

*РАСЧЕТ ЦИКЛОНА ЦН-15 ДЛЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОЧИСТКИ
ОТХОДЯЩИХ ГАЗОВ ОТ ЗОЛОШЛАКА ПРИ СЖИГАНИИ УГЛЯ
В КОТЛОАГРЕГАТАХ ГРЭС*

Т.Г. КОРОТКОВА, С.А. БУШУМОВ

*Кубанский государственный технологический университет,
350072, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Московская, 2;
электронная почта: korotkova1964@mail.ru; bushumov@list.ru*

Для предварительной очистки отходящих газов от золошлака, образующегося в результате технологического процесса сжигания твердого топлива (днецкого угля АШ) в котлоагрегатах Новочеркасской ГРЭС, установлены два циклона ЦН-15-500. Цилиндрический батарейный циклон имеет угол наклона входного патрубка 15° и состоит из 4-х циклонов с диаметром цилиндрической части 500 мм. После 2 силосов запыленный газ при температуре 30°C по газоходу поступает в циклоны, а затем в рукавные фильтры ФРКИ-90К-ПЗ-2-2. Проведен расчет циклона и по результатам входной и выходной запыленности газового потока определена его эффективность, которая составила 91 %. Расчетное значение выходной запыленности перед рукавами фильтров составило порядка $14,265\text{ г/м}^3$. Значения экспериментально измеренной входной запыленности перед рукавами фильтров составляют $14,32\text{ г/м}^3$ и $14,58\text{ г/м}^3$. Включение в технологическую схему очистки отводящих газов циклонов ЦН-15-500 позволило обеспечить более эффективную работу рукавных фильтров ФРКИ-90К-ПЗ-2-2, снизив запыленность входных газов на порядок, и уменьшив запыленность газа на выходе из фильтров. Приведена фотография циклона и установки по очистке отходящих от силоса газов на складе сухой золы.

Ключевые слова: циклон, пылегазовые выбросы, золошлак.

В котлоагрегатах ПАО «ОГК-2» Новочеркасской ГРЭС образуется золошлак в результате технологического процесса сжигания твердого топлива (угля). Уголь донецкий АШ перед сжиганием измельчается и при его сгорании мелкие и легкие частицы золы, называемые золой уноса, уносятся дымовыми газами. Размер частиц золы уноса составляет от 3-5 до 100-150 мкм. Зола с размером частиц свыше 150 мкм (0,15 мм) называется золошлаковыми отходами (ЗШО) или шлаком угольным. В составе шлака угольного количество золы составляет от 70 % до 90 %.

После сжигания сухая зола осаждается в электрофильтре и с помощью воздуха от установленных в отдельном помещении компрессоров пневмонасосами прокачивается по трубопроводу в бункера (силосы - 2 шт.). В результате прокачивания с воздухом движутся различные по дисперсности

частицы золы, часть из которых им уносится. Поэтому перед выбросом в атмосферу запыленный воздух необходимо очищать.

Зола улавливается золоуловителями разного типа. Наибольшее применение получили золоуловители, действующие на принципе использования центробежных сил (механические) и с использованием электростатических сил (электрофильтры). В качестве механических золоуловителей применяют циклоны, в которых осаждение происходит за счет центробежных сил при вращательном движении потока. Для повышения степени улавливания циклоны небольшого диаметра (0,23-0,50 м) объединяют в группы. Такие циклоны называют групповыми. В отечественной промышленности используются циклоны научно-исследовательского института очистки газа (НИИОГаза) [1].

Циклоны ЦН-15 применяются при следующих технологических процессах: сушка, обжиг, агломерация, сжигание топлива и т.д. На Новочеркасской ГРЭС после силоса запыленный газ при температуре 30 °С по газоходу поступает в батарейный циклон ЦН-15-500 (рисунок 1), а затем в рукавный фильтр ФРКИ-90К-ПЗ-2-2.



