

Научная статья  
УДК 66.021.1:66.074.9  
DOI: <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2022-12-2-339-348>



## Эффективность очистки газа от пыли в щелевом фильтре

Николай Митрофанович Самохвалов, Владимир Владимирович Виноградов

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

Автор, ответственный за переписку: Самохвалов Николай Митрофанович, [snm4186@mail.ru](mailto:snm4186@mail.ru)

**Аннотация.** Очистка промышленных газов от пыли является одной из важнейших экологических задач по защите окружающей среды. Разнообразие технологических условий образования пыли, физико-химических свойств газа и улавливаемых частиц, повышение технических и экономических требований к процессам очистки диктует поиск новых, более совершенных и эффективных способов очистки запыленных газов и конструкций пылеулавливающих аппаратов. При очистке горячих, химически агрессивных газов или улавливании абразивной пыли применение электрофильтров, рукавных, волокнистых и зернистых фильтров часто связано с трудностями защиты аппаратов от вредных факторов либо с недостаточной эффективностью очистки. Щелевые фильтры, в силу своих конструктивных особенностей, могут быть использованы при решении таких задач. На основании теоретических представлений и экспериментальных исследований разработана инженерная методика расчета щелевых фильтров, позволяющая моделировать и проектировать щелевые фильтры с заданными показателями работы и обеспечивать высокую эффективность очистки и низкое гидравлическое сопротивление. В основу этой методики положены теоретические закономерности фильтрования с использованием основных механизмов осаждения пылевых частиц на изолированных цилиндрах применительно к стационарной стадии процесса фильтрования. Разработана программа для ЭВМ, позволяющая моделировать процесс очистки запыленных газов в щелевых фильтрах. Она дает возможность по заданной эффективности очистки и гидравлическому сопротивлению определять оптимальные параметры работы, конструктивные размеры и условия регенерации щелевых фильтров с учетом свойств пыли и газа при длительной непрерывной работе фильтра.

**Ключевые слова:** фильтрование, щелевой фильтр, пылеулавливание, эффективность, стационарность

**Для цитирования:** Самохвалов Н. М., Виноградов В. В. Эффективность очистки газа от пыли в щелевом фильтре // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2022. Т. 12. N 2. С. 339–348. <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2022-12-2-339-348>.

### CHEMICAL TECHNOLOGY

Original article

## Efficiency of dusted gas cleaning using a slotted filter

Nikolay M. Samokhvalov, Vladimir V. Vinogradov

Irkutsk National Research Technical University,  
Irkutsk, Russian Federation

Corresponding author: Nikolay M. Samokhvalov, [snm4186@mail.ru](mailto:snm4186@mail.ru)

**Abstract.** The cleaning of industrial gases from dust is one of the most significant current environmental protection problems. The search for new, more advanced and effective ways to clean dust gases and dust collector designs is based on the diversity of technological conditions for dust formation, the physicochemical properties of gases and trapped particles, and an increase in technical and economic requirements for cleaning processes. When cleaning hot or chemically aggressive gases and capturing abrasive dust, the use of electrostatic precipitators, bag, fibrous and granular filters is often associated with difficulties in protecting the devices from harmful factors or ensuring sufficient cleaning efficiency. The design features of slotted filters

permit their use in solving such problems. An engineering method for calculating slotted filters developed on the basis of theoretical ideas and experimental studies is used to model and design slotted filters with specified performance indicators to ensure high cleaning efficiency and low hydraulic resistance. This technique is based on theoretical patterns of filtration using basic dust particle deposition mechanisms on isolated cylinders in relation to the stationary stage of the filtration process. A computer program that simulates the process of cleaning dusty gases in slotted filters has been developed. This makes it possible to determine the optimal operating parameters, design dimensions and regeneration conditions of slotted filters based on a specified cleaning efficiency and hydraulic resistance, taking into account the properties of dust and gas during prolonged continuous operation of the filter.

**Keywords:** filtration, slotted filter, dust collection, efficiency, stationarity

**For citation:** Samokhvalov N. M., Vinogradov V. V. Efficiency of dusted gas cleaning using a slotted filter. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya = Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2022;12(2):339-348. (In Russian). <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2022-12-2-339-348>.

## ВВЕДЕНИЕ

Для промышленной очистки запыленных газов фильтрованием используются тканевые, волокнистые, зернистые и воздушные фильтры. В них применяются различные пористые перегородки: тканевые и нетканые волокнистые материалы, зернистые слои, полужесткие и жесткие пористые перегородки, металлические сетки и перфорированные листы [1].

В отечественной и зарубежной литературе [2–6] имеются сведения об использовании щелевых фильтров, в которых фильтрующая перегородка образована круглой проволокой или перфорированной лентой. Однако эти фильтры предназначены для очистки суспензий и не приспособлены для улавливания пыли. В 2011 году запатентован щелевой фильтр для очистки газа от пыли [7], а в 2015 году – его усовершенствованная конструкция [8]. В этих фильтрах фильтрующая перегородка образована несколькими слоями гладкой проволоки, навитой на каркас в виде «беличьего колеса» или на перфорированный цилиндр с прокладками между слоями и витками проволоки. Внутри перегородки размещается регенерирующее устройство с вращающимися и одновременно перемещающимися соплами. Однако методы расчета конструктивных размеров щелевых фильтров и технологических параметров, обеспечивающих требуемую эффективность очистки, в литературе отсутствуют.

