

Оригинальная статья / Original article

УДК 66.021.1:66.074.9

DOI: <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2019-9-4-759-767>

Эффективность очистки и гидравлическое сопротивление струйно-фильтрационного пылеуловителя

© Н.М. Самохвалов, В.В. Виноградов, Ю.А. Зыкова

Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Российская Федерация

Резюме: Цель настоящего исследования – разработка методики расчета гидравлического сопротивления и эффективности очистки запыленных газов струйно-фильтрационным пылеуловителем на основе экспериментальных данных. Названный пылеуловитель применяется для очистки запыленных газовых потоков высокой концентрации путем двухступенчатой очистки. На первой ступени в целях максимального снижения пылевой нагрузки происходит осаждение пылевых частиц под действием инерционных сил, возникающих за счет резкого торможения струи запыленного газа. На второй ступени обеспечивается высокоэффективная очистка потока на уровне 98–99 % и более за счет процесса фильтрования через насыпной зернистый слой. Проведены экспериментальные исследования влияния скорости струи, конструктивных размеров сопла и его расстояния до входа в бункер, размеров и плотности пылевых частиц, запыленности газового потока и свойств пыли на гидравлическое сопротивление и эффективность очистки струйной и фильтрующей частей пылеуловителя. Установлено, что наиболее существенное влияние на рост гидравлического сопротивления и эффективности очистки струйной части оказывают скоростной напор струи, угол сходимости сопла и форма аэроканала. Определены оптимальные пределы скорости струи, размеры конструктивных элементов пылеуловителя, которые позволяют обеспечить эффективность очистки пылегазового потока струйной частью не менее чем на 80 %. Разработаны методы расчета гидравлического сопротивления струйной части пылеуловителя на основе коэффициентов местного сопротивления, конфузора, отвода и аэроканала в зависимости от плотности очищаемого газа и средней скорости потока в аэроканале. Определено гидравлическое сопротивление чистой зернистой фильтрующей перегородки, а также при накоплении в ней пылевого осадка. На основе закона улавливания частиц однородным фильтром применительно к зернистым слоям разработан метод расчета поверхности и толщины фильтрующего слоя и продолжительности межрегенерационного цикла фильтрования.

Ключевые слова: пылеуловитель, струйная очистка, фильтрование, эффективность, гидравлическое сопротивление

Информация о статье: Дата поступления 26 апреля 2019 г.; дата принятия к печати 5 декабря 2019 г.; дата онлайн-размещения 30 декабря 2019 г.

Для цитирования: Самохвалов Н.М., Виноградов В.В., Зыкова Ю.А. Эффективность очистки и гидравлическое сопротивление струйно-фильтрационного пылеуловителя // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2019. Т. 9, № 4. С. 759–767. <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2019-9-4-759-767>

Cleaning efficiency and hydraulic resistance of the jet filter dust collector

Nikolay M. Samokhvalov, Vladimir V. Vinogradov, Yulia A. Zyкова

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation

Abstract: The current study is aimed at the development of a methodology for calculating hydraulic resistance and the efficiency of cleaning dusty gases with a jet filter dust collector based on experimental data. This dust collector is applied in cleaning dusty gas streams of high concentration by means of a two-stage procedure. At the

first stage, in order to minimise dust load, dust particles are deposited under the action of inertial forces arising from the sharp deceleration of a stream. At the second stage, a highly effective purification of the flow is ensured at the level of 98–99 % or more due to the filtering process through the bulk granular layer. Experimental studies of hydraulic resistance and cleaning efficiency of the jet and filter parts of the dust collector affected by jet velocity, nozzle design and its distance to the hopper, dust particle size and density, dust content of the gas flow, as well as dust properties, were carried out. The most significant influence on the increase in hydraulic resistance and the cleaning efficiency of the jet part was established to be exerted by the high-pressure head of the jet, the convergence angle of the nozzle and the shape of the air channel. The optimal limits of the jet velocity, the dimensions of the structural elements of the dust collector are determined, ensuring the efficiency of cleaning the dust and gas stream in the jet part by at least 80 %. Methods were developed for calculating the hydraulic resistance of the jet part of the dust collector based on the coefficients of local resistance, reducer, exhaust and air channel, depending on the density of the gas being cleaned and the average flow rate in the air channel. The hydraulic resistance of the granular filtering partition when clean, as well as during the accumulation of dust sediment, was determined. Based on the law of particle accumulation by a uniform filter as applied to granular layers, a method was developed for calculating the surface and thickness of the filter layer and the duration of the inter-regeneration cycle of the filter.

Keywords: dust collector, jet cleaning, filtration, efficiency, hydraulic resistance

Information about the article: Received April 26 2019; accepted for publication December 5, 2019; available online December 30 2019.

