

ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ САМАРСКОЙ ОБЛАСТИ
«НОВОКУЙБЫШЕВСКИЙ НЕФТЕХИМИЧЕСКИЙ ТЕХНИКУМ»

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель директора по УР

_____ В. Б. Семисаженова

«_____» _____ 2015 г.

**РАСЧЕТ ЦИКЛОНА ДЛЯ ОЧИСТКИ ОТХОДЯЩИХ ГАЗОВ ОТ
ВЗВЕШЕННЫХ ВЕЩЕСТВ**

Методические указания
для студентов по специальности 18.02.06 Химическая технология органических веществ и
18.02.09 Переработка нефти и газа

Новокуйбышевск

2015 г.

В данном пособии предложен метод расчета циклона для улавливания взвешенных веществ из отходящих газов.

Учебное пособие имеет практическую значимость для обучающихся по специальностям 18.02.09 Переработка нефти и газа и 18.02.06 Химическая технология органических веществ.

Предназначены для учебной, проектно - конструкторской работы учащихся и преподавателей ГАПОУ СО «ННХТ».

СОГЛАСОВАНО

Предметно - цикловой комиссией

Председатель _____ М. В. Коряковская

Протокол № ____ от « ____ » _____ 2015 г.

Составитель: Коряковская М. В. – преподаватель спец. дисциплин ГАПОУ СО «ННХТ» г. Новокуйбышевска

Эксперты:

Внутренняя экспертиза:

Техническая экспертиза: Ю. Н. Федотенкова – преподаватель спец. дисциплин ГАПОУ СО «ННХТ»

Содержательная экспертиза: О. Д. Щелкова – зам. директора по НМР ГАПОУ СО «ННХТ»

Наиболее распространенным методом очистки газов от взвешенных веществ является очистка в центробежном поле, а в качестве устройств, в которых обеспечивается улов – циклоны. Но следует отметить, что в связи с усилением экологических требований, область их применения постоянно сужается. Поэтому, их рекомендуется применять для предварительной очистки и устанавливать перед устройствами с более высокой степенью очистки, например, фильтрами. Возможно их использование в качестве брызгоуловителей для сепарации жидкости некоторых способов мокрой очистки газовых выбросов.

Самостоятельно циклоны следует применять, когда требуется относительно невысокая степень очистки газов с размерами частиц более 10 мкм.

Для обоснованного выбора метода очистки и выполнения расчетов, следует рассмотреть некоторые физические явления, происходящие в циклоне и обеспечивающие разделение газового потока от взвешенных загрязнителей.

Запыленный газ подается в циклон тангенциально или через завихрители, что придает газовому потоку внутри устройства вращательно-поступательное движение. На частицы, взвешенные в потоке газа, действует сила инерции, которая стремится сместить их с линии тока по касательным, направленным под некоторым углом вниз и к стенке циклона. Частицы, контактируя с внутренней поверхностью корпуса, под действием силы тяжести, инерции и в связи с падением кинетической энергии потока, опускаются вниз и падают в приемный бункер. Частицы меньших размеров, не достигшие стенки продолжая траекторию движения, выносятся из циклона с газовым потоком.

Траектория движения основной массы взвешенных частиц представляет собой пространственно-расширяющуюся спираль. Величину силы инерции можно принять пропорциональной квадрату тангенциальной скорости, массе частицы и обратно пропорциональной радиусу вращения. На основании экспериментальных данных, при радиусе вращения до метра и тангенциальной скорости 10-15 м/с, сила инерции на порядок превосходит гравитационную

составляющую, что объясняет факт более интенсивной сепарации частиц в циклонах, чем в гравитационных устройствах.

Так как инерционная составляющая пропорциональна массе, то мелкие частицы в циклоне улавливаются плохо. Улов частиц размерами более 10 мкм составляет от 80 до 95, а более мелкие – намного хуже. Увеличить эффективность осаждения частиц мелких размеров за счет уменьшения диаметра и увеличения скорости определяется технико-экономическими факторами, такими, как рост сопротивления и некоторого снижения эффекта очистки за счет вторичного захвата отсепарированных частиц; абразивный износ и др.

