

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ФРАКЦИОННОГО СОДЕРЖАНИЯ ПЫЛИ ПОСЛЕ ОЧИСТКИ В ПЫЛЕУЛОВИТЕЛЯХ ЦИКЛОННОГО ТИПА И ЕЕ ДООЧИСТКА

В. Ю. Соломин¹, Л. О. Штриплинг¹, Вит. Ю. Соломин²

¹Омский государственный технический университет, г. Омск

²Детская городская поликлиника № 8, г. Омск

Проблема использования пылеуловителей типа циклон заключается в недостаточной степени очистки пылей малых размеров. Поэтому требуется введение последовательной доочистки для удовлетворения требованиям предельно допустимой концентрации. Обычно расчет остаточной концентрации пыли проводится усредненно, что не дает полного представления о фракционном содержании пыли после очистки и ведет к повышенному проскоку мелких фракций. В данной статье представлен метод расчета фракционной остаточной концентрации пыли для последовательной ее доочистки с применением электрофильтра.

Ключевые слова: класс пыли, пылеочистка в циклонах, фракционная очистка, степень очистки пылей, доочистка, очистка в электрофильтре.

Для цитирования: Соломин В. Ю., Штриплинг Л. О., Соломин Вит. Ю. Методика расчета фракционного содержания пыли после очистки в пылеуловителях циклонного типа и ее доочистка // Омский научный вестник. 2025. № 2 (194). С. 35–40. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-194-35-40. EDN: DHEPAC.



© Соломин В. Ю., Штриплинг Л. О., Соломин Вит. Ю., 2025.
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

METHODOLOGY FOR CALCULATING THE FRACTIONAL CONTENT OF DUST AFTER CLEANING IN CYCLONE-TYPE DUST COLLECTORS AND ITS POST-CLEANING

V. Yu. Solomin¹, L. O. Shtripling¹, Vit. Yu. Solomin²

¹Omsk State Technical University, Omsk, Russia

²Children's Municipal Polyclinic No. 8, Omsk, Russia

The problem with using cyclone dust collectors is the insufficient degree of cleaning of small dusts. Therefore, it is necessary to introduce sequential post-cleaning to meet the requirements of the MAC. Usually, the calculation of the residual dust concentration is carried out on average, which does not give a complete picture of the fractional content of dust after cleaning and increased breakthrough of small fractions. This article presents a method for calculating the fractional residual dust concentration for its sequential post-cleaning using an electrostatic precipitator.

Keywords: dust class, dust cleaning in cyclones, fractional cleaning, degree of dust cleaning, post-cleaning, cleaning in an electrostatic precipitator.

For citation: Solomin V. Yu., Shtripling L. O., Solomin Vit. Yu. Methodology for calculating the fractional content of dust after cleaning in cyclone-type dust collectors and its post-cleaning. *Omsk Scientific Bulletin*. 2025. No. 2 (194). P. 35–40. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-194-35-40. EDN: DHEPAC.



© Solomin V. Yu., Shtripling L. O., Solomin Vit. Yu., 2025.
The content is available under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Особенности очистки пыли в циклонах

Современное производство включает в себя различные технологические процессы как изготовления продукта, так и процессы утилизации или обезвреживания побочных образований, к которым относится и пылеобразование. Пылеобразование отрицательно воздействует на респираторную и слизистые системы человека. Особенно опасно воздействие осуществляется мелкодисперсными твердыми фракциями, которые не только причиняют механические повреждения слизистых, но и накапливаются в легких, приводя к застойным явлениям и, как следствие, к хроническим заболеваниям [1]. Также наличие пылей в воздухе создает проблемы для техники, связанные с повышенным износом трущихся обработанных смазочными материалами поверхностей из-за накапливания в них твердых частиц, затруднением теплоотдачи, утечки и пробоя тока, а при повышенной влажности приводит к созданию трудноудаляемых отложений в воздуховодах с их последующей коррозией. Наиболее часто для пылеулавливания используют пылеуловители типа циклон, которые обеспечивают приемлемую очистку различных видов пылей, относящихся к группам крупной и средней дисперсности с медианным диаметром частиц 15–80 мкм. На сайтах производителей часто указывают проценты очистки от 90 до 95 %, но при этом не уточняют, для именно какого размера пыли актуальны эти значения [2], или совсем не указывают значения степени очистки, лишь снабжая описание областью применения и габаритными характеристиками в зависимости от производительности [3]. Как правило, пыль мультидисперсна и средние значения с высокой степенью очистки не отражают реальную степень обеспыливания для более мелких фракций, которые и являются наиболее опасными с медицинской точки зрения. Поэтому для мелкодисперсных фракций, которые не подвергаются соответствующей очистке в циклоне, требуется доочистка для соответствия нормам предельно допустимой концентрации (ПДК) [4, 5]. Поэтому общепринятый расчет [6] степени очистки в циклоне не дает полного представления об остаточной концентрации пыли по ее фракциям, что затрудняет принятие решения о необходимости последующей доочистки и может привести к дополнительным выбросам загрязняющих веществ в атмосферу. В данной статье представлен метод расчета фракционной остаточной концентрации пыли для последовательной ее доочистки с применением электрофильтра.