Процесс фильтрации можно разделить на две стадии – стационарную и нестационарную [9]. Стационарная является начальной стадией, в которой эффективность очистки и гидравлическое сопротивление изменяются незначительно, а накопление уловленных частиц пыли и структурные характеристики фильтрующей перегородки практически не изменяются во времени. Эта стадия плавно переходит в нестационарную, которая сопровождается значительным накоплением пыли в фильтрующем слое и непрерывным изменением структуры перегородки. В результате происходит постоянное снижение эффективности и рост гидравлического сопротивления,

что осложняет их оценку.

Исследование процесса фильтрации связано с установлением зависимости эффективности улавливания пылевых частиц и гидравлического сопротивления фильтра от гидродинамических условий, структуры перегородки и свойств пыли. Теория фильтрации разработана применительно к изолированному цилиндру или шару. Она описывает эффективность улавливания частиц за счет различных механизмов осаждения и находит применение для оценки нестационарного режима фильтрования, но с учетом поправочных коэффициентов, полученных на основе экспериментальных данных.

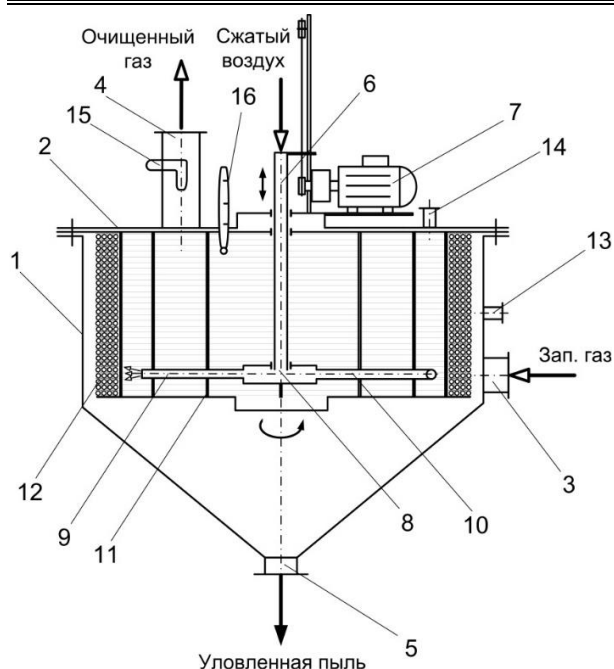
Основными механизмами осаждения шарообразных частиц при фильтровании являются гравитационное, инерционное, диффузионное, электрическое осаждение и зацепление (эффект касания) [10, 11]. Оценка влияния механизмов осаждения на эффективность очистки осуществляется с помощью безразмерных параметров осаждения – гравитационного  $G$ , инерционного  $Stk$ , диффузионного  $D$ , электрического  $K_E$  – и параметра касания  $R$ . Для учета несферичности частиц пыли используется коэффициент формы, который определяется соотношением:

$$\chi = \frac{\delta_3^2}{\delta^2},$$

где  $\delta_3$  – эквивалентный диаметр улавливаемой частицы;  $\delta$  – размер диаметра частиц пыли.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Объектом настоящего исследования являлся щелевой фильтр с перегородкой из нескольких слоев стальной проволоки, навитой на перфорированный цилиндрический каркас, конструкция которого представлена на рис. 1. В перегородках использовалась гладкая проволока диаметром 0,8; 1,0; 1,2 и 1,4 мм и проволока, переплетенная тонкой медной нитью размером 150 мкм. Количество слоев проволоки изменялось от 3 до 7.



**Рис. 1.** Лабораторная модель щелевого фильтра:  
 1 – корпус; 2 – крышка; 3 – входной патрубок;  
 4 – выходной патрубок; 5 – патрубок для бункера  
 уловленной пыли; 6 – регенерирующее устройство;  
 7 – мотор-редуктор; 8 – газораспределительная камера;  
 9 – продувочное сопло; 10 – реактивное сопло;  
 11 – каркас фильтрующей перегородки;  
 12 – щелевая фильтрующая перегородка;  
 13, 14 – отборники для измерения давления;  
 15 – пробоотборник; 16 – термометр

**Fig. 1.** Laboratory model of slotted filter:  
 1 – body; 2 – cover; 3 – inlet pipe;  
 4 – outlet pipe; 5 – branch pipe for the trapped dust bin;  
 6 – regenerating device;  
 7 – motor-reducer; 8 – gas distribution chamber;  
 9 – purge nozzle; 10 – jet nozzle;  
 11 – frame of the filtering partition;  
 12 – slotted filtering partition;  
 13, 14 – sampling devices for measuring pressure;  
 15 – sampler; 16 – thermometer

Исследовалась эффективность очистки воздуха от угольной, цементной, песочной пыли и пылевидного поливинилхлорида (ПВХ). Свойства пыли представлены в табл. 1. Для характеристики пыли использовались медианный размер частиц  $\delta_{50}$ , угол естественного откоса  $\alpha_0$ , определяющий сыпучесть, истинная (кажущаяся) плотность  $\rho$  и насыпная плотность  $\rho_{нп}$ .