В циклонах наблюдаются сложные потоки, аэродинамические параметры которых постоянно меняются. Методы теоретических расчетов из-за значительного расхождения результатов с опытными данными неприемлемы для практического использования. Поэтому, из широко применяемых методов используют метод, выполненный по схеме последовательных приближений, который рассматривается ниже. Идея данного метода, его алгоритм, изложен в «Справочник по пыле- и золоулавливанию» под ред. А. А. Русанова - М., Энергоиздат, 1983.

1. Расчет начинается с принятия типа циклона и определения его диаметра D :

$$D = \sqrt{\frac{Q}{0,785W_{opt} \cdot N}}, \text{ м}$$

где Q – объемный расход очищаемого газа, м³/ч (q , м³/с),

W_{opt} – оптимальная усредненная скорость потока, м/с,

N – число циклонов.

W_{opt} принимают по опытными данным (табл.1). Полученное расчетное значение диаметра округляется до стандартного диаметра.

2. Рассчитывается скорость потока в циклоне стандартного диаметра d .

$$W = \frac{q}{3600 \cdot 0,785 \cdot d^2 \cdot N}, \text{ м/с}$$

Если полученное значение скорости более чем на 15% отличается от оптимальной, принимается другой типоразмер циклона.

3. Определяется коэффициент гидравлического сопротивления циклона:

$$\xi = K_1 K_2 \xi_{500} + K_3$$

где K_1, K_2, K_3 – поправочные коэффициенты на диаметр,

K_1 – поправочный коэффициент, зависящий от диаметра циклона (табл.2)

K_2 – поправочный коэффициент, учитывающий запыленность газа (табл.3)

K_3 – коэффициент, учитывающий дополнительные потери давления, связанные с компоновкой циклонов в группу (для одиночных циклонов $K_3=0$) (табл.4).

ξ_{500} – коэффициент гидравлического сопротивления циклона диаметром 500 мм.

4. Рассчитываются потери давления в циклоне:

$$\Delta P = \frac{\xi \rho W^2}{2}, \text{ Па}$$

где ρ - плотность газа-носителя, кг/м³.

Если расчетная величина сопротивления оказалась приемлемой, т.е. обеспечивается напором принимаемого вентилятора в данной системе очистки, то переходят к расчету степени очистки.

5. Определяется параметр осаждения:

$$X = \frac{lq \frac{D_m}{D_{50}}}{\sqrt{lq^2 \sigma_r + lq^2 \sigma}}$$

где D_{50}, σ_r – средний диаметр и дисперсия осаждаемых частиц, принимаемые по справочным данным.

D_m – медиальный диаметр частиц, мкм,

σ – стандартное отклонение величины логарифма диаметра частицы (дисперсия).

При проектировании на конкретные условия D_{50} можно рассчитать:

$$D_{50} = D_{50z} \sqrt{\frac{D}{D_z} \cdot \frac{\rho_{pz}}{\rho_z} \cdot \frac{\eta}{\eta_z} \cdot \frac{W_z}{W}}$$

где $D_{50z}, D_z, \rho_{pz}, \eta_z, W_z$ – соответственно средний диаметр осаждаемых частиц, диаметр циклона, плотность частиц, динамическая вязкость и скорость газового потока, принимаемые по справочным данным.

6. По параметру X из таблицы (4) определяется величина интеграла вероятностей $\Phi(x)$ и принимают ее численно равной полному коэффициенту очистки.

7. Если степень очистки недостаточная, то применяя другой циклон с более высоким гидравлическим сопротивлением, расчет выполняют заново. Ориентировочно требуемое ΔP может быть найдено:

$$\xi = \xi_p \left(\frac{100 - \eta_p}{100 - \eta} \right)^2 \cdot \frac{W_p}{W} \cdot \frac{D}{D_p}$$

где ξ_p – требуемая расчетная величина коэффициента сопротивления.