Анализ пыли и подбор циклона для первичной очистки

В данной работе рассмотрим очистку достаточно крупнодисперсной пыли при помощи пылеуловителя циклонного типа и определим степень ее очистки. Возьмем среднедисперсную пыль антрацита марок АС и АРШ, образованную топкой с механической цепной решеткой. Дисперсность пыли задается ее фракционным составом во всем диапазоне частиц (рис. 1).

В данном случае медианное значение пыли составляет порядка $d_{50} = 43$ мкм и находится практически на границе среднедисперсной и крупнодисперсной пыли в верхнем диапазоне и среднедисперсной области в нижнем диапазоне согласно ГОСТ 12.2.043–80. Несмотря на то, что крупные фракции пыли составляют более 50 % и будут очищены на 90–99 %, порядка 20 % мел-

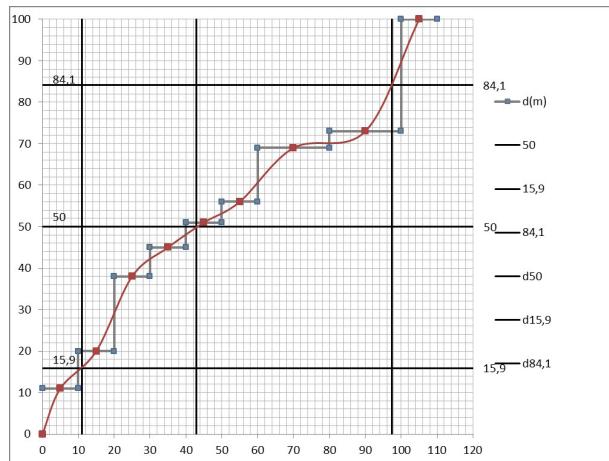


Рис. 1. График распределения общей массы частиц пыли по фракциям $m(d)$

Fig. 1. Graph of the total mass distribution of dust particles by $m(d)$ fractions

дисперсных фракций уйдет в просок и не позволит очистить пыль до соответствия нормам ПДК. Среднеквадратичное отклонение отражает близость разброса значений фракций относительно их медианного значения и вычисляется при помощи соотношений медианного и граничных значений диаметров пыли [6]. В нашем случае оно будет равно $\sigma = 3,05$. Чем более пологий график разброса пыли, тем больше разброс фракций, а значит, и степень очистки при расчете будет завышена относительно реальной.

Данную пыль можно считать достаточно крупной и для ее очистки подойдут циклоны с соотношением [1]

$$\frac{d_{50}}{d_{50}^T} \geq 3,2,$$

где d_{50}^T — тарированное значение медианной пыли для выбранного циклона.

Опустим процедуру подбора циклона по методу анализа иерархий, она подробно описана в [6]. Будем считать, что в нашем случае оптимальным будет работа циклона СК-ЦН-34 — пылеуловителя для промышленных систем, с длинным конусом, спиральной формы. Степень очистки среди от пылевых частиц с помощью такого агрегата достигает 99 %. При расчете степени очистки для циклонов используется значение диаметра размера частиц тарированной пыли d_{50}^T со степенью очистки 50 % с учетом свойств реальной пыли.