Эксперименты выполнялись при скоростях фильтрации  $W_0$  от 0,03 до 0,15 м/с. При проведении опытных испытаний измерялись следующие параметры: расход воздуха – ротаметром РС-5 (ООО «Прибор-М», Россия), температура воздуха – ртутным термометром, гидравлическое сопротивление перегородки – микроманометром ММН-240 (ОАО «Лубенский завод счетных машин», Украина), а также устанавливалась

продолжительность цикла фильтрования  $\tau$  с помощью секундомера. Эффективность очистки  $\eta$  определялась по формуле:

$$\eta = \frac{Z_{ex} - Z_{ост}}{Z_{ex}},$$

где  $Z_{ex}$  – входная запыленность потока;  $Z_{ост}$  – остаточная запыленность потока.

**Таблица 1.** Основные характеристики пыли

**Table 1.** Main characteristics of dust

Пыль	$\delta_{50}$ , мкм	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\rho_{нп}$ , кг/м <sup>3</sup>	$\alpha_0$ , град.
Угольная	21	1420	800	60
Угольная	55	1420	843	43
Цементная	15	2900	1662	70
Песочная	30	1550	916	50
Пылевидный поливинилхлорид	28	1463	810	55

Входная запыленность определялась из отношения навески пыли, поданной в щелевой фильтр за время фильтрования, к объему воздуха, прошедшего за это время через фильтр. Остаточная запыленность потока замерялась весовым способом с внешней фильтрацией путем отбора проб воздуха аспиратором через наконечник НИИОГАЗа и фильтровальный патрон<sup>1</sup>.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Исследования [12–15] показали, что процесс улавливания пыли в щелевой перегородке при постоянной скорости фильтрования является процессом с закупориванием пор. Он протекает с накоплением пыли внутри каналов фильтрующей перегородки, что приводит к уменьшению доли свободного объема и живого сечения фильтра. В результате увеличивается скорость в каналах перегородки и, следовательно, возрастает динамическое давление на уловленный пылевой слой. Из-за этого происходит непрерывное перемещение фронта пыли в глубину перегородки. Накопление пыли в каналах слоя определяется ее входной концентрацией в потоке, скоростью фильтрования, размером пылевых частиц и другими факторами. При заданных условиях фильтрования скорость этого перемещения выражается изменением глубины  $h$  проникновения фронта пыли во времени:

$$v_f = \frac{dh}{d\tau}.$$

В то же время скорость фронта пыли зависит от скорости пылегазового потока в каналах ще-

<sup>1</sup>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.

левой перегородки  $W$ . Соотношение этих скоростей будет влиять на проскок пыли, т.е. на эффективность очистки. Обозначим это отношение через величину:

$$K_f = \frac{v_f}{W}$$

или

$$K_f = \frac{\varepsilon_o}{W_o} \frac{dh}{d\tau},$$

где  $\varepsilon_o$  – доля свободного объема щелевой перегородки.

Разделим переменные и, считая для стационарного процесса  $\varepsilon_o = const$ , проинтегрируем полученное уравнение по времени фильтрования от 0 до  $\tau$ , а по глубине перемещения фронта пыли – от 0 до толщины фильтрующей перегородки  $H$ :

$$K_f \int_0^\tau d\tau = \frac{\varepsilon_o}{W_o} \int_0^H dh$$

или

$$K_f = \frac{\varepsilon_o H}{W_o \tau}.$$

В начальном периоде фильтрования накопление пыли происходит в каналах лобового слоя и скорость потока в них фактически зависит от живого сечения пористой перегородки  $\psi_o$ . Тогда можно заменить  $\varepsilon_o$  на  $\psi_o$ :

$$K_f = \frac{\psi_o H}{W_o \tau}.$$

Величина  $K_f$  названа фактором стационарности, так как комплекс обратный ему является критерием гомохронности, характеризующей стационарность процесса. Отношение  $\psi_o H / W_o$  определяет время пребывания  $\tau_{np}$  запыленного потока в фильтрующей перегородке, т.е. фактор стационарности можно выразить также временем пребывания к продолжительности цикла фильтрования  $K_f = \tau_{np} / \tau$ .

С использованием результатов экспериментальных исследований были построены графические зависимости  $\eta$  от  $K_f$  (рис. 2). На этом рисунке представлены результаты, полученные при улавливании угольной пыли в щелевом фильтре с 5-ю слоями проволоки. На нем прослеживается логарифмический характер зави-

симости  $\eta = \varphi(K_f)$ . Эффективность очистки зависит от диаметра проволоки  $d_{np}$  и от количества ее слоев в фильтрующей перегородке  $n$ .

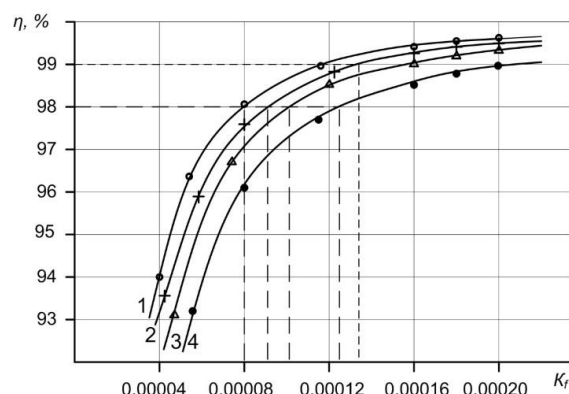


Рис. 2. Изменение эффективности очистки от фактора стационарности: 1 –  $d_{np} = 1,4$  мм; 2 –  $d_{np} = 1,2$  мм; 3 –  $d_{np} = 1,0$  мм; 4 –  $d_{np} = 0,8$  мм

Fig. 2. Cleaning efficiency versus stationarity factor: 1 –  $d_{pr} = 1.4$  mm; 2 –  $d_{pr} = 1.2$  mm; 3 –  $d_{pr} = 1.0$  mm; 4 –  $d_{pr} = 0.8$  mm

Видно, что с увеличением фактора стационарности эффективность очистки повышается и стабилизируется. При определенном значении фактора стационарности кривая эффективности переходит в линию, асимптотически приближающуюся к показателю 100% эффективности. Точку этого перехода можно принять за значение граничного фактора стационарности  $K_{fep}$ . Граничный фактор стационарности – это такое соотношение времени пребывания и продолжительности фильтрования, которое обеспечивает заданную эффективность очистки.