For citation: Samokhvalov NM, Vinogradov VV, Zyкова YA. Cleaning efficiency and hydraulic resistance of the jet filter dust collector. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya* = Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology. 2019;9(4):759–767. (In Russian) <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2019-9-4-759-767>

ВВЕДЕНИЕ

Во многих промышленных химико-технологических процессах, таких как сушка сыпучих и порошкообразных материалов в «кипящем» или «фонтанирующем» слое, каталитические процессы в аппаратах с псевдоожиженным слоем, пневмотранспорт пылевидных материалов и другие, образуются газовые потоки с высокой концентрацией дисперсных систем. Для таких потоков используется многоступенчатая очистка. Чаще всего каждая стадия протекает в отдельном аппарате. На первой стадии происходит предварительная очистка, для которой применяются сепараторы, аппараты инерционного осаждения или циклоны. На второй стадии очистка происходит в аппаратах с высокой эффективностью, но, как правило, и с более высокими экономическими затратами¹ [1–5]. Аппараты первой ступени громоздки и имеют низкую эффективность очистки, в пределах 40–50 %. Циклоны имеют высокое гидравлическое сопротивление, плохо улавливают частицы размером менее 20–30 мкм и малоэффективны при низкой запыленности [6–8]. Авторами настоящей статьи разработан струйно-фильтрационный пылеуловитель (СФП), который совмещает две стадии – предварительную очистку за счет струйно-инерционного осаждения и эффективную очистку за счет фильтрова-

ния в зернистом слое [9, 10].

Однако эффективность очистки промышленных газов от пыли и гидравлическое сопротивление в струйно-фильтрационном пылеуловителе недостаточно изучены, нет методов расчета этих показателей и размеров аппарата, которые позволили бы проектировать промышленные варианты.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для оценки возможностей пылеулавливания струйно-фильтрационным аппаратом использовалась экспериментальная установка, схема которой представлена на рис. 1.

Установка состоит из пылеуловителя 1, который включает струйную часть 2, зернистый фильтрующий слой 3 и пылесадительный бункер 4. Для измерения запыленности очищенного потока применялся метод внешней фильтрации с использованием аспиратора 5 для отбора проб воздуха через фильтровальный патрон 6. Запыление воздуха, поступающего на очистку, осуществлялось с помощью дозатора 7. Расход воздуха измерялся ротаметром 8. Гидравлическое сопротивление измерялось микроманометром 9 типа ММН-240. Воздух подавался компрессором 10. Эффективность очистки струйной частью определялась по массе уловленной пыли в бункере аппарата. Для исследований использовались потоки, запыленные цементом, дробленным песком и мукой. Фракционный состав пыли определялся с помощью импактора НИИОГаз.

¹ Биргер М.И., Вальдберг А.Ю., Мягков Б.И., Падва В.Ю., Русанов А.А., Урбах И.И. Справочник по пыле- и золоулавливанию. М.: Энергоатомиздат, 1983. 312 с.

