1930$ кг/м³).

Для оценки зависимости величины $d_{\eta=50}^3$ от λ_0 в табл. 4 приведены наиболее надежные экспериментальные данные для получивших наибольшее распространение в промышленности различных конструкций конических циклонов и соответствующие им расчетные значения величин $d_{\eta=50}^3$ и $d_{\eta=50}^P$.

О значительном влиянии величины на эффективность улавливания пыли можно судить по высокому значению коэффициента корреляции между величинами λ_0 и $d_{\eta=50}^3$, который для приведенных в табл. 4 циклонов с разными технологическими параметрами ($u_{\text{ср}}$, $v_{\text{г}}$, $D_{\text{ц}}$, $\rho_{\text{п}}$) составил 0,76.

Величины $d_{\eta=50}^P$ в табл. 4 рассчитывались по зависимости:

$$d_{\eta=50}^P = (0,052 \cdot \lambda_0 \cdot 10^6 + 0,95) (D_{\text{е}}/0,34) (1930/\rho_{\text{п}})^{1/2} (D_{\text{ц}}/0,6)^{1/4}, \text{ мкм} \quad (11)$$

Средняя ошибка при оценке величины $d_{\eta=50}^P$ по зависимости (11) для приведенных в табл. 4 циклонов (7 шт.) составила 5,25 %.

Для сравнения результатов расчета по (9) и (10) в табл. 5 приведены данные для расчета величин $d_{\eta=50}^P$ по предложенной НИИОгаз

зависимости :

$$d_{\eta=50}^P = 64,35 \cdot \zeta^{-0,51} \quad (12)$$

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

Табл. 3. Данные по оценке эффективности очистки в циклонах с конической формой корпуса

Тип циклона	СК–ЦН–33 [1]	СК–ЦН–34 [1]	СК–ЦН–34М [1]
$\lambda_0 \cdot 10^6$	22,94	21,64	14,306
$d_{\eta=50}^3$	2,31	1,95	1,13

осуществлен по формуле:

$$d_{\eta 50}^{ж)} = d_{\eta 50} \sqrt{\frac{D_{ц}^{ж)} \cdot 3,5}{0,6 \cdot V_{ц}^{ж)}} \cdot \frac{\mu_{г}^{ж)}}{22,2 \cdot 10^{-6}} \cdot \frac{1930}{\rho_{п}^{ж)}}}, \text{ мкм} \quad (13)$$

где величины, отмеченные знаком $ж)$, соответствуют реальным условиям работы циклонного золоуловителя.

Средняя ошибка при оценке величины $d_{\eta=50}^p$ по зависимостям (12) и (13) для приведенных в табл. 5 циклонов (10 шт.) составила 37,6 %, что, примерно, в 4,5 раза выше, чем при расчетах величины $d_{\eta=50}^p$ по зависимости (9).

Следует отметить, что, кроме более высокой точности расчетов, зависимости (9–11)

позволяют прогнозировать величину $d_{\eta=50}$ при изменении степени турбулентности газового потока на входе в циклон, что невыполнимо при использовании других известных методов расчетов циклонов.

Предлагаемый метод расчета позволяет значительно сократить затраты времени и объем экспериментальных работ при разработке новых видов золоуловителей или их подбору при решении различных задач в области механики аэрозолей.

Табл. 4. Данные по оценке эффективности очистки в циклонах с конической формой корпуса и с разными технологическими параметрами

Тип циклона	СК–ЦН–33 [14]	СК–ЦН–34 [14]	УЦ–38 [10]	[16]	[15]	СЦН–40 [16]	[17]
a	0,264	0,214	0,255	0,2	0,2	0,16	0,2
b	0,535	0,515	0,255	0,4	0,4	0,38	0,4
u_{cp}	2	1,6	1,327	1,6	1,8	1,6	1,6
$u_{вх}$	11,11	11,4	16	15,7	17,7	11,4	15,7
$v_{г} \cdot 10^6$	15,3	15,3	15,3	15,3	91,57	15,3	34,0
$D_{ц}$	0,3	0,3	0,8	0,3	0,3	0,3	1,6
$\rho_{п}$	2670	2670	2670	1000	1000	2600	2300
d_{50}	13	13	8	12	20	12	13
$\sigma_{п}$	3,5	3,5	3,5	1,85	2,0	3,6	4,67
D_e	0,33	0,34	0,38	0,187	0,187	0,4	0,187
$d_{эКВ}$	0,106	0,0907	0,204	0,08	0,08	0,068	0,427
$\lambda_0 \cdot 10^6$	22,94	21,64	20,53	16,5	57,7	12,87	45,62
$d_{\eta=50}^2$	1,8	1,723	2,032	1,076	2,38	1,21	2,16
$d_{\eta=50}^p$	1,54	1,66	2,067	1,16	2,5	1,36	2,14