Область пологой линии можно считать стационарным периодом фильтрования. Она соответствует высокой и достаточно стабильной во времени эффективности очистки. В этом периоде накопление пыли в фильтрующей перегородке незначительное, проскок пыли определяется структурой щелевого слоя, свойствами пыли и параметрами процесса фильтрования [16, 17].

Для оценки эффективности очистки  $\eta$  в щелевом фильтре за основу принят закон улавливания частиц однородным фильтром, который определяет проскок пыли  $K$  в зависимости от показателя структуры фильтрующего слоя  $\xi$ , коэффициента захвата частиц единицей длины улавливающего элемента под действием механизмов осаждения  $\eta_\Sigma$  и описывается уравнением [10]:

$$K = \exp(-\xi \times \eta_\Sigma),$$

где  $K = 1 - \eta$ .

Однако это уравнение не учитывает изменений проскока пыли во времени из-за накопления ее в фильтрующем слое. На практике коэффи-

коэффициент захвата частиц  $\eta_{\Sigma}$  рассчитывается на основе экспериментальных измерений коэффициента проскока  $K$ , толщины перегородки и плотности упаковки при известном размере единичного фильтрующего элемента.

Предлагается [18, 19] эффективность очистки в щелевом фильтре рассчитывать на основе уравнения:

$$\eta = 1 - e^{-\xi \eta_s K_n}, \quad (1)$$

где  $\eta_s$  – эффективность захвата частиц фильтрующей перегородкой;  $K_n$  – показатель влияния фактора стационарности процесса на проскок пыли.

Показатель структуры перегородки рассчитывается по формуле:

$$\xi = \frac{0,283H(1 - \varepsilon_o)}{d_{np} \varepsilon_o}.$$

Доля свободного объема определяется как отношение объема пустот к общему объему фильтрующего слоя  $V_{\text{фс}}$ :

$$\varepsilon_o = \frac{(V_{\text{фс}} - V_{\text{пр}})}{V_{\text{фс}}},$$

где  $V_{\text{пр}}$  – объем, занимаемый проволокой.

Если для фильтрующего слоя используется проволока с поперечным оребрением (рифлением) или прокладками между слоями и витками проволоки, то доля свободного объема рассчитывается с учетом объема, занимаемого ребрами, выпуклостями или прокладками.

Толщина перегородки для шахматной структуры щелевого слоя рассчитывается по зависимости [16]:

$$H_{(w)} = n \times d_{np} + h_c \times (n - 1) - 0,1316 \times d_{np} \times (n - 1),$$

где  $h_c$  – ширина щели между слоями проволоки.

При использовании свободной (например, ручной) навивки фильтрующего слоя упругой гладкой проволокой (например, стальной) размер щелей составляет 50–80 мкм. При применении мягкой проволоки размер щелей, особенно между витками проволоки  $h_w$ , может возрастать до 150 мкм и более. Для получения более точного и равномерного размера щелей предлагается использовать прокладки между слоями и витками или проволоку с поперечным оребрением (рифлением), обеспечивающим необходимый размер щелей.

Эффективность захвата частиц  $\eta_s$  фильтрующей перегородкой предложено определять на

основании главных действующих механизмов осаждения при пылеулавливании. Проведенная оценка параметров осаждения в щелевом фильтре для пыли с размерами частиц от 1 до 100 мкм, плотностью от 1400 до 3000 кг/м<sup>3</sup>, при скорости фильтрования в пределах от 0,05 до 0,15 м/с показала, что основными механизмами осаждения являются инерционное, гравитационное, диффузионное осаждение и зацепление. Параметр осаждения от статического электричества не определялся. Наибольшее влияние на захват частиц оказывало инерционное осаждение, наименьшее – диффузионное осаждение. При указанных условиях осаждение протекает в переходном режиме обтекания проволоки, в котором  $0,2 \leq Re \leq 150$  [10].

Однако при улавливании пыли на эффективность очистки влияют и другие факторы. К ним в первую очередь относятся инерционное и центробежное осаждение при вводе запыленного потока в пылеуловитель. Их влияние зависит от конструктивных особенностей ввода потока в аппарат и скорости фильтрования. На эффективность осаждения в небольшой степени влияют электростатика, коагуляция частиц пыли и др.