При этом диаметр пыли, очищаемый на 50 %, уменьшается при увеличении плотности пыли больше тарировочного значения, которое составляет 1930 кг/м³, и уменьшения диаметра циклона менее 600 мм. Таким образом, расчетное значение степени очистки в циклоне будет соответствовать именно для медианного диаметра испытуемой пыли. Фракции пыли более крупного диаметра будут очищаться с большей степенью, а меньшего диаметра — с меньшей степенью.

Произведем расчет по методике [6] и при исходных данных:

— количество очищаемого газа при рабочих условиях $Q = 5500 \text{ м}^3/\text{ч}$;

— плотность газа при рабочих условиях $\rho_g = 0,978 \text{ кг}/\text{м}^3$;

- динамическая вязкость газа при заданной рабочей температуре $\mu_r = 2,10 \cdot 10^{-5}$ Па·с ($t = 80^\circ\text{C}$);
- динамическая вязкость тарировочной пыли при заданной рабочей температуре $\mu_T = 2,22 \cdot 10^{-5}$ Па·с;
- дисперсный состав пыли, задаваемый двумя параметрами: медианный размер частиц пыли $d_{50} = 43$ мкм; параметр среднеквадратичного отклонения $\sigma = 3,05$.
- плотность частиц $\rho_q = 1450$ кг/м³;
- тарировочная плотность частиц $\rho_T = 1930$ кг/м³;
- расчетный диаметр циклона $D = 1$ м;
- тарировочный диаметр циклона $D_T = 0,6$ м;
- расчетная скорость потока газа в циклоне $v = 1,94$ м/с;
- тарировочная скорость потока газа в циклоне $v_{optimal}^T = 3,5$ м/с;
- d_m — характеризует параметр дисперсного состава заданной очищаемой пыли для рабочих условий в зависимости от тарировочных значений для выбранного циклона в соответствии с [6]:

$$d_m = d_{50}^T \sqrt{\frac{D \cdot \rho^T \cdot \mu \cdot v_{optimal}^T}{D_T \cdot \rho_q \cdot \mu_T \cdot v}} = \\ = 1,95 \sqrt{\frac{1 \cdot 1930 \cdot 2,10 \cdot 10^{-5} \cdot 3,5}{0,6 \cdot 1450 \cdot 2,22 \cdot 10^{-5} \cdot 1,94}} = 3,79 \text{ мкм.}$$

Обратим внимание, что, несмотря на достаточно высокий тарировочный показатель очистки в циклоне, его значение ухудшилось практически в два раза из-за малой плотности испытуемой пыли. Расчет параметра x выполняем по формуле [6]:

$$x = \frac{\lg\left(\frac{d_{50}}{d_m}\right)}{\sqrt{\lg^2 \sigma^T - \lg^2 \sigma}} = \frac{\lg\left(\frac{43}{3,79}\right)}{\sqrt{0,308^2 + 0,48^2}} = 1,88.$$

В соответствии со значением функции нормального распределения $F_0(x)$ определяем коэффициент очистки газа η в центробежном циклоне, выраженный в долях от единицы:

$$\eta = 100 \% \cdot F_0(x).$$

Так как $x = 1,88$, то значение функции нормального распределения Гаусса [7] составляет $F_0 = 0,9699$. Получаем, соответственно, степень очистки $\eta = 96,99\%$.

Казалось бы, такая высокая степень очистки достаточно крупнодисперсной пыли будет удовлетворять требованиям предельно допустимой концентрации, а ПДК рабочей зоны данной пыли составит 6 мг/м³ [8]. По санитарным нормам, воздух, подаваемый после пылеулавливающего оборудования в рабочую зону, должен содержать не более 30 % от ПДК пыли в воздухе, при этом требуемая концентрация составляет

$$\rho_{ocm} = \frac{6 \cdot 30}{100} = 1,8 \text{ мг/м}^3.$$

При очистке аэрозолей с высокой концентрацией пыли — более 10 г/м³ степень очистки воздуха повышается за счет агрегатирования частиц. Допустим, перед циклоном используют дополнительные устройства [7] для повышения концентрации пыли, то примем концентрацию равной $Z = 12$ г/м³.

