

С. М. ПУРИНГ
Д. Н. ВАТУЗОВ

МОДЕРНИЗАЦИЯ АППАРАТОВ ОЧИСТКИ ВОЗДУХА ОТ ТВЕРДЫХ ВЫСОКОДИСПЕРСНЫХ АЭРОЗОЛЕЙ

MODERNIZATION OF DEVICES FOR PURIFICATION
OF AIR FROM SOLID HIGH-DISPERSED AEROSOLS

Предложен аппарат очистки от твердых частиц дисперсностью от 0,1 мкм. Принцип действия аппарата основан на коагуляции частиц на перфорированных в виде щелей пластинах, с использованием орошения загрязненного воздуха водой через форсунки с дисперсным составом от 2,0 до 10 мкм. При прохождении трехфазного потока через щели первой пластины сепаратора, вследствие турбулизации потока в струйках с малым масштабом турбулентности возникает турбулентная коагуляция, что приводит к укрупнению частиц. При набегании струи на вторую пластину формируется пограничный слой, обладающий повышенной вязкостью к компонентам струи. Вязкость образуется за счет оседания и перемешивания частиц воды и пыли (в том числе укрупненной) на поверхности второй пластины, где в основном и происходит осаждение частиц. Выявлены зависимости эффективности аппарата от ширины щелей и их взаимного расположения на первой и второй пластинах, сочетание которых обеспечивает режим повышенной коагуляции и высокий КПД улавливания частиц аппаратом.

Ключевые слова: высокодисперсные аэрозоли, инерционный механизм осаждения, коагуляция, эффективность очистки, перфорированные пластины

Введение

Значительное количество производственных процессов сопровождается выделениями загрязняющих веществ, которые системами вентиляции выбрасываются в атмосферу, что способствует не только загрязнению воздушного бассейна, но и трате ценных ресурсов на производствах, использующих редкие и дорогие сырье и материалы. Поэтому целесообразно в составе систем вытяжной вентиляции предусматривать устройство аппаратов очистки, которые не только снижают антропогенное воздействие на атмосферу, но и способствуют возвращению полезных компонентов в производственный цикл [1 – 4]. Учитывая, что часть загрязняющих веществ выделяется в виде аэрозолей тонкой дисперсности, улавливание которых сопровождается определенными сложностями, актуальна

A device for cleaning solid particles with a dispersion of 0.1 μm is proposed. The principle of the apparatus is based on coagulation of particles on slots perforated in the form of slots, using irrigation of contaminated air with water through nozzles with a dispersed composition from 2.0 microns to 10 microns. When a three-phase flow passes through the slots of the first separator plate, turbulent coagulation occurs due to turbulence of the flow in streams with a small turbulence scale, which leads to particle coarsening. When the jet runs onto the second plate, a boundary layer is formed that has an increased viscosity to the components of the jet. Viscosity is formed due to the sedimentation and mixing of water particles and dust (including coarsened) on the surface of the second plate, where particles are mainly deposited. The dependences of the apparatus efficiency on the width of the slots and their mutual arrangement on the first and second plates, the combination of which provides a mode of increased coagulation and high efficiency of particle capture by the apparatus, are revealed.

Keywords: high-dispersed aerosols, inertial deposition mechanism, coagulation, cleaning efficiency, perforated plates

разработка или совершенствование аппаратов очистки воздуха. Причем простые в конструкции механические устройства, установка и обслуживание которых дешевле и надежнее, предпочтительнее сложных технических систем.

Известно, что функционирование аппаратов очистки воздуха характеризуется двумя основными параметрами: эффективностью улавливания загрязняющих веществ (ЗВ) и энерго-экономическими показателями, которые тесно связаны между собой [5].

Эффективность улавливания рассчитывается по формуле

$$\eta = 1 - \frac{C}{C'}, \quad (1)$$

где C' – концентрация ЗВ на входе в аппарат, $г/м^3$; C – концентрация ЗВ после очистки, $г/м^3$.