Для расчета эффективности захвата частиц с учетом этих факторов и основных механизмов осаждения предложено использовать зависимость:

$$\eta_s = A \times K_s,$$

где  $A$  – поправочный коэффициент, учитывающий влияние сопутствующих факторов на эффективность улавливания пыли в зависимости от гидродинамики очищаемого потока;  $K_s$  – коэффициент захвата частиц единичным витком проволоки под действием механизмов осаждения:

$$K_s = 1 - (1 - \eta_R)(1 - \eta_D)(1 - \eta_{Stk})(1 - \eta_G),$$

где  $\eta_R$ ,  $\eta_D$ ,  $\eta_{Stk}$ ,  $\eta_G$  – эффективность захвата частиц соответственно механизмами зацепления, диффузионного, инерционного и гравитационного осаждения, которые рассчитываются по известным методикам [10, 11].

Эффективность механизма зацепления для переходного режима обтекания улавливающего тела рекомендуется определять по формуле:

$$\eta_R = R^2 \times Re_v^{0,0625},$$

где  $Re_v$  – критерий Рейнольдса при обтекании проволоки;  $R$  – параметр зацепления, который устанавливается отношением размера частицы к диаметру улавливающего тела (проволоки):

$$R = \frac{\delta}{d_{np}}.$$

Критерий Рейнольдса при обтекании проволоки определяется зависимостью:

$$Re_v = \frac{W_o d_{np} \rho_g}{\mu_g},$$

где  $\rho_g$  – плотность газа;  $\mu_g$  – динамическая вязкость газа.

Расчет эффективности диффузионного осаждения осуществляется по уравнению:

$$\eta_D = \frac{3,19}{Pe^{0,5}},$$

где  $Pe$  – диффузионный критерий Пекле:

$$Pe = \frac{W_o d_{np}}{\varepsilon_o D},$$

где  $D$  – коэффициент диффузии.

Коэффициент диффузии рассчитывается как функция размера частиц:

$$D = \frac{1,38 \times 10^{-23} C \times T}{3\pi\delta\mu},$$

где  $C$  – поправка Кенингема–Милликена, учитывающая повышение подвижности частиц;  $T$  – абсолютная температура газа (К);  $\mu$  – вязкость газа.

Поправка  $C$  при размере частиц от 1 до 5 мкм составляет от 1,16 до 1,009, а при размере частиц 10 мкм и более она равна 1.

Эффективность захвата частиц за счет инерционного осаждения определяется на основе критерия Стокса  $Stk$ :

$$\eta_{Stk} = \frac{Stk^3}{Stk^3 + 1,54Stk^2 + 1,76}.$$

Известно [10], что в переходной области ( $0,2 < Re < 150$ ) обтекания изолированного цилиндра критерий Стокса определяется критерием Рейнольдса и описывается уравнением:

$$(Stk/2)^{0,5} = 1,253Re_v^{-0,0685}.$$

По аналогии с этим уравнением применительно к щелевой фильтрующей перегородке получена зависимость:

$$Stk = 2,24Re_v^{-0,0342}.$$

Поправочный коэффициент  $A$  предлагается рассчитывать как функцию от критерия  $Stk$  из эмпирической зависимости:

$$A = Stk^{2,35}.$$

Влияние механизма гравитационного осаждения на эффективность захвата учитывается через соотношение скорости осаждения пылевых частиц под действием силы тяжести и скорости газового потока в каналах фильтрующей перегородки и описывается зависимостью:

$$\eta_G = \frac{Stk}{2Fr},$$

где  $Fr$  – критерий Фруда.

Здесь используется классический критерий Стокса, который выражается уравнением:

$$Stk = \frac{W_o \delta^2 \rho}{18\mu \varepsilon_o d_{np}},$$

а критерий Фруда:

$$Fr = \frac{W_o^2}{g\delta\varepsilon_o^2},$$

где  $g$  – ускорение свободного падения.

Показатель  $K_n$  в уравнении (1) определяется зависимостью:

$$K_n = 1 - \frac{k_y}{K_f^{0,17}},$$

где  $k_y$  – коэффициент уноса пыли, который предлагается рассчитывать по эмпирической зависимости от размера пыли  $\delta$ , насыпной плотности  $\rho_{np}$  и сыпучести пыли:

$$k_y = \frac{0,0056}{\delta^{0,96} \times \rho_{np} \times tg\alpha_o},$$

где  $\alpha_o$  – угол естественного откоса пыли, который рекомендуется принимать по данным, представленным в табл. 2.

Таблица 2. Значения тангенса угла естественного откоса

Table 2. Values of the tangent of the angle of repose

$\delta$ , мкм	10	20	30	40	50	55	> 55
$\alpha_o$ , град.	70	60	55	50	45	43	< 40
$tg\alpha_o$	2,74	1,73	1,43	1,19	1,0	0,93	0,84

Общую эффективность очистки щелевого фильтра можно рассчитывать по медианному размеру пыли  $\delta_{50}$  или через фракционные эф-

фективности. Расчет на основе фракционных эффективностей осуществляется по формуле:

$$\eta = \frac{1}{100} \sum (\eta_{фр} \cdot \Delta R),$$

где  $\eta_{фр}$  – фракционная эффективность, %;  $\Delta R$  – содержание фракции пыли в газе на входе в пылеуловитель, %.

Фракционные эффективности очистки и эффективность по медианному размеру рассчитываются по одинаковой методике. Эффективность очистки, определенная с учетом фракционного состава пыли, точнее характеризует возможности пылеуловителя. При проектировании щелевого пылеуловителя основные размеры фильтра и параметры его работы устанавливаются по заданной эффективности очистки исходя из медианного диаметра пыли, а затем эффективность его работы уточняется путем расчета с учетом фракционного состава пыли. При расхождении результатов проводится необходимая корректировка параметров его работы (скорости фильтрования, продолжительности межрегенерационного цикла, условий регенерации).