В качестве примера рассматривается расчет циклона для очистки отходящих газов после сжигания топлива на основе угля. При этом зола в составе дымовых газов имеет следующие параметры:

$$D_m = 20 \text{ мкм}; \sigma = 3; \rho_p = 2240 \text{ кг/м}^3; P=50 \text{ Па}; T=140^\circ\text{C}$$

Расход отходящих газов $Q = 10000 \text{ м}^3/\text{ч}$ ($q = 2,78 \text{ м}^3/\text{с}$).

Зольность 42 г/м^3 . Содержание в продуктах сгорания $\text{CO}_2 - 12,1\% \text{ об.}$ $\text{SO}_2 - 0,2\% \text{ об.}$ $\text{N}_2 = 73,6\% \text{ об.}$ $\text{O}_2 - 5,5\% \text{ об.}$ $\text{H}_2\text{O} - 8,6\% \text{ об.}$

Эффективность очистки 99% .

1. Принимают тип циклона возвратно-поточный типа ЦН-II. По данным таблицы 1 принимается оптимальная скорость потока $W_{\text{опт.}} = 3,5 \text{ м/с}$.

Таблица 1- Параметры, определяющие эффективность циклонов

Характеристики	Марки циклонов										
	ЦН-24	ЦН-15У	ЦН-15	ЦН-11	СДК ЦН-33	СДК ЦН-34	СДК ЦН-34М	СИОТ	ВЦН ИИ ОТ	Ц	Клайпеда
$W_{\text{опт.}}$ м/с	4,5	3,5	3,5	3,5	2	1,7	2	1	4	3,3	1,1
D_{50} мкм	8,5	6	4,5	3,65	2,31	1,95	1,13	2,6	8,6	4,12	3,1
$Ig \sigma_\eta$	0,308	0,283	0,352	0,352	0,364	0,308	0,34	0,28	0,32	0,34	0,25

Рассчитывается диаметр циклона:

$$D_{\text{оп}} = \sqrt{\frac{1000}{3600 \cdot 0,785 \cdot 3,5 \cdot 1}} = 1,005 \text{ м}$$

В соответствии с ГОСТом 9617-67 для циклонов принят ряд диаметров: 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000, 1200, 1400, 1600, 1800, 2000, 2400 и 3000 мм.

Принимается стандартный диаметр циклона $D=1000 \text{ мм}$.

2. Рассчитывается скорость потока для циклона диаметром 1000 мм

$$W = \frac{2,78}{0,785 \cdot 1^2 \cdot 1} = 3,54 \text{ м/с}$$

3. Принимаются значения параметров сопротивления для циклона ЦН-11, работающего на выхлоп в атмосферу, по таблицам 2-5 и определяется коэффициент гидравлического сопротивления:

$$\xi = 1 \cdot 0,92 \cdot 250 + 0 = 230$$

Таблица 1- Коэффициенты гидравлического сопротивления циклонов

Марка циклона	D _г /D	Циклоны с выходом в сеть				Циклоны с выхлопом в атмосферу
		через улитку	через отвод 90°		без дополнительных устройств	
			при l/d ≤ 12	при l/d > 12		
ЦН-11	0,59	235	245	250	245	250
ЦН-15	0,59	150	155	160	155	163
ЦН-15У	0,59	158	165	170	165	170
ЦН-24	0,59	73	75	80	75	80
СДК-ЦН-33	0,33	500	-	560	520	600
СК-ЦН-34	0,34	-	-	-	1050	1150
СК-ЦН-34М	0,22	-	-	-	-	2800
СИОТ	0,392	1400	-	-	-	-
ВЦНИИОТ	0,5	-	-	-	-	75
Ц	0,6	-	-	-	-	210
«Клайпеда»	0,59	-	-	-	-	1300

Таблица 2 - Поправочный коэффициент K_1 на диаметр циклона

D, мм	Марка циклона		
	ЦН-11	ЦН-15, 15У, 24	СДК-ЦН-33, СК-ЦН-34, -34М
150	0,94	0,85	1,0
200	0,95	0,9	1,0
300	0,96	0,93	1,0
400	0,99	1,0	1,0
450	0,99	1,0	1,0
500	1,0	1,0	1,0