Рисунок 1– Установка по очистке отходящих от силоса газов на складе сухой золы (в правом верхнем углу циклон ЦН-15).

Цилиндрический батарейный циклон ЦН-15-500 имеет угол наклона входного патрубка $\alpha=15^{\circ}$ состоит из 4-х циклонов с диаметром цилиндрической части 500 мм и изготовлен из стали.

В данной работе проведен расчет циклона ЦН-15-500 по методике, изложенной в пособии [2], определена его эффективность, выполнено обследование циклона в производственных условиях Новочеркасской ГРЭС (рисунок 2) и определена его действительная эффективность.



Рисунок 2 – Определение запыленности дымовых газов на выходе из циклона (Автор Бушумов С.А. при проведении замеров циклона ЦН-15-500).

Расход запыленного газа V , $\text{м}^3/\text{с}$, на выходе из электрофильтра разделяется на 2 потока, поступающих в 2 силоса. По результатам замеров объемный расход запыленного газа, поступающего в циклон, составляет порядка $6600 \text{ м}^3/\text{ч}$, что соответствует $1,833 \text{ м}^3/\text{с}$.

Скорость движения газа w , $\text{м}^3/\text{с}$, определим из уравнения расхода

$$w = \frac{4V}{\pi n D^2}, \quad (1)$$

где D – диаметр циклона, м; n – число циклонов в групповом циклоне ЦН-15.

$$w = \frac{4 \cdot 1,833}{3,14 \cdot 4 \cdot 0,5^2} = 2,335.$$

Оптимальная скорость газа для различных типов циклонов приведена в таблице 2 и составляет $w_{\text{опт}} = 3,5$ м/с. Действительная скорость ниже оптимальной более, чем на 30 %.

Таблица 2 – Типы циклонов и соответствующая оптимальная скорость газа.

Тип циклона	ЦН-24	ЦН-15У	ЦН-15	ЦН-11	СДК-ЦН-33	СК-ЦН-34	СК-ЦН-34М
$w_{\text{опт}}$, м/с	4,5	3,5	3,5	3,5	2,0	1,7	2,0

Коэффициент гидравлического сопротивления циклона вычислим по выражению

$$\xi = k_1 k_2 k_{Ц500}^C + k_3, \quad (2)$$

где k_1 – поправочный коэффициент на диаметр циклона (таблица 3); k_2 – поправочный коэффициент на запыленность газа (таблица 4); $k_{Ц500}^C$ – коэффициент местного сопротивления циклона, работающего в сети, где индекс «с» обозначает гидравлическую сеть (таблица 5); k_3 – коэффициент, учитывающий дополнительные потери давления, связанные с компоновкой циклонов (таблица 6).

Таблица 3 – Значения поправочного коэффициента на диаметр циклона k_1

Тип циклона	Значение k_1 для D (в мм)				
	150	200	300	450	500
ЦН-11	0,94	0,95	0,96	0,99	1,0
ЦН-15, ЦН-15У, ЦН-24	0,85	0,90	0,93	1,0	1,0
СДК-ЦН-33, СК-ЦН-34, СК-ЦН-34М	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0

Таблица 4 – Значения поправочного коэффициента на запыленность газа k_2

Тип циклона	Значение k_2 при $C_{\text{вх}}$, г/м ³						
	0	10	20	40	80	120	150
ЦН-11	1	0,96	0,94	0,93	0,90	0,87	0,5
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	0,90	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	0,95	—	—	—

Таблица 5 – Коэффициенты местного сопротивления циклонов $k_{Ц500}^C$ диаметром 500 мм .

Тип циклона	Значение $k_{Ц500}^C$ циклонов		
	с выбросом в атмосферу	при выхлопе в гидравлическую сеть	групповая установка
ЦН-11	250	245	215
ЦН-15	163	155	140
ЦН-15У	170	165	148
ЦН-24	80	75	70
СДК-ЦН-33	600	520	—
СК-ЦН-34	1150	1050	—
СК-ЦН-34М	2000	—	—

Таблица 6 – Коэффициент k_3 для групп циклонов.