Изложенная методика расчета проверена на экспериментальном щелевом фильтре при очистке различной пыли. В табл. 3 представлены некоторые сравнительные результаты опытов и расчетов при очистке воздуха от угольной и цементной пыли, дающие также представление о

возможностях щелевого фильтра. Испытания на угольной пыли проводились при температуре 25–30 °С, а цемента – при температуре 50 °С.

Исследования показали, что с увеличением диаметра проволоки и числа ее слоев в перегородке эффективность очистки повышается, но и существенно возрастает гидравлическое сопротивление. Использование прокладок между слоями и витками проволоки или оребрения приводит к заметному снижению сопротивления, однако чрезмерное увеличение  $h_{щ}$  заметно ухудшает эффективность очистки.

Рассмотренная методика расчета использована для разработки математической модели процесса фильтрования щелевой перегородкой. Модель позволяет учитывать влияние на эффективность очистки фракционного и дисперсного состава пыли, структурных характеристик перегородки, механизмов осаждения, вторичного уноса пыли и фактора стационарности процесса, выявлять параметры, которые обеспечивают стабильную высокоэффективную очистку газа от пыли [20]. На их основе создана программа для ЭВМ, позволяющая производить расчет и оптимизацию основных размеров щелевого фильтра, параметров фильтрования, гидравлического сопротивления и условий регенерации фильтра. Она дает возможность проектирования промышленных установок для очистки различных запыленных газов.

Таблица 3. Сравнение опытных и расчетных данных щелевого фильтра

Table 3. Comparison of experimental and calculated data of slotted filter

$d_{пр}$ , мм	$n$ , шт.	$W_0$ , м/с	$\tau$ , с	$\delta_{50}$ , мкм	Эффективность очистки, %			$\Delta P_{щ}$ , Па	
					$\eta_{оп}$	$\eta_{50}$	$\eta_{фр}$		
Угольная пыль, $h_{щ} = 80$ мкм, $h_c = 150$ мкм, перегородка с прокладками между слоями									
0,8	3	0,039	110	21	83,18	85,38	88,58	73,5	
	5	0,039	200	21	95,83	95,37	96,52	247,0	
	5	0,085	150	21	89,96	90,17	92,38	546,1	
	4	0,048	310	21	80,27	79,89	79,11	178,2	
1,2	5	0,048	300	55	99,03	98,59	98,45	304,9	
	5	0,050	120	21	99,62	99,40	99,51	790,3	
	6	0,060	120	21	99,15	98,77	98,98	1466,0	
0,8	6	0,100	120	55	99,82	99,85	99,76	2485,6	
	Угольная пыль, $h_{щ} = h_c = 150$ мкм, перегородка с винтообразной оплеткой витков проволоки медной нитью толщиной 150 мкм								
	0,8	4	0,113	210	21	93,78	92,02	91,70	268,4
4		0,113	150	55	99,20	99,54	99,48	268,4	
Угольная пыль, $h_{щ} = 80$ мкм, $h_c = 150$ мкм, перегородка без оплетки									
0,8	4	0,113	200	21	69,43	67,12	–	357,4	
	4	0,113	150	55	92,16	91,32	–	357,4	
Цементная пыль, $h_{щ} = h_c = 150$ мкм, перегородка с винтообразной оплеткой витков проволоки медной нитью толщиной 150 мкм									
1,0	6	0,1	240	15	99,74	99,93	99,91	785,8	
Цементная пыль, $h_{щ} = 80$ мкм, $h_c = 150$ мкм, перегородка без оплетки витков									
1,0	6	0,1	300	15	99,62	99,70	99,61	1335,5	

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Высокоэффективная очистка запыленных газов в щелевых фильтрах возможна при использовании стационарного режима фильтрования. Такой способ фильтрования реализуется при определенном соотношении времени пребывания запыленного газа в фильтрующем слое и продолжительности межрегенерационного цикла фильтрования для заданной эффективности очистки. При этом должны строго соблюдаться оптимальные значения скорости фильтрования и продолжительности межрегенерационного цикла для принятой структуры фильтрующей перегородки.

Щелевые фильтры при оптимальных параметрах работы способны обеспечивать эффективность очистки свыше 99% при улавливании пыли с медианным размером 20 мкм и выше, плотность пыли – 1400 кг/м<sup>3</sup> и более. Щелевая фильтрующая перегородка надежнее, чем тканевая перегородка в рукавных фильтрах, для очистки горячих, абразивных и агрессивных газов. По сравнению с зернистыми фильтрами щелевые пылеуловители более технологичны,

проще и компактнее по конструкции, имеют удобную и эффективную систему регенерации. Они могут конкурировать с циклонными аппаратами, за счет более высокой эффективности очистки меньше подвержены абразивному износу.

Исследование очистки воздуха от угольной, цементной, песочной пыли и пылевидного поливинилхлорида позволило установить влияние различных факторов на эффективность процесса. Полученные зависимости явились основой при разработке программы расчета щелевых фильтров (свидетельство № 2015617631 от 20.10.2015). Она позволяет по заданной эффективности очистки и гидравлическому сопротивлению определять оптимальные параметры работы, конструктивные размеры и условия регенерации щелевых фильтров с учетом свойств пыли и газа при длительной непрерывной работе фильтра.