Энерго-экономический показатель $K_{эн}$ определяется затратами энергии (кДж) на осуществление процесса улавливания ЗВ из очищаемого воздуха (1000 м³) в аппарате [5], которые должны стремиться к минимально возможному значению. Затраты энергии $K_{эн}$ зависят от гидравлического сопротивления аппарата ($\Delta P_{ант}$, Па): $K_{эн} = f(\Delta P_{ант})$ и влияют на относительную стоимость очистки.

Таким образом, на уменьшение стоимости очистки и, следовательно, на эффективность аппарата (при одинаковой степени очистки) влияют уменьшение гидравлического сопротивления и повышение производительности аппарата. С другой стороны, при постоянной производительности (при условии конструктивных изменений) возможно увеличить степень очистки воздуха без увеличения стоимости.

Существует достаточное количество устройств для очистки воздуха от пыли, принцип работы которых основан на инерционном механизме осаждения [1]. Но значительная их часть используется для очистки от достаточно крупных аэрозолей ($d_{ч} > 10$ мкм). Эффективность работы устройств для очистки воздуха от мелкодисперсной пыли невысока, поэтому задача создания простого механического устройства, способного улавливать мелкие частицы пыли, достаточно актуальна.

Основные теоретические зависимости, используемые при конструировании

Эффективность работы любого устройства по очистке воздуха от аэрозолей определяется конкретными механизмами осаждения, обусловленными конструктивными особенностями аппарата. Улавливание частиц может происходить за счет эффектов диффузии, инерции, касания, седиментации, электрических сил, турбулентности и др. [6].

В конкретных устройствах определяющим является один или два механизма осаждения. Для устройств, осаждение частиц в которых вызывается силами инерции, математическое описание данного процесса основывается на критерии Стокса (St), характеризующем отношение инерционной силы, действующей на частицу, к силе гидравлического сопротивления среды [2,3,7].

Критерий подобия инерционного осаждения частиц, критерий Стокса, определяется по известной формуле

$$Stk = \frac{v_6 \rho_ч d_ч^2 C_k}{18 \mu_6 l}, \quad (2)$$

где v_6 – скорость потока, набегающего на препятствие, м/с; $\rho_ч$ – плотность материала частиц, кг/м³; $d_ч$ – диаметр частиц, м; C_k – поправка Кенин-

гема-Милликена; μ_6 – динамическая вязкость, Па·с; l – характерный размер препятствия, м.

Инерционное осаждение аэрозолей возможно при превышении критерия Стокса определенного «критического» значения $Stk_{кр}$, значение которого зависит от типа препятствия.

Эффективность осаждения аэрозольных частиц из струй (прямоугольных и круглых), набегающих на пластины (импакторы струй, сепараторы удара), на цилиндрических и сферических коллекторах, расположенных в аэрозольных потоках (волоконные фильтры, газоочистители), за счет инерционных механизмов определяют как функцию числа Стокса: $\eta = f(\sqrt{Stk})$ [8, 9]. Значение $\sqrt{St_{кр}}$ при осаждении частиц на пластины для круглых струй, соответствующее полному их извлечению из двухфазного потока, составляет по данным исследований [6] около 0,58; для прямоугольных струй – 0,82. Осаждение частиц не наблюдается при $\sqrt{St_{кр}}$ меньшем 0,2 для круглых струй и $\sqrt{St_{кр}}$ меньшем 0,3 для прямоугольных. Исследованиями по определению эффективности улавливания аэрозолей при скорости воздуха в отверстиях (щелях) 10–180 м/с установлено также, что изменение расстояния от отверстия в первой пластине до поверхности второй пластины, в пределах от 1 до 3 эквивалентных диаметров отверстий, не влияет на полученные результаты.