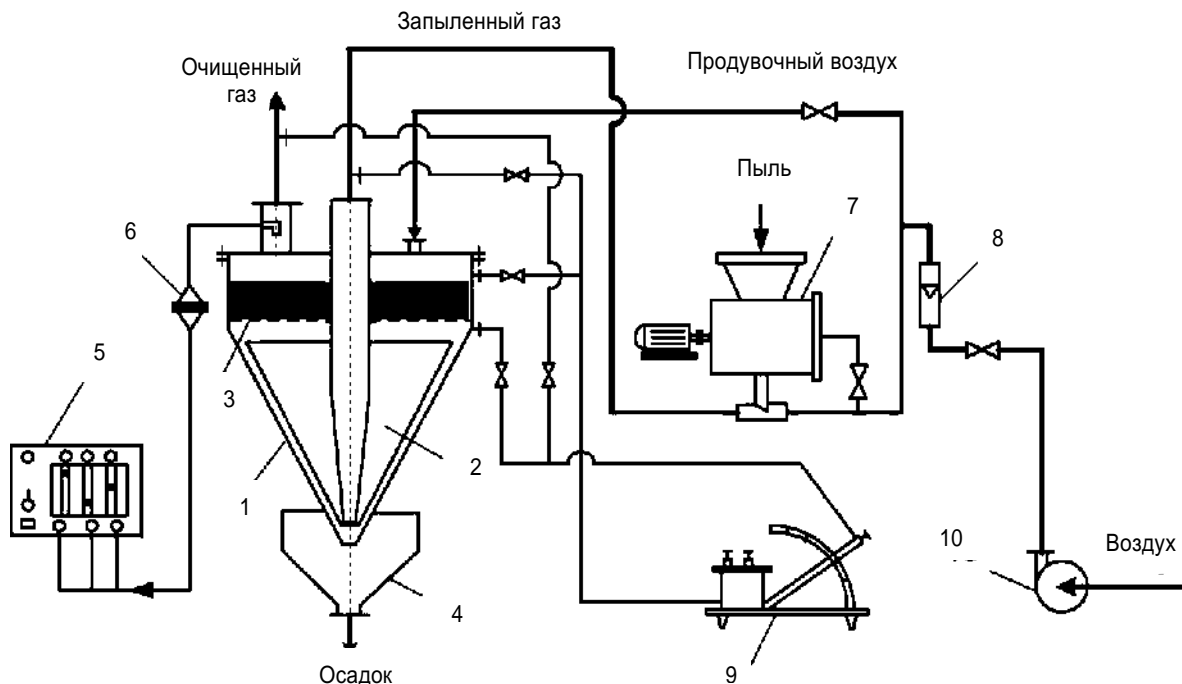


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Fig. 1. Experimental installation

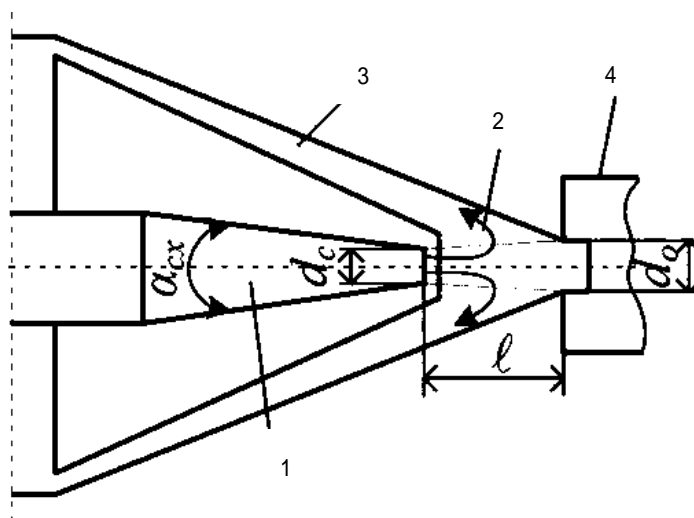


Рис. 2. Схема струйной части пылеуловителя:

1 – конфузор; 2 – отвод; 3 – аэроканал; 4 – пылеосадительный бункер

Fig. 2. Scheme of the jet part of the dust collector:

1 – confuser; 2 – tap; 3 – aerocalanal; 4 – dust bin

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Исследования гидравлического сопротивления и эффективности очистки только струйной частью пылеуловителя (без загрузки фильтрующего слоя), позволили установить зависимость этих показателей от скорости струи на выходе из сопла, размеров и конструктивных особенностей пылеуловителя, свойств пыли.

Установлено, что основное влияние на вели-

чину гидравлического сопротивления при движении «чистого» воздуха оказывают скоростной напор струи, угол сходимости сопла $\alpha_{сх}$ и форма аэроканала (рис. 2).

Скоростной напор зависит от расхода воздуха и выходного диаметра сопла d_c . Увеличение скорости струи на выходе из сопла приводит к росту гидравлического сопротивления (кривая 1 рис. 3).

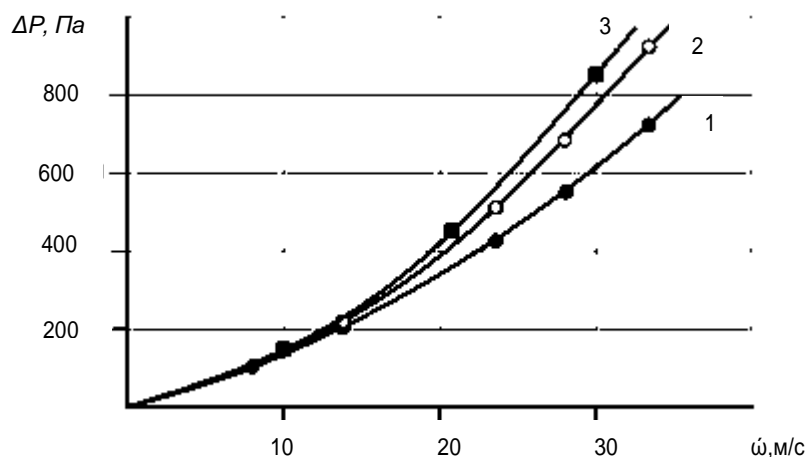


Рис. 3. Гидравлическое сопротивление струйно-фильтрационного пылеуловителя:
 1 – сопротивление струйной части при «чистом» потоке;
 2 – сопротивление струйной части при запыленном потоке;
 3 – общее сопротивление с учетом фильтрующего слоя