Компоновка циклонов	k_3
Круговая компоновка, нижний организованный подвод	60
Прямоугольная компоновка, циклонные элементы расположены в одной плоскости. Отвод из общей камеры чистого газа	35
Прямоугольная компоновка, улиточный отвод из циклонных элементов	28
Прямоугольная компоновка, свободный подвод потока в общую камеру	60

В нашем случае средняя входная запыленность составляет около 158 г/м^3 , выхлоп циклона идет далее в гидравлическую сеть из общего коллектора.

Коэффициент гидравлического сопротивления группового циклона ЦН-15

$$\xi = 1 \cdot 0,86 \cdot 140 + 60 = 180,4 .$$

Полученное значение согласуется с известным значением для групповых циклонов ЦН-15, которое составляет $\xi = 182$.

Гидравлическое сопротивление циклона ΔP , Па

$$\Delta P = \xi \frac{\rho_{\Gamma} w^2}{2}, \quad (3)$$

где ρ_{Γ} - плотность газовой смеси, кг/м^3

Плотность газовой смеси вычислим как плотность воздуха при $30 \text{ }^\circ\text{C}$, пренебрегая наличием частиц золы в нем, так как расход воздуха во много раз превышает расход золы, уносимой этим воздухом.

На основании уравнения Менделеева-Клапейрона плотность любого газа ρ_r , кг/м³, при температуре T , К, и давлении p может быть рассчитана по формуле

$$\rho_r = \rho_0 \frac{T_0 p}{T p_0} = \frac{M}{22,4} \frac{273 p}{T p_0}, \quad (4)$$

где $\rho_0 = \frac{M}{22,4}$ - плотность газа при нормальных условиях, кг/м³;

M - молекулярная масса газа, кг/кмоль; индексом «0» обозначены нормальные условия.

В уравнении (4) давления p и p_0 должны быть выражены в одинаковых единицах. Нормальные условия: $T_0 = 273,15$ К и $p_0 = 760$ мм рт. ст. Примем $p = 760$ мм рт. ст.

Плотность воздуха ρ_r , кг/м³, при 30°C и 760 мм рт. ст.

$$\rho_r = \frac{29}{22,4} \frac{273}{303} = 1,166.$$

Тогда ΔP , Па

$$\Delta P = 180,4 \frac{1,166 \cdot 2,335^2}{2} = 573.$$

Полученное значение гидравлического сопротивления соответствует ≈ 60 мм вод. ст., что является недостаточным. Потери давления в циклоне, которые рекомендуется применять, находятся в пределах 0,7-1,2 кПа. Принимать потери давления в циклоне ниже 0,5 кПа не рекомендуется из-за значительного уменьшения эффективности очистки воздуха.

Для определения эффективности очистки газа в циклоне вычислим параметр осаждения x

$$x = \frac{\lg\left(\frac{d_m}{d_{50}}\right)}{\sqrt{\lg^2 \sigma_\eta + \lg^2 \sigma_u}}, \quad (5)$$

где d_m - медианный размер частиц пыли, мкм; d_{50} - диаметр частиц, осаждаемых с эффективностью 50 %, мкм; $\lg \sigma_{\eta}^T$ - стандартное отклонение функции распределения парциальных коэффициентов очистки; $\lg \sigma_{\eta}$ - среднее квадратическое отклонение в функции распределения частиц по размерам.

Экспериментально доказано, что относительный пропуск пыли для группового циклона, в зависимости от размеров частиц, в 4-8 раз выше, чем для одиночного циклона. Проведенный микроскопический анализ проб золы, уловленной групповым циклоном ГРЭС-2 г. Томска показал, что содержание частиц менее 10 мкм составляет менее 1 % [3].

Учитывая, что действительная скорость ниже оптимальной, примем медианный диаметр $d_m = 10$ мкм. Значения d_{50}^T и $\lg \sigma_{\eta}^T$ для различных типов циклонов приведены в таблице 7.