Таблица 3- Поправочный коэффициент K_2 , учитывающий запыленность газа

Марка циклона	Запыленность газа, г/м ²						
	< 0,1	10	20	40	80	120	150
ЦН-11	1	0,96	0,94	0,92	0,90	0,87	0,85
ЦН-15	1	0,93	0,92	0,91	0,90	0,87	0,86
ЦН –15У	1	0,93	0,92	0,91	0,89	0,88	0,87
ЦН-24	1	0,95	0,93	0,92	0,9	0,87	0,86
СДК-ЦН-33	1	0,81	0,785	0,78	0,77	0,76	0,745
СК-ЦН-34	1	0,98	0,947	0,93	0,915	0,91	0,90
СК-ЦН-34М	1	0,99	0,97	0,96	-	-	-

Таблица 4- Поправочный коэффициент K_3 на способ компоновки группы

Характеристика компоновки	K_3
Круговая компоновка, нижний подвод очищаемых газов к каждому циклону	60
Прямоугольная компоновка, подвод газов в общую камеру	60
Прямоугольная компоновка, отвод газов из общей камеры	35
Прямоугольная компоновка, улиточный отвод от каждого циклона	28

4. Используя правило аддитивности, рассчитывается плотность дымовых газов заданного состава при нормальных условия. Значения плотностей ингредиентов приводятся в табл.5

Таблица 5- Качественный и количественный составы дымовых газов

Ингредиенты	CO ₂	SO ₂	N ₂	O ₂	H ₂ O
r(дол.об.)	0,121	0,002	0,736	0,055	0,086
$\eta \cdot 10^6$, Па·с	13,7	11,7	17	20,3	10
T ⁰ , К	304,2	430,7	126	154,3	647,15
k	254	396	114	131	961

$$\rho = 0,01 (12,1\rho_{\text{co}_2} + 0,2\rho_{\text{so}_2} + 73,6\rho_{\text{N}_2} + 5,5\rho_{\text{o}_2} + 8,6\rho_{\text{H}_2\text{O}} = 0,01(12,1 \cdot 1,977 + 0,2 \cdot 2,927 + 7,36 \cdot 1,251 + 5,5 \cdot 1,429 + 8,6 \cdot 0,769) = 1,31 \text{ кг/м}^3$$

Рассчитывается плотность газов при рабочих условиях ρ_{140}

$$\rho_{140} = \frac{1,31 \cdot 273}{273 + 140} = 0,87 \text{ кг/м}^3$$

Определяются потери давления в циклоне:

$$\Delta\rho = \frac{230 \cdot 0,87 \cdot (3,54)^2}{2} = 1254 \text{ Па}$$

5. Из таблицы 1 находится для циклона ЦН-11 значение $D_{50} = 3,65$ мкм диаметром $D_r = 600$ мкм при табличной плотности частиц 1930 кг/м^3 и вязкости газа $22,2 \cdot 10^{-6} \text{ Па С}$ и величину $\lg \sigma_\eta = 0,352$. Для пересчета значения D_{50} на проектируемые условия необходимо определить динамическую вязкость газа в рабочих условиях. Определение динамической вязкости для нормальных условий указанной газовой смеси можно выполнить по формуле Геринга :

$$\eta = \frac{\sum \eta_i \cdot r_i \sqrt{\eta_i \cdot T_i}}{\sum r_i \sqrt{\eta_i \cdot T_i}}$$

приняв значения вязкостей ингредиентов и критических температур из таблицы 5

$$\eta = (0,121 \cdot 13,7 \cdot 10^{-6} \sqrt{13,7 \cdot 10^{-6} \cdot 304,2} + 0,002 \cdot 11,7 \cdot 10^{-6} \sqrt{11,7 \cdot 10^{-6} \cdot 430,7} + 0,736 \cdot 17 \cdot 10^{-6} \sqrt{17 \cdot 10^{-6} \cdot 126} + 0,055 \cdot 20,3 \cdot 10^{-6} \sqrt{20,3 \cdot 10^{-6} \cdot 154,3} + 0,086 \cdot 10 \cdot 10^{-6} \sqrt{10 \cdot 10^{-6} \cdot 647,5} / (0,121 \sqrt{13,7 \cdot 10^{-6} \cdot 304,2} + 0,02 \sqrt{11,7 \cdot 10^{-6} \cdot 403,7} + 0,736 \sqrt{17 \cdot 10^{-6} \cdot 126} + 0,055 \sqrt{20,3 \cdot 10^{-6} \cdot 154,3} + 0,086 \sqrt{10 \cdot 10^{-6} \cdot 647,15}) = 15,75 \cdot 10^{-6} \text{ Па}\cdot\text{с}$$