Fig. 3. Hydraulic resistance of jet filtering dust collector:
 1 – “clean” flow resistance; 2 – dusty flow resistance;
 3 – total resistance taking into account the filter layer

Исследование влияния расстояния l между срезом сопла и входом в бункер показало, что приближение сопла к бункеру уменьшает входное сечение аэроканала и усложняет разворот потока, что приводит к росту сопротивления. Удаление сопла от бункера уменьшает силу инерции струи, размывает ее, что отрицательно сказывается на эффективности осаждения пыли. На основе этого рекомендуется расстояние между соплом и бункером принимать равным от 2 до 5 диаметров входного отверстия в бункер d_0 . При очистке запыленного потока только струйной частью гидравлическое сопротивление возрастает по сравнению с «чистым» потоком, причем с ростом скорости

это различие увеличивается (кривая 2 рис. 3). При использовании фильтрующего слоя к сопротивлению струйной части добавляется сопротивление зернистой перегородки (кривая 3 рис. 3).

Высокая эффективность очистки в струйно-фильтрационном пылеуловителе определяется условиями фильтрования и характеристиками зернистого слоя. Однако остаточная запыленность очищаемого потока зависит от эффективности осаждения пыли в струйной части аппарата. Характерные изменения эффективности очистки получены при очистке воздуха, запыленного дробленым песком с медианным размером частиц 30 мкм (рис. 4).

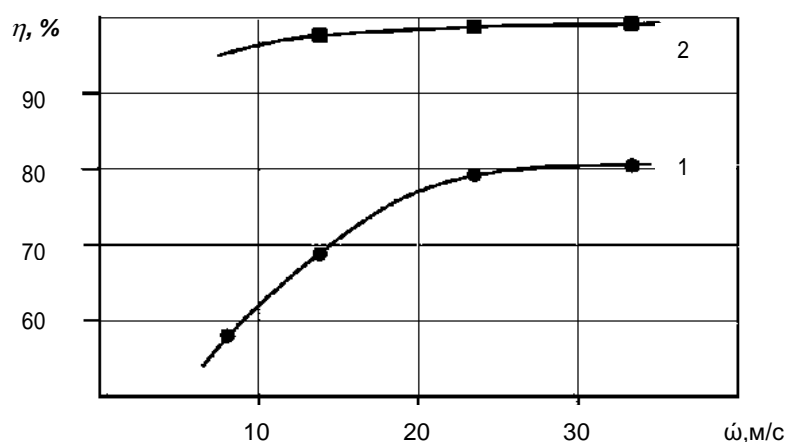


Рис. 4. Эффективность очистки струйно-фильтрационного пылеуловителя:
 1 – эффективность струйной части; 2 – общая эффективность очистки

Fig. 4. Cleaning efficiency of jet filter dust collector:
 1 – jet efficiency; 2 – overall cleaning efficiency

Эффективность струйной части зависит от размера, плотности и других свойств пыли, расстояния сопла до входного отверстия бункера, конусности корпуса и других факторов, но основное влияние на нее оказывает скорость струи.

Эффективность очистки воздуха от мучной пыли с размерами частиц менее 63 мкм при скорости потока на выходе из сопла 19 м/с составляла от 70 до 81 %. С увеличением скорости струи до 27 м/с эффективность возросла до 91. Испытания проводились с использованием сопла диаметром 5,6 мм, расстояние его до бункера – 21 мм, диаметр входного отверстия бункера – 13,8 мм. Очистка воздуха от мучной пыли с размером частиц более 80 мкм при скорости струи 27 м/с позволила достичь эффективности очистки струйной частью более 93 % [10].

Несмотря на повышение эффективности инерционного осаждения от скорости струи, работа пылеуловителя при высоких скоростях нецелесообразна. Низкая скорость струи не позволяет создать необходимую силу инерции для мелких частиц пыли, а высокая скорость приводит к вихреобразованию потока при его развороте перед бункером и повышенному уносу пыли, из-за чего эффективность очистки практически не растет (кривая 1 рис. 4). Такой же эффект наблюдается при приближении сопла к бункеру и уменьшении угла сходимости конуса корпуса.

Частицы пыли с большей плотностью лучше отделяются от потока, а уменьшение их размера приводит к обратному эффекту. Так, при улавливании цемента с медианным размером пыли 15 мкм и плотностью 2900 кг/м³ эффективность осаждения была практически такой же, как и для песочной пыли с размером частиц 40 мкм и плотностью 1550 кг/м³.