В связи с повышенной концентрацией пыли пересчитаем величину очистки в циклоне в соответствии с формулой:

$$\eta' = \eta + (100 - \eta) \frac{0,12Z \log Z}{100} = \\ = 96,99 + (100 - 96,99) \frac{0,12 \cdot 12 \log 12}{100} = 97,04 \% .$$

При увеличении концентрации пыли степень очистки будет подниматься, но незначительно, буквально на доли процента, и уже не будет иметь столь решающего значения. Следовательно, требуемая степень очистки воздуха η_T (в %) составит

$$\eta_T = \frac{100(\rho - \rho_{ocm})}{\rho} = \\ = \frac{100(12000 - 1,8)}{12000} = 99,985 \% .$$

При степени очистки воздуха циклоном 97,04 % и требуемого значения очистки 99,985 % в соответствии с требованиями ПДК найдем требуемую эффективность доочистки x из

$$\eta_T = (1 - (1 - \eta') \cdot (1 - x)) \cdot 100\%,$$

тогда требуемая степень доочистки пыли после циклона составит $x = 99,49\%$.

Определение параметров дисперсного состава пыли для доочистки

После подбора и расчета циклона нам стало известно значение степени очистки заданной пыли и значение требуемой доочистки пыли в соответствии с ПДК, которое составило 99,49 %. Для проведения доочистки с заданной степенью необходимо определить новый дисперсный состав пыли после циклона, подобрать пылеочистное оборудование, произвести его расчет.

Методика расчета фракционного содержания пыли после очистки основана на нормировании степени очистки фракций пыли по размерам частиц пыли d_s на средних значениях фракций относительно полученного значения d_m выбранного циклона и получения значений очистки всех фракций в соответствии с формулой:

$$x = \frac{\lg\left(\frac{d_s}{d_m}\right)}{\sqrt{\lg^2 \sigma^T + \lg^2 \sigma}} .$$

В соответствии с табличными значениями распределения Гаусса определяем значение функции нормального распределения $F_0(x)$ [7] и соответствующий им коэффициент очистки газа η_i согласно табл. 1.

В центробежном циклоне для каждой из заданных фракций Φ_i , выраженные в долях от единицы, найдем остаточное содержание пыли в каждой фракции Φ_j в соответствии с фракционной степенью очистки каждой, используя формулу:

$$\Phi_j = \frac{\Phi_i(100 - \eta_i)}{100} .$$

Результаты отобразим в табл. 2.

Теперь остаточные значения масс по фракциям образуют новую пыль — нормируем каждую фрак-

Таблица 1. Расчет коэффициента очистки газа по средним значениям фракций
Table 1. Calculation of gas cleaning factor by average fraction values

Размеры частиц пыли d_s на средних значениях фракций	x	Коэффициент очистки газа η_i по средним значениям фракций
5	0,210	58
15	1,041	85
25	1,427	92
35	1,681	95
45	1,872	96
55	2,023	97
70	2,206	98
90	2,396	99
110	2,547	99,5

Таблица 2. Расчет остаточных значений пыли по фракциям
Table 2. Calculation of residual dust values by fractions

Границы фракций	$\Phi_i, \%$	$\Phi_j, \%$
0 – 10	11	4,62
10 – 20	9	1,35
20 – 30	18	1,44
30 – 40	7	0,35
40 – 50	6	0,24
50 – 60	5	0,15
60 – 80	13	0,26
80 – 100	4	0,04
>100	27	0,135

цию относительно их суммы и получим процентное содержание новых фракций для доочистки Φ_d :

$$\Phi_d = \frac{\Phi_j}{\sum \Phi_j} \cdot 100\% .$$

Новый дисперсный состав пыли для доочистки представлен в табл. 3.

На координатной сетке построим график распределения общей массы частиц пыли по фракциям $m_d(d)$ для доочистки в сравнении с заданной первоначально пылью (рис. 2).