Разработанная методика расчета позволяет моделировать и проектировать щелевые фильтры с заданными показателями работы и обеспечивать высокую эффективность очистки и низкое гидравлическое сопротивление.

## **СПИСОК ИСТОЧНИКОВ**

1. Tien C. Principles of filtration. NY: Elsevier Publ., 2012. 360 p. <https://doi.org/10.1016/C2011-0-05332-2>.
2. Пат. № 2378494, Российская Федерация, МПК E21B43/08. Щелевой фильтр с проволочным фильтрующим элементом / Э. Ф. Соловьев, С. Е. Варламов; заявители и патентообладатели Э. Ф. Соловьев, С. Е. Варламов. Заявл. 28.04.2008; опубл. 10.01.2010. Бюл. № 1.
3. Пат. № 2445146, Российская Федерация, МПК B01D29/48. Щелевой фильтр / А. В. Яшин; заявитель и патентообладатель А. В. Яшин. Заявл. 01.10.2010; опубл. 20.03.2012. Бюл. № 8.
4. Пат. № 2456054, Российская Федерация, МПК B01D29/44, B01D29/62, E21B43/08. Регенерируемый щелевой фильтр / Ю. В. Данченко, Е. А. Закревская, А. Л. Каплан, Е. В. Пошвин, Р. Ф. Фаритов; заявитель и патентообладатель ЗАО «Новомет-Пермь». Заявл. 01.02.2011; опубл. 20.07.2012. Бюл. № 20.
5. Федоров С. В., Федорова В. Д. Принцип работы автоматического самоочищающегося фильтра со щелевыми фильтрующими элементами // Научный Лидер. 2021. N 15. С. 141–144.
6. Sutrisna P. D., Holdich R. G., Kosvintsev S. R., Cumming I. W. Rotating cylinder microfiltration of oil-in-water emulsion using novel slotted pore filter // Journal of Applied Membrane Science & Technology. 2006. Vol. 3, no. 1. P. 15–28. <https://doi.org/10.11113/amst.v3i1.36>.
7. Пат. № 104863, Российская Федерация, МПК B01D46/00. Фильтр для очистки газа от пыли / Н. М. Самохвалов; заявитель и патентообладатель Иркутский государственный технический университет. Заявл. 16.12.2010; опубл. 27.05.2011. Бюл. № 15.
8. Пат. № 156669, Российская Федерация, МПК B01D46/40. Фильтр для очистки газа от пыли / Н. М. Самохвалов, В. В. Виноградов, Ю. А. Зыкова; заявитель и патентообладатель Иркутский национальный исследовательский технический университет. Заявл. 30.03.2015; опубл. 10.11.2015. Бюл. № 31.
9. Мазус М. Г., Мальгин А. Д., Моргулис М. Л. Фильтры для улавливания промышленных пылей. М.: Машиностроение, 1985. 240 с.
10. Ужов В. Н., Вальдберг А. Ю., Мягков Б. И., Решидов И. К. Очистка промышленных газов от пыли. М.: Химия, 1981. 392 с.
11. Matteson M. J., Orr C. Filtration: principles and practices. Boca Raton, Florida: CRC Press, 1987. 756 p.
12. Самохвалов Н. М., Виноградов В. В. Стационарность процесса и эффективность очистки газов от пыли в щелевом фильтре // Теоретические основы химической технологии. 2014. Т. 48. N 6. С. 690–694.
13. Самохвалов Н. М., Виноградов В. В., Зыкова Ю. А. Гидродинамика и структура потока в щелевой фильтрующей перегородке // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2018. Т. 8. N 2. С. 93–102. <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2018-8-2-93-102>.
14. Самохвалов Н. М., Виноградов В. В., Зыкова Ю. А. Влияние регенерации и стационарности процесса на эффективность очистки и потери напора в щелевом фильтре // Химическая промышленность сегодня. 2020. N 1. С. 10–18.
15. Самохвалов Н. М., Виноградов В. В., Зы-



кова Ю. А. Эффективность очистки и гидравлическое сопротивление струйно-фильтрационного пылеуловителя // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2019. Т. 9. N 4. С. 759–767. <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2019-9-4-759-767>.

16. Виноградов В. В., Зыкова Ю. А., Самохвалов Н. М. Влияние структуры щелевого фильтра на гидравлическое сопротивление // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2015. N 4. С. 3–10.

17. Зыкова Ю. А., Самохвалов Н. М., Виноградов В. В. Эффективность регенерации щелевого фильтра // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2018. Т. 8. N 1. С. 99–105. <http://dx.doi.org/10.21285/2227-2925-2018-8-1-99-105>.

18. Виноградов В. В., Самохвалов Н. М. Расчет размеров и параметров работы щелевого фильтра // Теоретические основы химической технологии. 2016. Т. 50. N 4. С. 473–479.

19. Зыкова Ю. А., Самохвалов Н. М., Виноградов В. В. Регенерация щелевой фильтрующей перегородки // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2017. Т. 7. N 1. С. 161–167. <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2017-7-1-161-167>.

20. Виноградов В. В., Зыкова Ю. А., Самохвалов Н. М. Методика расчета щелевого фильтра // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2015. Т. 326. N 11. С. 67–74.