На основе выполненных исследований рекомендуется при проектировании пылеуловителя скорость струи на выходе из сопла ω_c принимать в пределах 25–30 м/с, что позволит обеспечить эффективность очистки на уровне 80 % и невысокое гидравлическое сопротивление. Конусность корпуса предлагается принимать равной 60°. Длину сопла для стабилизации сужаемого потока рекомендуется принимать в размере 4–5 диаметров входного сечения сопла².

Для расчета гидравлического сопротивления струйной части пылеуловителя ее конструкцию принципиально можно представить как состоящую из известных элементов – конфузора, отвода и аэроканала (см. рис. 2), которые являются местными сопротивлениями. Тогда сопротивление струйной части для незапыленного потока можно определить на основе уравнения Вейсбаха как сумму долей скоростного напора в

этих элементах пылеуловителя³:

$$\Delta P_c = \zeta_{\text{конф}} \frac{\rho_g \omega_c^2}{2} + \zeta_{\text{отв}} \frac{\rho_g \omega_c^2}{2} + \zeta_{\text{отв}} \frac{\rho_g \omega_a^2}{2},$$

где $\zeta_{\text{конф}}$, $\zeta_{\text{отв}}$, ζ_a – коэффициенты местного сопротивления конфузора, отвода и аэроканала соответственно; ρ_g – плотность газа; ω_a – средняя скорость потока в аэроканале.

Коэффициент местного сопротивления конфузора можно выразить следующей зависимостью²:

$$\zeta_{\text{конф}} = K_1 \cdot \zeta_{\text{вн.с}},$$

где K_1 – коэффициент смягчения; $\zeta_{\text{вн.с}}$ – коэффициент местного сопротивления за счет изменения сечений сопла на входе и выходе, как от внезапного сужения.

Коэффициент смягчения при длине сопла больше двух диаметров выходного отверстия можно определить в зависимости от угла сходимости $\alpha_{\text{сх}}$ по таблице². Коэффициент $\zeta_{\text{вн.с}}$ определяется на основе критерия Re и соотношения сечений F на входе и F_o на выходе из сопла⁴ [11].

Коэффициент местного сопротивление отвода $\zeta_{\text{отв}}$, который характеризует потерю напора потока при развороте струи газа от бункера к аэроканалу, можно определить как произведение двух компонентов $\zeta_{\text{отв}} = AB^4$ [11]. Компонент A учитывает угол разворота, а компонент B – радиус разворота потока, поступающего в аэроканал. Угол разворота потока можно принять равным 180°, а радиус разворота – равным ширине потока на входе в аэроканал.

Коэффициент местного сопротивления для аэроканала рекомендуется рассматривать как внезапное расширение, при котором $\zeta_a = f(Re, S_o / S)$. Сечение S_o определяется как сечение на входе в аэроканал, а сечение S соответствует сечению цилиндрической части аппарата. С целью учета влияния пыли сопротивление струйной части ΔP_c при очистке запыленного газа для принятой скорости струи на выходе из сопла в пределах 25–30 м/с необходимо увеличить в 1,25 раза.

Сравнение опытных и расчетных значений гидравлического сопротивления для экспериментальной модели струйного пылеуловителя показало удовлетворительную сходимость в пределах ± 30 %.

³ Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии: учебник для вузов; 14-е изд., стер. М.: Альянс, 2008. 750 с.

⁴ Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков Ф.Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии: учеб. пособие для вузов. М.: Альянс, 2006. 575 с.

² Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям; под ред. М.О. Штейнберга. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1992. 672 с.

Таблица 1

Значения коэффициента k_1

Table 1

Coefficient k_1 values

$\alpha_{сх},^\circ$	10	20	30	40	60
k_1	0,42	0,23	0,19	0,16	0,18

Гидравлическое сопротивление зернистого слоя подчиняется закону Дарси и складывается из сопротивления фильтрующей перегородки $\Delta P_{фп}$ и прироста сопротивления за счет накопленного осадка пыли $\Delta P_{ос}$ [12, 13]:

$$\Delta P_{зс} = \Delta P_{фп} + \Delta P_{ос}$$

Для расчета сопротивления фильтрующей перегородки можно использовать зависимости, полученные применительно к шероховатым зернам [14]:

$$\Delta P_{фп} = (11,9 \cdot W_0^{1,3} \mu^{0,7} \rho_z^{0,3} H) / \varepsilon_0^3,$$

или для зерен с гладкой поверхностью:

$$\Delta P_{фп} = (1,89 \cdot W_0^{1,6} \cdot \mu^{0,4} \cdot f^{1,4} \rho_z^{0,6} H) / \varepsilon_0^3,$$

где W_0 – скорость фильтрования, м/с; μ – динамическая вязкость газа, Па·с; f – удельная поверхность зерен, м²/м³; ρ_z – плотность газа, кг/м³; H – толщина фильтрующего слоя, м; ε_0 – доля свободного объема зернистого слоя, м³/м³.