Согласно новому графику пыли для доочистки, медианный диаметр составит: $d_{50} = 43$ мкм, а среднеквадратическое отклонение диаметров частиц: $\sigma = 4,55$. При размещении данных на классификационную номограмму пылей определяем группу дисперсной пыли по ГОСТ 12.2.043–80. Данная пыль относится к четвертой классификационной группе: мелкодисперсная пыль. При этом первоначальный образец пыли был на границе средней и крупнодисперсной пыли, что говорит о том, что очистка в циклоне может повысить класс пыли не более чем на одну ступень, но это, конечно же, недостаточно, для полноценной ее очистки.

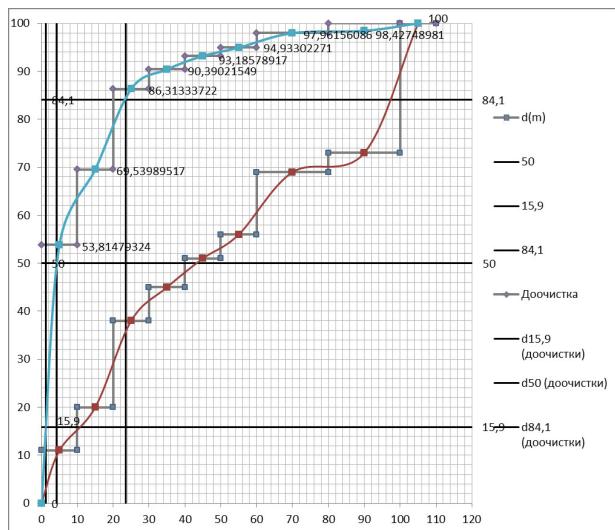


Рис. 2. График распределения общей массы частиц пыли по фракциям $\Phi_d m_d(d)$ для доочистки в сравнении с первичной пылью

Fig. 2. Graph of the total mass distribution of dust particles by $\Phi_d m_d(d)$ fractions for post-cleaning compared to primary dusts

Доочистка при помощи электрофильтра

Для доочистки можно использовать различные типы пылеуловителей с возможностью фильтрации мелкодисперсных пылей. Предпочтение отдадим таким моделям очистки, расчет которых позволяет наглядно продемонстрировать доочистку с требуемой степенью для удовлетворения условиям ПДК.

В данном случае будем использовать электрическую фильтрацию как эффективную технологию очистки, основанной на зарядке взвешенных частиц и их осаждения на осадительных электродах. В некоторых работах описывается совместная работа циклонов с последующей или предварительной фильтрацией электрофильтрами или тканевыми фильтрами, но не прорабатывается методология доочистки, а лишь указывается на такую конструктивную возможность и возможные проблемы их использования в совмещенном корпусе [5, 9, 10]. Для примера рассмотрим расчет трубчатого электрофильтра типа КТ-9 для очистки пыли $d = 4,3$ мкм с производительностью $Q = 5500 \text{ м}^3/\text{ч}$ (допустим, что потери отсутствуют).

Характеристика электрофильтра: $R = 120 \text{ мм}$; $U = 25 \text{ кВ}$; $w_r = 1,1 \text{ м}/\text{с}$; $\mu = 18 \cdot 10^{-6} \text{ Па}\cdot\text{с}$; $\epsilon = 15$; $\eta = 0,9601$.

Рассчитываем требуемую площадь активного сечения электрофильтра:

$$S = \frac{Q}{w_r} = \frac{1,572}{1,1} = 1,388 \text{ м}^2.$$

Определяем напряженность электрического поля:

Таблица 3. Дисперсный состав пыли после очистки циклоном
Table 3. Dust dispersion structure after cyclone cleaning

Размеры частицы пыли d_s на границах фракций, мкм	0 – 10	10 – 20	20 – 30	30 – 40	40 – 50	50 – 60	60 – 80	80 – 100	>100
Распределение общей массы частиц пыли по фракциям после очистки в циклоне, $\Phi_d, \%$	53,81	15,73	16,77	4,08	2,80	1,75	3,03	0,47	1,57
Массовая доля частиц пыли для фракций менее заданного размера для доочистки, $m_d(d), \%$	53,81	69,54	86,31	90,39	93,19	94,93	97,96	98,43	100

$$E = \frac{U}{R} = \frac{25 \cdot 10^3}{0,12} = 208333,3 \text{ В/м},$$

скорость осаждения (дрейфа) частиц:

$$w_o = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot d \cdot E^2}{(\varepsilon + 2)\mu} = \\ = \frac{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 154,3 \cdot 208333,3^2}{(15 + 2) \cdot 18 \cdot 10^{-6}} = 0,081 \text{ м/с},$$

где $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$.