Минимальные диаметры частиц $d_{мин}$, которые будут удалены из потока, определяются с использованием рассчитываемых критериев $St_{кр}$:

$$d_{мин} = \sqrt{\frac{18 \mu_6 Stk_{кр} l}{v_6 \rho_ч}}, \quad (3)$$

Для всех рассматриваемых случаев инерционного осаждения частиц эффективность улавливания пропорциональна диаметру частиц $d_ч$. То есть необходимо создание условий, способствующих увеличению диаметра частицы, например повышению турбулентности воздушного потока, способствующей коагуляции частиц.

Скорость турбулентной коагуляции – величина, способствующая числу встреч частиц в единице объема в единицу времени, 1/м³·с – происходящей за счет так называемого «механизма ускорения», определяется по формуле [10]:

$$N_{уск} = \pi \frac{\rho_ч}{\rho_6} n_0^2 \frac{\varepsilon_T^{3/4}}{v_6^{5/4}} \beta d_{чcp}^4, \quad (4)$$

где n_0 – начальная концентрация частиц, 1/м³; $\varepsilon_T \approx v_6^3 / l_t$ – величина, характеризующая турбулентный поток, м²/с³; l_t – линейный параметр (для трубы l равен ее диаметру), м; v_6 – кинематическая вязкость воздуха, м²/с; β – коэффициент, характеризующий распределение частиц по размерам; $d_{чcp}$ – средний размер частиц, м.

Принцип работы устройства

На основании вышеизложенных зависимостей предложен аппарат очистки воздуха от тонкодисперсных аэрозолей (рис. 1) [11].

Загрязненный воздух, поступающий в устройство через входной патрубок, орошается водой. Далее трехфазный поток, состоящий из воздуха, частиц пыли и воды проходит через сепаратор мелкодисперсных частиц, состоящий из двух параллельных пластин со щелевыми отверстиями, оси которых смещены (рис. 2). При прохождении трехфазного потока через щели первой пластины сепаратора, вследствие турбулизации потока в струйках с малым масштабом турбулентности, возникает турбулентная коагуляция (взаимная) частиц пыли и разбрызганной форсункой (форсунками) воды, что приводит к укрупнению частиц. Поток воздуха, срываясь с острых кромок щелевых отверстий первой пластины, с большой скоростью набегает на межщелевые площадки второй пластины.

При набегании струи на вторую пластину формируется пограничный слой, обладающий повышенной вязкостью к компонентам струи. Вязкость образуется за счет оседания и перемешивания частиц воды и пыли (в том числе укрупненной) на поверхности второй пластины.

Первая пластина способствует формированию отдельных плоскопараллельных струек с малым масштабом турбулентности, что способствует взаимной коагуляции частичек пыли и разбрызгиваемой форсунками водой, а также обеспечивает набегание со скоростью скоагулированных аэрозолей на вторую пластину.

Коагуляция аэрозолей осуществляется в основном на второй пластине вследствие удара отдельных струек о площадку между щелевыми отверстиями второй пластины. Выбранная ширина щелевых отверстий второй пластины исключает вторичное образование аэрозолей и каплеунос.

Образовавшийся шлам стекает в поддон и удаляется через сливное отверстие, а очищенный воздух проходит через жалюзийный каплеуловитель в выходной патрубок.

Потери давления в очистном аппарате $\Delta P_{ан}$, Па, определяются по формуле

$$\Delta P_{ан} = \xi_1 \cdot \frac{\rho \cdot V_1^2}{2} + \xi_2 \cdot \frac{\rho \cdot V_2^2}{2}, \quad (5)$$

где ξ_1, ξ_2 – коэффициент местного сопротивления первой и второй пластин 2 и 1,5 соответственно; V_1, V_2 – скорость воздушного потока в щелях первой и второй пластин 40 и 20 м/с соответственно; ρ – плотность воздуха, 1,2 кг/м³.