Для учета остаточного сопротивления после регенерации при использовании непрерывной регенерации фильтрующего слоя расчетное гидравлическое сопротивление $\Delta P_{ос}$ необходимо увеличить на 20–30 %.

Для расчета сопротивления осадка при пылеулавливании в зернистых фильтрах предложена следующая зависимость [15]:

$$\Delta P_{ос} = [K_{пс} \cdot W_0^2 (Z_{вх} - Z_{ост}) \cdot T] \cdot \varepsilon_0^2,$$

где $K_{пс}$ – коэффициент сопротивления пылевого слоя, с⁻¹; T – продолжительность межрегенерационного цикла фильтрования; $Z_{вх}$ – входная запыленность, кг/м³; $Z_{ост}$ – остаточная запыленность, кг/м³.

$K_{пс}$ определяет изменение сопротивления осадка за счет накопления пылевого осадка в единице объема за единицу времени и зависит от свойств пыли и газового потока. При накоплении пыли в зернистом слое происходит изменение доли его свободного объема. Это приводит к усилению турбулентности потока внутри каналов фильтрующей перегородки и одновременно к усилению вторичного уноса пыли. В этом случае при расчете гидравлического сопротивления следует учитывать эти

изменения, методика его расчета представлена в работе [15].

Общее гидравлическое сопротивление СФП рассчитывается с учетом сопротивлений струйной и фильтрующей части по уравнению:

$$\Delta P = \Delta P_c + \Delta P_{фп} + \Delta P_{ос}.$$

Для оценки эффективности улавливания пыли η фильтрующим слоем на основе закона улавливания частиц однородным фильтром предлагается зависимость

$$\eta = 1 - \exp \{ - \eta_3 \cdot K_n^{0,15} \}, \quad (1)$$

где η_3 – эффективность захвата частиц зернами фильтрующего слоя; K_n – показатель вторичного уноса пыли.

Эффективность захвата рассчитывается по зависимости:

$$\eta_3 = 2,3 K_3 \cdot H^{0,82} / W_0.$$

Коэффициент эффективности захвата предложено определять по формуле [16]

$$K_3 = 17850 \mu \delta^{0,25} [(1 - \varepsilon_0) / (P_{нп} \cdot d_3^{2,25})],$$

где δ – медианный размер пылевых частиц, м; $\rho_{нп}$ – насыпная плотность пыли, кг/м³; d_3 – диаметр зерен фильтрующего материала, м.

Толщину зернистого слоя в зависимости от эффективности очистки в пределах от 90 до 100 % предлагается в соответствии с работой [14] рассчитывать по зависимости:

$$H = 0,0152 \cdot [(\eta - 90) / (1 - \varepsilon_0)] + 0,05 \quad (2)$$

Показатель вторичного уноса рассчитывается по уравнению

$$K_n = 1 - K_y (T / T_{пр})^{0,15},$$

где K_y – коэффициента уноса пыли; T – продолжительность межрегенерационного цикла фильтрования, с; $T_{пр}$ – время пребывания запыленного потока в зернистом слое, с.

Для расчета коэффициента уноса предложена следующая зависимость [16]:

$$K_y = \beta / (\delta \cdot \rho_{пп} \cdot \operatorname{tg} \alpha_0),$$

где β – опытный коэффициент (для непо-

движного слоя $\beta = 3,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{кг}$; $\text{tg}\alpha_o$ – тангенс угла естественного откоса пыли, характеризующего сыпучесть пыли.

Время пребывания выражается зависимо-стью от толщины зернистого слоя и скорости запыленного потока в его каналах:

$$T_{\text{пр}} = H\varepsilon_o / W_o \quad (3)$$

Продолжительность межрегенерационного цикла фильтрования принимается из соотношения:

$$T = \tau_{\text{пр}} / K_f, \quad (4)$$

где K_f – фактор стационарности, значение которого принимается не менее 0,0002.