Также определяем длину электрофильтра и степень очистки по формулам [10]:

$$L = \frac{R \cdot w_F \cdot \ln \frac{1}{1 - \eta}}{2 \cdot w_o},$$

где η — требуемая эффективность очистки, равная 0,9949,

$$L = \frac{0,1241}{2 \cdot 0,081} \cdot \ln \frac{1}{1 - 0,9949} = 4,302 \text{ м}.$$

Ожидаемая эффективность очистки [11] рассчитывается при найденной длине в 5,28

$$\eta = 1 - \exp \left[-\frac{2 \cdot w_o \cdot L}{R \cdot w_F} \right] = \\ = 1 - \exp \left[-\frac{2 \cdot 0,081 \cdot 4,302}{0,1241} \right] = 0,9949 = 99,49 \text{ \%}.$$

Итоговая формула степени очистки, в нашем случае очистка производится в системе последовательно соединённых аппаратов (циклон и электрофильтр), будет выглядеть следующим образом:

$$\eta = 1 - (1 - \eta_u) \cdot (1 - \eta_e),$$

где η_u , η_e — степень очистки циклона и электрофильтра соответственно,

$$\eta = 1 - (1 - 0,9704) \cdot (1 - 0,9949) = \\ = 99,985 = 99,985 \text{ \%},$$

которая будет удовлетворять требованиям ПДК для рабочей зоны.

Выводы

На предприятиях используется различное газоочистное оборудование для очистки промышленных выбросов в атмосферу. Использование циклонов приемлемо в случаях, когда нет необходимости удовлетворять требованиям ПДК или производить очистку крупнодисперсных пылей. При введении ограничений по концентрации пыли после очистки целесообразна комплексная очистка, включающая две ступени как минимум. В работе представлен метод определения дисперсионного состава пыли после очистки в циклоне для последовательной ее доочистки в более эффективных аппаратах. Разработанная методика позволяет получить полное представление об остаточной концентрации пыли по ее фракциям после очистки в циклонах, что облегчает принятие решения о необходимости последующей доочистки. В данной статье представлен метод расчета фракционной остаточной концентрации на примере среднедисперсной пыли антрацита марок АС и АРШ, образованной топкой с механи-

ческой цепной решеткой для последовательной ее доочистки с применением электрофильтра. Проведенное исследование показывает, что очистка в циклоне может повысить класс пыли не более чем на одну ступень, что недостаточно для полноценной ее очистки согласно требованиям ПДК.

Статья будет полезна инженерам, экологам и аспирантам, занимающимся исследованием и проектированием систем очистки для удовлетворения требованиям в области охраны окружающей среды и охраны труда.

Список источников/ References

1. Соломин В. Ю., Белькова С. В., Соломин Вит. Ю. Подбор пылеочистительного оборудования типа циклон для металлообрабатывающих производств при помощи метода анализа иерархий // Омский научный вестник. 2023. № 4 (188). С. 46–52. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-188-46-52. EDN: XBFXFS.

Solomin V. Yu., Bel'kova S. V., Solomin Vit. Yu. Podbor pyleochistitel'nogo oborudovaniya tipa tsiklon dlya metalloobrabatyvayushchikh proizvodstv pri pomoshchi metoda analiza iyerarkhiy [Selection of dust cleaning equipment such as cyclone for metalworking industries using the hierarchy analysis method]. Omskiy nauchnyy vestnik. *Omsk Scientific Bulletin*. 2023. No. 4 (188). P. 46–52. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-188-46-52. EDN: XBFXFS. (In Russ.).

2. Циклон ЦН-15-200x1УП. URL: <https://saem.su/ciklon-cn-15-200h1up> (дата обращения: 30.10.2024).

Tsiklon TSN-15-200x1UP [Cyclone CN-15-200x1UP]. URL: <https://saem.su/ciklon-cn-15-200h1up> (accessed: 30.10.2024). (In Russ.).