Результаты и обсуждения

При осаждении частиц пыли в аппаратах очистки в прямоугольных каналах и щелях опе-

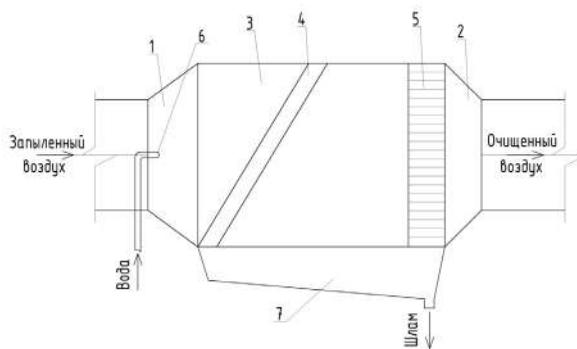


Рис. 1. Устройство для очистки воздуха от мелкодисперсных твердых частиц:

1 – входной патрубок; 2 – выходной патрубок; 3 – корпус; 4 – сепаратор; 5 – жалюзийный каплеуловитель; 6 – форсунка; 7 – поддон для шлама

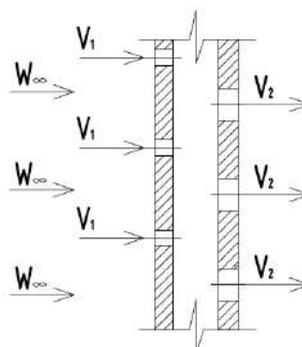


Рис. 2. Схема движения потока запыленного воздуха: W_{∞} – скорость движения потока запыленного воздуха в корпусе устройства перед первой пластиной; V_1 – скорость движения потока запыленного воздуха в перфорации первой пластины; V_2 – скорость движения потока очищенного воздуха в перфорации второй пластины

рируют таким понятием, как эквивалентный гидравлический диаметр $d_э$ (радиус) канала. На рис. 3 приведены результаты экспериментальных исследований по очистке воздуха в отверстиях в пластине [12]. Как видно из результатов опытов, максимальная степень очистки достигается при отношении $d_э/d_э1$, равном 2–2,5. При ширине щели b_1 в первой пластине, равной 4 мм, ширина щелей во второй пластине b_2 составляет $(2,0–2,5) \cdot b_1$, т. е. 8–10 мм. Кроме того, при такой ширине щели снижается до минимума каплеунос уловленного продукта.

Согласно (5), при

$$\Delta P_{ан} = 2 \frac{1,2 \cdot 40^2}{2} + 1,5 \frac{1,2 \cdot 20^2}{2} = 2280 \text{ Па}$$

по рис. 3 при отношении $d_э/d_э1$, равном 2–2,5 (8–10 мм), степень очистки максимальна при данных условиях и составит $\eta = 93–90 \%$.

Расстояние между центрами щелевых отверстий l_1 первой пластины равно $(6–8) \cdot b_1$, т. е.

24–32 мм, что оптимально для обеспечения плоскопараллельного движения потока и набегания его на вторую пластину под углом 90° . Именно такое расстояние обеспечивает максимальное выпадение на поверхности второй пластины скоагулированного агломерата.

На рис. 4 приведены результаты экспериментальных исследований зависимости эффективности очистки от соотношения расстояния

между пластинами к эквивалентному диаметру первой пластины l/d_1 при различных аэродинамических сопротивлениях [12]. Как видно из графика, при соотношении $l/d_1 = 1,5-2$ наблюдается наибольший эффект очистки.

Например, при $\Delta P_{\text{ат}} = 2280$ Па, согласно графику, при отношении l/d_1 , равном 1,5–2,0 (6–8 мм), степень очистки максимальна при данных условиях и составит $\eta = 94-93\%$.