Расчет толщины и поверхности фильтрующего слоя выполняется по следующей методике. Для заданной эффективности очистки по уравнению (2) определяется толщина зернистого слоя. Из уравнения (1), определяющего эффективность очистки в зернистом слое, рассчитывается скорость фильтрования W_o . По зависимости (3) находится время пребывания запыленного потока в зернистом слое. Принимается значение фактора стационарности на

15–20 % больше рекомендуемого K_f , и по формуле (4) рассчитывается продолжительность межрегенерационного цикла фильтрования T . Используя заданную производительность по очищаемому газу Q , $\text{м}^3/\text{с}$, определяется величина поверхности фильтрования зернистого слоя по уравнению $F = Q / W_o$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнены исследования очистки запыленных газов струйно-фильтрационным пылеуловителем. Определены значения скорости струи на срезе сопла и конструктивные размеры элементов пылеуловителя, которые обеспечивают эффективность очистки в струйной части не менее 80 %, а общую эффективность пылеуловителя – на уровне 98–99 % и более. Предложены методы расчета гидравлического сопротивления пылеуловителя, учитывающие сопротивление струйной части, фильтрующей перегородки и прироста сопротивления при накоплении пыли в зернистом слое. Разработана методика расчета эффективности очистки зернистым слоем, которая позволяет определить толщину фильтрующей перегородки, скорость, поверхность и продолжительность межрегенерационного цикла фильтрования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Trevor S., George C. Filters and Filtration Handbook. (Sixth Edition). Philadelphia: Elsevier Ltd, 2015. 444 p.

2. Coulson J.M., Richardson J.F. Chemical engineering. Vol. 2. Particle Technology and Separation Processes. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2002. 1183 p.

3. Peukert W., Wadenpohl C. Industrial separation of fine particles with difficult dust properties // Powder Technology. 2001. Vol. 118. Issue 1. P. 136–148. [https://doi.org/10.1016/S0032-5910\(01\)00304-7](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(01)00304-7)

4. Guan L., Gu Z., Yuan Z., Yang L., Zhong W., Wu Y., et al. Numerical study on the penetration of ash particles in a three-dimensional randomly packed granular filter // Fuel. 2016. Vol. 163. Issue 1. P. 122–128. : <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.09.056>

5. Chen Y.-S., Chyou Y.-P., Li S.-C. Hot gas clean-up technology of dust particulates with a moving granular bed filter // Applied Thermal Engineering. 2015. Vol. 74. P. 146–155. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.03.015>

6. Рудыка Е.А., Батурина Е.В. Анализ пылеочистного оборудования, используемого при производстве растворимых порошков // Вестник Воронежского государственного университета инженерной технологии. 2016. N 2 (68). С. 193–196. <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2016-2-193-196>

7. Подпороинов Б.Ф., Семенов А.С. Пути повышения эффективности пылеулавливания аппаратов в системах очистки вентиляцион-

ных выбросов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.А. Шухова. 2016. N 11. С. 104–107. <https://doi.org/10.12737/22434>

8. Асламов А.А., Ляпустин Р.Ю., Асламова В.С. Методика расчета эффективности циклонов // Современные технологии и научно-технический прогресс. 2018. Т. 1. С. 7–8.

9. Пат. 144702, Российская Федерация, МПК B01D46/30. Устройство для очистки газов от пыли / Н.М. Самохвалов, Ю.А. Зыкова, В.В. Виноградов; заявитель и патентообладатель Иркутский государственный технический университет. № 2014103084/12; заявл. 29.01.2014; опубл. 27.08.2014, Бюл. № 24. 2 с.

10. Самохвалов Н.М., Зыкова Ю.А., Виноградов В.В. Пылеуловитель струйно-фильтрационного действия // Экология и промышленность России. 2016. Т. 20. N 1. С. 4–7. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2016-1-4-7>

11. Асламова В.С. Расчет гидравлического сопротивления прямоточного циклона с промежуточным отбором // Известия Томского политехнического университета. 2008. Т. 313. N 4. С. 54–60.

12. Wu B.F.-C., Huang H.-T. Hydraulic resistance induced by deposition of sediment in porous medium // Journal of Hydraulic Engineering. 2000. Vol. 126. N. 7. P. 547–551.

13. Зыкова Ю.А., Самохвалов Н.М., Виноградов В.В. Сопротивление пылевого осадка в щелевом фильтре // Известия Томского политех-

нического университета. Инжиниринг георесурсов. 2016. Т. 327. N 4. С. 88–96.

14. Самохвалов Н.М. Фильтрование запыленных газов насыпной зернистой средой: монография. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2012. 140 с.

15. Самохвалов Н.М., Виноградов В.В., Зыко-

ва Ю.А. Очистка промышленных газов от пыли: монография. Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2015. 170 с.

16. Самохвалов Н.М., Скачков Е.В. Гидродинамика и эффективность улавливания пыли в зернистых фильтрах // Химическая промышленность сегодня. 2009. N 6. С. 49–56.

REFERENCES

1. Trevor S, George C. *Filters and Filtration Handbook*. 6th ed. Philadelphia: Elsevier Ltd.; 2015. 444 p.

2. Coulson JM, Richardson JF. *Chemical engineering*. Vol. 2. Particle Technology and Separation Processes. Oxford: Butterworth-Heinemann; 2002. 1183 p.