3. Циклоны типа ЦН-15. URL: <https://www.folter.ru/catalog/vozdushnye-filtry-i-pyleuloviteli-folter-dlya-sistem-aspiracii/cn-15/> (дата обращения: 30.10.2024).

Tsiklony tipa TsN-15 [Cyclones of type CN-15]. URL: <https://www.folter.ru/catalog/vozdushnye-filtry-i-pyleuloviteli-folter-dlya-sistem-aspiracii/cn-15/> (accessed: 30.10.2024). (In Russ.).

4. Орлов С. М. Энергосберегающие технологии при двухступенчатой схеме очистки газов (циклон — аппарат тонкой очистки) // Научно-технические проблемы совершенствования и развития систем газоэнергоснабжения. 2018. № 1. С. 55–60. EDN: XNOOPB.

Orlov S. M. Energosberegayushchiye tekhnologii pri dvukhstupenchatoy skheme ochistki gazov (tsiklon — apparat tonkoy ochistki) [Energy saving technology in a two-step purification schemes (cyclone — apparatus thin clearing)]. *Nauchno-tehnicheskiye Problemy Sovershenstvovaniya i Razvitiya Sistem Gazoenergosnabzheniya*. 2018. No. 1. P. 55–60. EDN: XNOOPB. (In Russ.).

5. Пат. 2251445 С2 Российской Федерации, МПК B01D 46/00, B01D 46/26, B04C 9/00. Фильтр-циклон для очистки газов / Панов С. Ю., Энтин С. В., Анжеуров Н. М. [и др.]. № 2003122539/15; заявл. 18.07.2003; опубл. 10.05.2005. Бюл. № 13. EDN: MMIQQM.

Patent 2251445 C2 Russian Federation, IPC B01D 46/00, B01D 46/26, B04C 9/00. Fil'tr-tsiklon dlya ochistki gazov [Cyclonic Filter] / Panov S. Yu., Entin S. V., Anzheurov N. M. [et al.]. No. 2003122539/15. EDN: MMIQQM. (In Russ.).

6. Соломин В. Ю., Штриплинг Л. О. Использование метода анализа иерархий при выборе пылеочистительного оборудования литейного производства // Омский научный вестник. 2023. № 2 (186). С. 73–81. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-186-73-81. EDN: NTLDSh.

Solomin V. Yu., Shtrippling L. O. Ispol'zovaniye metoda analiza iyerarkhiy pri vybere pyleochistitel'nogo oborudovaniya liteynogo proizvodstva [Using the hierarchy analysis method when choosing dust cleaning equipment for foundry]. Omskiy nauchnyy vestnik.

Omsk Scientific Bulletin. 2023. No. 2 (186). P. 73–81. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-186-73-81. EDN: NTLDSH. (In Russ.).

7. Биргер М. И., Вальдберг А. Ю., Мягков В. И. [и др.]. Справочник по пыле- и золоулавливанию. 2-е изд., перераб. и доп. Москва: Энергоатомиздат, 1983. 312 с.

Birger M. I., Val'dberg A. Yu., Myagkov V. I. [et al.]. Spravochnik po pyle- i zoloulavlivaniju [Handbook of dust and ash collection]. 2nd ed., revised and with supplement. Moscow, 1983. 312 p. (In Russ.).

8. Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 30.04.2003 № 76 (ред. от 29.06.2017) «О введении в действие ГН 2.2.5.1313-03» (вместе с «ГН 2.2.5.1313-03. Химические факторы производственной среды. Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны. Гигиенические нормативы», утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 27.04.2003) (Зарегистрировано в Министерстве России 19.05.2003 № 4568.) Доступ из справочно-правовой системы «Консультант Плюс».