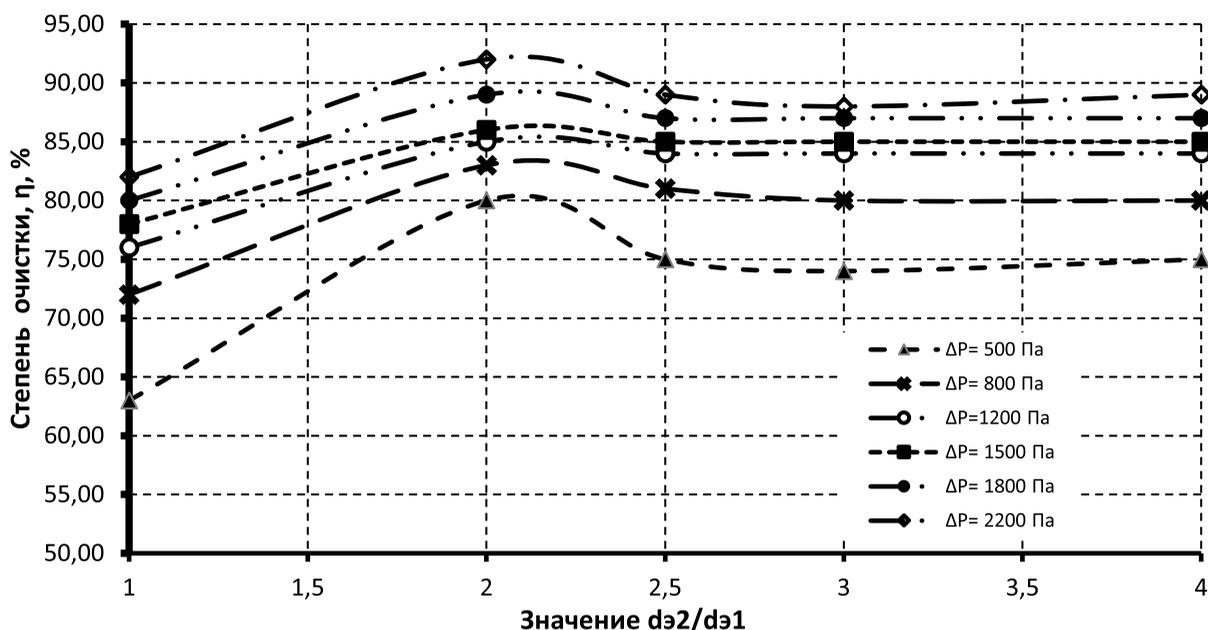


Рис. 3. Зависимость степени очистки от соотношения гидравлических диаметров отверстий в пластинах и гидравлического сопротивления