## REFERENCES

1. Tien C. *Principles of filtration*. NY: Elsevier Publ.; 2012. 360 p. <https://doi.org/10.1016/C2011-0-05332-2>.

2. Solov'ev E. F., Varlamov S. E. *Slotted filter with wired filtrating element*. Patent RF, no. 2378494; 2010. (In Russian).

3. Jashin A. V. *Edge filter*. Patent RF, no. 2445146; 2012. (In Russian).

4. Danchenko J. V., Zakrevskaja E. A., Kaplan A. L., Poshvin E. V., Faritov R. F. *Recoverable aperture filter*. Patent RF, no. 2456054; 2012. (In Russian).

5. Fedorov S. V., Fedorova V. D. Working principle of an automatic self-cleaning slotted filter. *Nauchnyi Lider = Scientific Leader*. 2021;(15):141-144. (In Russian).

6. Sutrisna P. D., Holdich R. G., Kosvintsev S. R., Cumming I. W. Rotating cylinder microfiltration of oil-in-water emulsion using novel slotted pore filter. *Journal of Applied Membrane Science & Technology*. 2006;3(1):15-28. <https://doi.org/10.11113/amst.v3i1.36>.

7. Samokhvalov N. M. *Filter for cleaning gas from dust*. Patent RF, no. 104863; 2011. (In Russian).

8. Samokhvalov N. M., Vinogradov V. V., Zykova Yu. A. *Filter for cleaning gas from dust*. Patent RF, no. 156669; 2015. (In Russian).

9. Mazus M. G., Mal'gin A. D., Morgulis M. L. *Industrial dust filters*. Moscow: Mashinostroenie; 1985. 240 p. (In Russian).

10. Uzhov V. N., Val'dberg A. Yu., Myagkov B. I., Reshidov I. K. *Purification of industrial gases from dust*. Moscow: Khimiya; 1981. 392 p. (In Russian).

11. Matteson M. J., Orr C. *Filtration: principles and practices*. Boca Raton, Florida: CRC Press; 1987. 756 p.

12. Samokhvalov N. M., Vinogradov V. V. Stationary and efficiency of gas cleaning from dust on slotted filter. *Teoreticheskie Osnovy Khimicheskoi Tekhnologii = Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 2014;48(6):690-694. (In Russian).

13. Samokhvalov N. M., Vinogradov V. V., Zykova Y. A. Hydrodynamics and structure of the flow in the shield filtration partition. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya = Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnolo-*

*gy*. 2018;8(2):93-102. (In Russian). <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2018-8-2-93-102>.

14. Samokhvalov N. M., Vinogradov V. V., Zykova Y. A. Influence of regeneration and stationarity of itie process on the efficiency of cleaning and pressure loss in the slotted fitter. *Khimicheskaya Promyshlennost' Segodnya = Chemical Industry Today*. 2020;(1):10-18. (In Russian).

15. Samokhvalov N. M., Vinogradov V. V., Zykova Yu. A. 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>.

16. Vinogradov V. V., Zykova Y. A., Samokhvalov N. M. Effect of the slot filter structure on the hydraulic resistance. *Izvestiya Rossijskoj Akademii Nauk. Mekhanika Zhidkosti i Gaza = Fluid Dynamics*. 2015;(4):3-10. (In Russian).

17. Zykova Y. A., Samokhvalov N. M., Vinogradov V. V. Slotted filter regeneration efficiency. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya = Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2018;8(1):99-105. (In Russian). <http://dx.doi.org/10.21285/2227-2925-2018-8-1-99-105>.

18. Vinogradov V. V., Samokhvalov N. M. Calculating the size and operating parameters of a slotted filter. *Teoreticheskie Osnovy Khimicheskoi Tekhnologii = Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 2016;50(4):473-479. (In Russian).

19. Zykova Y. A., Samokhvalov N. M., Vinogradov V. V. Regeneration slotted filter septum. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya = Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2017;7(1):161-167. (In Russian). <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2017-7-1-161-167>.

20. Vinogradov V. V., Zykova Y. A., Samokhvalov N. M. Calculation of a slotted filter. *Izvestiya Tomskogo Politehnicheskogo Universiteta. Inzhiniring Georesursov = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2015;326(11):67-74. (In Russian).

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ**

**Н. М. Самохвалов,**  
к.т.н., доцент,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,  
Российская Федерация,  
snm4186@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0001-9722-0824>

**В. В. Виноградов,**  
к.т.н., электроник,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,  
Российская Федерация,  
vvv158@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-5174-7978>

***Вклад авторов***

Все авторы сделали эквивалентный вклад  
в подготовку публикации.

***Конфликт интересов***

Авторы заявляют об отсутствии конфликта  
интересов.

*Все авторы прочитали и одобрили  
окончательный вариант рукописи.*

***Информация о статье***

*Поступила в редакцию 11.01.2022.  
Одобрена после рецензирования 28.02.2022.  
Принята к публикации 30.05.2022.*

**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Nikolay M. Samokhvalov,**  
Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074,  
Russian Federation,  
snm4186@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0001-9722-0824>

**Vladimir V. Vinogradov,**  
Cand. Sci. (Engineering), Electronics Engineer,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074,  
Russian Federation,  
vvv158@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-5174-7978>

***Contribution of the authors***

The authors contributed equally to this article.

***Conflict interests***

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

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

***Information about the article***

*The article was submitted 11.01.2022.  
Approved after reviewing 28.02.2022.  
Accepted for publication 30.05.2022.*