Табл. 5. Данные по оценке эффективности очистки в циклонах по (12) и (13)

Тип циклона	ЦН-15 [1]	ЦН-11 [1]	ЦН-24 [1]	ЦКТИ (Ц) [8]	МИОТ [9]	4БЦШ [10]	[11]	[10]	[12]	[10]
ζ	160	250	80	210	95	200	985	225	212	115
$d_{\eta=50}^{\circ}$	4,5	3,65	8,5	4,12	2,75 ^{ж)}	2,53 ^{ж)}	2,36 ^{ж)}	2,73 ^{ж)}	2,27 ^{ж)}	3,0 ^{ж)}
$d_{\eta=50}^p$	4,77	3,85	6,88	4,21	6,4	2,616	1,94	4,064	4,19	5,72
Ошибка расчета, %	6	5,48	19,1	2,43	164	3,36	39	66,2	7,8	62,64

Выводы

Предложен метод расчета эффективности улавливания различных аэрозолей в циклонных пылеуловителях, основанный на использовании определяющего влияния на эффективность пылеулавливания величины внутреннего колмогоровского микромасштаба турбулентности, рассчитываемого по условиям во входном патрубке циклона.

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. – 21 с.
3. *Приемов С.И.* Улавливание и рекуперация кормовых и пищевых аэрозолей мокрым коагуляционным методом. // *Автореф...докт. техн. наук.* – Л.: – 1990. – 33 с.
4. *Колмогоров А.Н.* Локальная структура турбулентности в несжимаемой вязкой жидкости при очень больших числах Рейнольдса // *Докл. СССР.* – 1941. – № 30. – С. 299-303.
5. *Самсонов В.Т.* Об изучении на моделях явления пылеобразования при падении пылящих материалов // *Научные работы институтов охраны труда ВЦСПС.* – № 6. – 1964.

6. *Хинце И.О.* Турбулентность: ее механизм и теория / М.: Физматгиз. – 1963. – 680 с.

7. *Вальдберг А.Ю., Кирсанова Н.С.* К расчету эффективности циклонных пылеуловителей // *Теор. основы хим. технологии.* – 1989. – Т. 23. – № 4 – С. 555-556.

8. *Кирсанова 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. *Коузов П.А.* Сравнительная оценка эффективности циклонов различных типов // *Науч. работы институтов охраны труда ВЦСПС.* – вып. 60. – 1969. – С. 3-13.

11. *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.

12. *Приемов С.И.* Новый метод расчета эффективности пыле- и золоулавливания и гидравлического сопротивления циклонных аппаратов // *Экотехнология и ресурсосбережение.* – 2000. – № 3. – С. 76-78.

13. *Коузов П.А., Мальгин А.Д., Скрыбин Г.М.* Очистка от пыли газов и воздуха в химической промышленности. – Л.: Химия. – 1982. – 256 с.

14. *Банит Ф.Г., Мальгин А.Д.* Пылеулавливание и очистка газов в промышленности строи-

тельных материалов. М.: Стройиздат. – 1979. – 351 с.

15. *Вальдберг А.Ю., Кирсанова И.С.* Практическая реализация вероятностно-энергетического метода расчета центробежных пылеуловителей // Хим. и нефт. машиностроение. – 1994. – № 9. – С. 26-28.

16. *Карпухович Д.Т.* О влиянии формы корпуса циклона на характеристики эффективности улавливания и гидравлическое сопротивление // Теплоэнергетика. – 1987. – № 5. – С. 65-67.

17. *Дубинская Ф.Е., Пантюхов Н.А., Вальдберг А.Ю., Падва В.Ю.* Очистка газов чугунолитейных вагранок // Промышленная энергетика. – 1982. – № 10. – С. 45-46.

Получено 14.01.2011 г.