Таблица 7 – Значения d_{50}^T , $\lg \sigma_{\eta}^T$ для различных типов циклонов.

Тип циклона	ЦН-24	ЦН-15У	ЦН-15	ЦН-11	СДК-ЦН-33	СК-ЦН-34	СК-ЦН-34М
d_{50}^T , мкм	8,5	6,0	4,5	3,65	2,31	1,95	1,3
$\lg \sigma_{\eta}^T$	0,308	0,283	0,352	0,352	0,364	0,308	0,340

Значения для циклона ЦН-15 составляют: $d_{50}^T = 4,5$; $\lg \sigma_{\eta}^T = 0,352$ и примем $\lg \sigma_{\eta} = 0,5$.

Для учета влияния отклонений условий работы от типовых используется соотношение

$$d_{50} = d_{50}^T \sqrt{\left(\frac{D}{D_T}\right) \left(\frac{\rho_{чТ}}{\rho_{ч}}\right) \left(\frac{\mu}{\mu_T}\right) \left(\frac{w_T}{w}\right)}, \quad (6)$$

где индекс «Т» означает типовое значение параметра; $\rho_{ч}$ - плотность частиц золы, кг/м³; μ - динамическая вязкость воздуха, Па·с.

Для каждого типа циклона типовыми значениями являются:

$$D_T = 0,6 \text{ м}; \rho_{чТ} = 1930 \text{ кг/м}^3; \mu_T = 2,22 \cdot 10^{-5} \text{ Па}\cdot\text{с}; w_T = 3,5 \text{ м/с}.$$

Плотность частиц золы составляет $\rho_{\text{ч}} = 2700 \text{ кг/м}^3$. Динамическая вязкость воздуха μ , Па·с, в зависимости от температуры t , °С, приведена в таблице 8.

Таблица 8 – Динамическая вязкость воздуха

t, °С	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$\mu \cdot 10^5$, Па·с	1,72	1,76	1,81	1,86	1,91	1,96	2,01	2,06	2,11	2,15	2,19

Величина d_{50} , мкм

$$d_{50} = 4,5 \sqrt{\left(\frac{0,5}{0,6}\right) \left(\frac{1930}{2700}\right) \left(\frac{1,86 \cdot 10^{-5}}{2,22 \cdot 10^{-5}}\right) \left(\frac{3,5}{4,675}\right)} = 2,75.$$

Тогда

$$x = \frac{\lg\left(\frac{10}{2,75}\right)}{\sqrt{0,352^2 + 0,5^2}} = \frac{0,561}{0,61} = 0,92.$$

Эффективность очистки газа в циклоне η , дол.

$$\eta = 0,5[1 + \Phi(x)], \tag{6}$$

где $\Phi(x)$ - табличная функция (интеграл вероятности) от параметра осаждения x (таблица 9).

$$\eta = 0,5[1 + 0,82] = 0,91.$$

Концентрация пыли на выходе из циклона $C_{\text{вых}}$, г/м³

$$C_{\text{вых}} = C_{\text{вх}}(1 - \eta), \tag{7}$$

где $C_{\text{вх}}$ – входная запыленность газа, г/м³.

Таблица 9 – Значения функции $\Phi(x)$

x	-2,7	-2,0	-1,8	-1,6	-1,4	-1,2
$\Phi(x)$	-0,0035	0,0228	0,0359	0,0548	0,0808	0,1151
x	-1,0	-0,8	-0,6	-0,4	-0,2	—
$\Phi(x)$	0,1587	0,2119	0,2743	0,3446	0,4207	—
x	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
$\Phi(x)$	0,5000	0,5793	0,6554	0,7257	0,7881	0,8413
x	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,7
$\Phi(x)$	0,8849	0,9193	0,9452	0,9641	0,9772	0,9965

Среднее значение входной запыленности газа по результатам замеров на входе одного и второго рукавных фильтров ФРКИ-90К-ПЗ-2-2 составляет $C_{\text{вх}} = (155,87 + 161,15)/2 = 158,5 \text{ г/м}^3$.