3. Peukert W, Wadenpohl C. Industrial separation of fine particles with difficult dust properties. *Powder Technology*. 2001;118(1):136–148. [https://doi.org/10.1016/S0032-5910\(01\)00304-7](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(01)00304-7)

4. Guan L, Gu Z, Yuan Z, Yang L, Zhong W, Wu Y, et al. Numerical study on the penetration of ash particles in a three-dimensional randomly packed granular filter. *Fuel*. 2016;163(1):122–128. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.09.056>

5. Chen Y-S, Chyou Y-P, Li S-C. Hot gas clean-up technology of dust particulates with a moving granular bed filter. *Applied Thermal Engineering*. 2015;74:146–155. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.03.015>

6. Rudyka EA, Baturina EV. Analysis of dust removal equipment used in the manufacture of soluble powders. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenernykh tekhnologii* = Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies. 2016;2:193–196. (In Russian) <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2016-2-193-196>

7. Podporinov BF, Seminenko AS. Ways to increase the efficiency of dust collection in ventilation exhaust cleaning systems. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.A. Shukhova* = Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov 2016;11:104–107. (In Russian) <https://doi.org/10.12737/22434>

8. Aslamov AA, Lyapustin RY, Aslamova VS. Methodology for calculating the efficiency of cyclones. *Sovremennye tekhnologii i nauchno-*

tekhnicheskii progress = Modern technologies and technical progress. 2018;1:7–8. (In Russian)

9. Samokhvalov NM, Zyкова YuA, Vinogradov VV. Device for cleaning gases from dust. Patent RF, no. 144702; 2014. (In Russian)

10. Samokhvalov NM, Zyкова YuA, Vinogradov VV. Dust collector for jet filtering action. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* = Ecology and Industry of Russia. 2016;20(1):4–7. (In Russian) <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2016-1-4-7>

11. Aslamova VS. Calculation of hydraulic resistance of direct-flow cyclone with intermediate selection. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta* = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. 2008;313(4):54–60. (In Russian)

12. Wu BF-C, Huang H-T. Hydraulic resistance induced by deposition of sediment in porous medium. *Journal of Hydraulic Engineering*. 2000; 126(7):547–551.

13. Zyкова YuA, Samokhvalov NM, Vinogradov VV. Dust Resistance in a Slit Filter. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov* = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. 2016;327(4):88–96. (In Russian)

14. Samokhvalov NM. *Fil'trovanie zapylennykh gazov nasypnoi zernistoi sredoi* = Filtration of dusty gases in bulk granular medium. Irkutsk: Irkutskii natsional'nyi issledovatel'skii tekhnicheskii universitet; 2012. 140 p. (In Russian)

15. Samokhvalov NM, Vinogradov VV, Zyкова YuA. *Ochistka promyshlennykh gazov ot pyli* = Purification of industrial gases from dust. Irkutsk: Irkutskii natsional'nyi issledovatel'skii tekhnicheskii universitet; 2015. 170 p. (In Russian)

16. Samokhvalov NM, Skachkov EV. Hydrodynamics and dust collection efficiency in granular filters. *Khimicheskaya promyshlennost' segodnya* = Chemical industry today. 2009;6:49–56. (In Russian)

Критерии авторства

Самохвалов Н.М., Виноградов В.В., Зыкова Ю.А. выполнили экспериментальную работу, на основании полученных результатов провели обобщение и написали рукопись. Самохвалов Н.М., Виноградов В.В., Зыкова Ю.А. имеют на статью равные авторские права и несут равную ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution

Nikolay M. Samokhvalov, Vladimir V. Vinogradov, Yulia A. Zyкова carried out the experimental work, on the basis of the results summarized the material and wrote the manuscript. Nikolay M. Samokhvalov, Vladimir V. Vinogradov, Yulia A. Zyкова have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Самохвалов Николай Митрофанович,
к.т.н., доцент,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,
Российская Федерация,
✉ e-mail: snm4186@mail.ru

Виноградов Владимир Владимирович,
к.т.н., электроник,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,
Российская Федерация,
e-mail: vvv158@mail.ru

Зыкова Юлия Александровна,
преподаватель,
Иркутский национальный исследовательский
технический университет,
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,
Российская Федерация,
e-mail: ulya2279@mail.ru

AUTHORS' INDEX

Nikolay M. Samokhvalov,
Ph.D. (Engineering), Associate Professor,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074,
Russian Federation,
e-mail: snm4186@mail.ru

Vladimir V. Vinogradov,
Ph.D. (Engineering), Electronics,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074,
Russian Federation,
e-mail: vvv158@mail.ru

Yulia A. Zyкова,
Senior Teacher,
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk 664074,
Russian Federation,
e-mail: ulya2279@mail.ru