Используя выражение

$$\eta_{\tau} = \eta_0 \frac{273 + K}{T + K} \cdot \left(\frac{T}{273} \right)^{3/2}, \text{ Па}\cdot\text{с}$$

выполним пересчет на рабочую температуру используя данные таблиц и поправку k для смеси:

$$k = 0,121 \cdot 254 + 0,002 \cdot 396 + 0,736 \cdot 114 + 0,055 \cdot 131 + 0,086 \cdot 961 = 205$$

Откуда:

$$\eta_{140} = 15,75 \cdot 10^{-6} \frac{273,15 + 205}{413,15 + 205} \cdot \left(\frac{273,15}{413,15} \right)^{3/2} = 6,55 \cdot 10^{-6} \text{ Па}\cdot\text{с}$$

После чего рассчитывается D_{50}

$$D_{50} = 3,56 \sqrt{\left(\frac{1000}{600} \right) \cdot \left(\frac{1930}{2240} \right) \cdot \left(\frac{6,55 \cdot 10^{-6}}{22,2 \cdot 10^{-6}} \right) \cdot \left(\frac{3,5}{3,54} \right)} = 2,36 \text{ мкм}$$

Параметр осаждения:

$$X = \frac{\lg \frac{20}{2,36}}{\sqrt{(0,352)^2 + \lg^2 3}} = 1,565$$

6. По таблице 6 «Значения функции нормального распределения» находится значение интеграла вероятности $\Phi(x) = 0,941$, а значит, и величина эффективности очистки $\eta = 94,1\%$.

Анализируя полученный результат, следует отметить, что при таком значении принятый циклон может быть использован только в качестве

предварительной ступени очистки. Для этого достаточно посчитать валовый выброс загрязнителей в атмосферу после циклона. При данных условиях содержания золы 42 г/м³ и объемном расходе 10000 м³/ч суточный выброс золы составит:

$$M=0,042 \cdot 10000 (1-0,941) \cdot 24 = 595 \text{ кг,}$$

что крайне много.

7. Для снижения суточного выброса золы примем циклон с более высоким сопротивлением, чтобы коэффициент очистки составил, хотя бы, 99%. Рассчитаем коэффициент сопротивления с учетом данной эффективности.

$$\xi=230 \left(\frac{100-94,1}{100-99} \right)^2 \cdot \frac{3,54}{3,5} \cdot \frac{1000}{100} \approx 8000$$

Циклонов с такими тягодутьевыми параметрами промышленность не выпускает; полученное сопротивление на порядок превышает тягодутьевые показатели выпускаемых установок. Следовательно, для данных условий циклон неприемлем и может служить только в качестве предварительной ступени газоочистки.

Таблица 6- Значения нормальной функции расширения $\Phi(x)$

X	-2,0	-1,8	-1,6	-1,4	-1,2	-1	-0,8	-0,6	-0,5
$\Phi(x)\%$	2,28	3,59	5,48	8,08	11,51	13,57	21,19	27,43	30,85

X	-0,4	-0,3	-0,2	-0,1
$\Phi(x)\%$	34,46	38,21	42,07	46,02

X	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,5
$\Phi(x)\%$	50	57,93	65,54	72,57	78,81	84,13	88,49	91,92	93,32

X	1,6	1,7	1,8	1,9	2	2,2	2,4	2,5	2,6	2,7
$\Phi(x)\%$	94,52	95,54	96,41	97,13	97,72	98,61	99,18	99,38	99,53	99,65