Тогда значение выходной запыленности $C_{\text{вых}}$, г/м^3

$$C_{\text{вых}} = C_{\text{вх}}(1 - \eta) = 158,5 \cdot (1 - 0,91) = 14,265.$$

Значения экспериментально измеренной входной запыленности перед рукавами фильтров составляют $14,32 \text{ г/м}^3$ и $14,58 \text{ г/м}^3$, что соответствует действительной эффективности циклона 90,9 %.

Таким образом, расчетное и экспериментальное значения эффективности циклона ЦН-15-500 согласуются между собой. Для повышения эффективности очистки циклона рекомендуется повысить скорость движения запыленного воздуха до 3-3,5 м/с путем увеличения его расхода, тем самым способствуя оседанию частиц в приемный бункер.

ЛИТЕРАТУРА

1. Справочник по пыле- и золоулавливанию / М.И. Биргер, А.Ю. Вальдберг, Б.И. Мягков и др.; Под общ. ред. А.А. Русанова. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Энергоатомиздат, 1983. 312 с.
2. Ветошкин А.Г. Процессы и аппараты пылеочистки: учеб. пособие. – Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2005. 210 с.
3. Василевский М.В., Зыков Е.Г. Методы повышения эффективности систем обеспыливания газов с групповыми циклонными аппаратами в малой энергетике // Промышленная энергетика, 2004. № 9. С. 54-57.

REFERENCES

1. Spravochnik po pyle- i zoloulavlivaniyu / M.I. Birger, A.Yu. Valdberg, B.I. Myagkov i dr.; Pod obshch. red. A.A. Rusanova. - 2-e izd., pererab. i dop. - M.: Energoatomizdat, 1983. 312 s.
2. Vetoshkin A.G. Protsessy i apparaty pyleochistki: ucheb. posobie. – Penza: Izd-vo Penz. gos. un-ta, 2005. 210 s.

3. Vasilevskiy M.V., Zikov E.G. Metody povysheniya effektivnosti sistem obespylivaniya gazov s gruppovymi tsiklonnymi apparatami v maloy energetike // Promyshlennaya energetika, 2004. № 9. S. 54-57.

CALCULATION OF CYCLONE CN-15 FOR PRE-CLEANING OF EXHAUST GASES FROM ASH AND SLAG FROM COAL COMBUSTION IN THE BOILER UNIT TPP

T.G. KOROTKOVA, S.A. BUSHUMOV

*Kuban State Technological University,
2, Moskovskaya st., Krasnodar, Russian Federation, 350072,
e-mail: korotkova1964@mail.ru; bushumov@list.ru*

For pre-treatment of waste gases from the ash resulting from the process of burning solid fuels (coal Donetsk ASH) in boilers Novocherkassk GRES, two CN-15-500 cyclone installed. The cylindrical battery has a cyclone angle of 15° inlet and consists of 4-cyclone cylindrical portion with a diameter of 500 mm. After 2 Silo laden gas at a temperature of 30 °C through the gas duct enters the cyclones and bag filters then FRKI-90K-P3-2-2. Spend cyclone calculation and the results of the input and output dusty gas flow is determined by its efficiency, which amounted to 91%. Estimated value of the output before the dust filter bags made about 14.265 g/m³. The values of the experimentally measured input before the dust filter bags constitute 14.32 g/m³ and 14.58 g/m³. Inclusion in the process diverting gas purification scheme Cyclone CN-15-500 has led to more efficient operation of bag filters FRKI-90K-P3-2-2, reducing the dust on the order of the input gas and dust reducing gas at the outlet of the filter. Shows a photograph of the cyclone and equipment for purifying exhaust gases from a silo to dry storage of ash.

Key words: cyclone, dust and gas emissions, ash.