Postanovleniye Glavnogo gosudarstvennogo sanitarnogo vracha RF ot 30.04.2003 № 76 (red. ot 29.06.2017) «O vvedenii v deystviye GN 2.2.5.1313-03» (vmeste s «GN 2.2.5.1313-03. Khimicheskiye faktory proizvodstvennoy sredy. Predel'no dopustimyye kontsentratsii (PDK) vrednykh veshchestv v vozdukhе rabochey zony. Gigiienicheskiye normativy», utv. Glavnym gosudarstvennym sanitarnym vrachom RF 27.04.2003) (Zaregistrirовано v Minyuste Rossii 19.05.2003 № 4568) [Resolution of the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation dated 30.04.2003 No. 76 (as amended on 29.06.2017) «On the introduction of GN 2.2.5.1313-03» (together with "GN 2.2.5.1313-03. Chemical factors of the production environment. Maximum permissible concentrations (MPC) of harmful substances in the air of the working area. Hygienic standards", approved. by the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation on 27.04.2003) (Registered in the Ministry of Justice of Russia on 19.05.2003 No. 4568). Available at Consultant Plus. (In Russ.).

9. Катин В. Д., Долгов Р. В. Разработка новых конструкций циклонов для очистки газов котельных на предприятиях железнодорожного транспорта // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. 2018. № 4 (17). С. 23–25. EDN YZCOHB.

Katin V. D., Dolgov R. V. Razrabotka novykh konstruktsiy tsiklonov dlya ochistki gazov kotel'nykh na predpriyatiyakh zheleznodorozhnogo transporta [New cyclones development to clean boiler compartments' gas at railway transport enterprises]. Transport Aziatsko-Tikhookeanskogo regiona. *Transport of the Asia-Pacific Region Scientific Journal.* 2018. No. 4 (17). P. 23–25. EDN: YZCOHB. (In Russ.).

10. Орлов С. М., Романенко Б. Р. Исследование баланса сил в выхлопной трубе циклона // Строитель Донбасса. 2021. № 3 (16). С. 21–25. EDN: NEVCSB.

Orlov S. M., Romanenko B. R. Issledovaniye balansa sil v vykhlopnoy trube tsiklona [Balance of forces in the exhaust pipe of a cyclone research]. Stroitel' Donbassa. *The Builder of Donbass.* 2021. No. 3 (16). P. 21–25. EDN: NEVCSB. (In Russ.).

11. Ерошенко В. Г. Повышение эффективности работы электрофильтров при очистке промышленных газов // Экология и промышленность. 2018. № 3-4 (56-57). С. 36–39. EDN: YWBXML.

Eroshenko, V. G. Povysheniye effektivnosti raboty elektrofil'trov pri ochistke promyshlennyykh gazov [Increase of electrostatic precipitator efficiency during industrial gases purification]. *Ekologiya i promyshlennost'. Ecology and Industry.* 2018. No. 3 – 4 (56 – 57). P. 36 – 39. EDN: YWBXML. (In Russ.).

СОЛОМИН Вячеслав Юрьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Промышленная экология и безопасность» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск. SPIN-код: 2972-5037

AuthorID (РИНЦ): 440725

Адрес для переписки: v_solomin@mail.ru

ШТРИПЛИНГ Лев Оттович, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Промышленная экология и безопасность» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 9285-8565

ORCID: 0000-0002-2622-9108

AuthorID (SCOPUS): 56504001800

ResearcherID: T-8953-2018

СОЛОМИН Виталий Юрьевич, кандидат медицинских наук, консультативно-диагностическое отделение Детской городской поликлиники № 8, г. Омск. SPIN-код: 7420-4564

AuthorID (РИНЦ): 440722

Адрес для переписки: youjian@mail.ru

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила в редакцию 10.12.2024; одобрена после рецензирования 17.04.2025; принята к публикации 29.04.2025.

SOLOMIN Vyacheslav Yuryevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Industrial Ecology and Safety Department, Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk.

SPIN-code: 2972-5037

AuthorID (RSCI): 440725

Correspondence address: v_solomin@mail.ru

SHTRIPLING Lev Ottovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Industrial Ecology and Safety Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 9285-8565

ORCID: 0000-0002-2622-9108

AuthorID (SCOPUS): 56504001800

ResearcherID: T-8953-2018

SOLOMIN Vitaliy Yuryevich, Candidate of Medical Sciences, Consultative and Diagnostic Department of the Children's Municipal Polyclinic No. 8, Omsk.

SPIN-code: 7420-4564

AuthorID (RSCI): 440722

Correspondence address: youjian@mail.ru

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

The article was submitted 10.12.2024; approved after reviewing 17.04.2025; accepted for publication 29.04.2025.