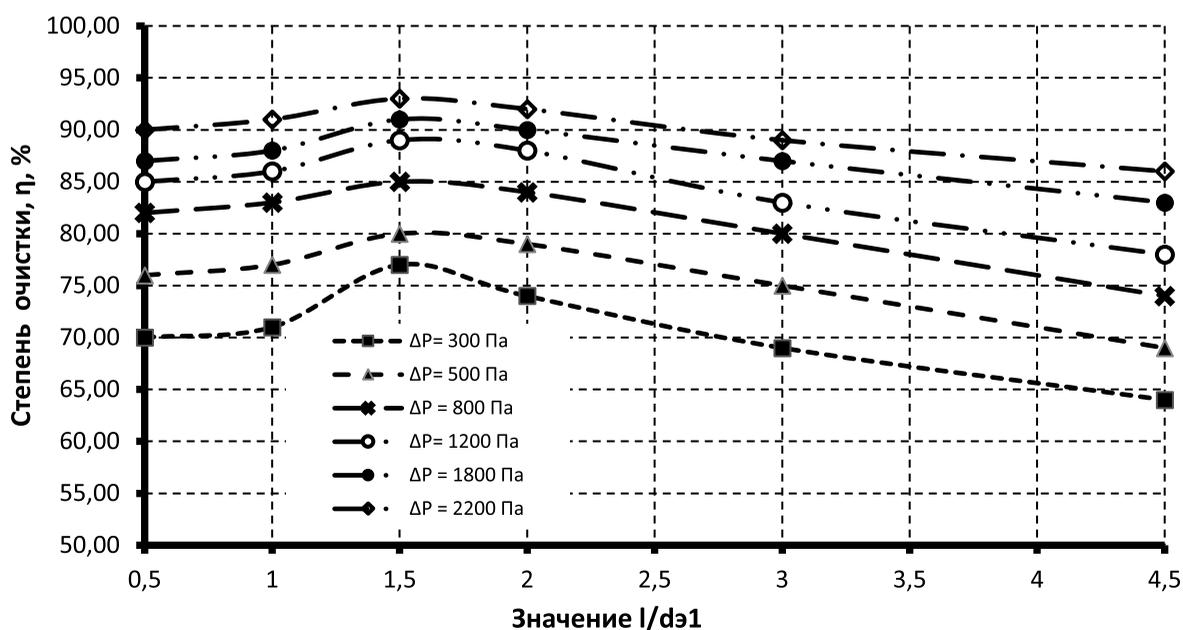


Рис. 4. Зависимость степени очистки от соотношения расстояния между пластинами к эквивалентному диаметру отверстий первой пластины и гидравлического сопротивления

Расположение пластин под углом $30 - 60^\circ$ позволяет при постоянной скорости воздушного потока (V) и заданной ширине корпуса устройства (A) увеличить расход очищаемого воздуха ($L=V \cdot A \cdot B$) за счет увеличения площади поверхности контакта сепаратора с загрязненным воздухом: $B = H / \sin \alpha = H \cdot (2 \div 2 / \sqrt{3})$, где B – длина пластины, H – высота корпуса устройства. Поэтому возрастает эффективность работы устройства (за счет повышения его производительности при неизменных габаритах) или уменьшаются габариты (за счет уменьшения высоты при неизменном расходе).

Таким образом, разработанное устройство позволяет удалить из потока запыленного воздуха частицы мелкодисперсной пыли с дисперсным составом более $0,1$ мкм.

Высокая надежность работы устройства и эффективность очистки воздуха им достигается за счет перфорации пластин сепаратора в виде продольных вертикальных щелей и орошения загрязненного воздуха водой через форсунки с дисперсным составом частичек воды от $2,0$ до 10 мкм. Живое сечение щелей первой пластины обеспечивает плоскопараллельное струйное движение потока и набегание его на вторую пластину под углом 90° .

Экспериментальные исследования показали, что режим повышенной коагуляции и устойчивого осаждения частиц наблюдается при ширине щелей первой пластины $b_1 = 4$ мм, расстоянии между центрами щелевых отверстий, равном $(6-8) \cdot b_1$, ширине щелей второй пластины $(2,0-2,5) \cdot b_1$, расстоянии между пластинами, равном $(1,5-2,0) \cdot b_1$, и смещении осей щелевых отверстий первой и второй пластин друг относительно друга.

Перфорация пластин сепаратора, выполненная в виде продольных вертикальных щелей, и их установка под углом $30-60^\circ$ снижает аэродинамическое сопротивление, а следовательно, снижает энергозатраты устройства в процессе его работы.

Благодаря стеканию скоагулированных частиц, смоченных водой, под действием силы тяжести в поддон для шлама, происходит самоочищение пластин сепаратора, которые не засоряются и не требуют частой остановки работы устройства для их очистки.

Вывод. Разработанное устройство может быть использовано в химической, текстильной, пищевой, легкой и других отраслях промышленности для очистки вентиляционных и технологических выбросов от пылевых частиц с дисперсностью от $0,1$ мкм, которые образуются в технологических процессах. Работа устройства основана на укрупнении и последу-

ющем улавливании твердых высокодисперсных частиц, с использованием простой и надежной конструкции, с невысоким аэродинамическим сопротивлением и уменьшенными энергозатратами. Уловленные вещества могут быть утилизированы или возвращены в производство.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Ветошкин А.Г., Таранцева К.Р.* Технология защиты окружающей среды (теоретические основы). М.: НИЦ «Инфра-М», 2015. 362 с.
2. Очистка промышленных газов от пыли / [Ужов В.Н. и др.]. М.: Химия, 1981. 392 с.
3. *Тюрин Н.П.* Высокоэффективные устройства очистки вентиляционных выбросов от мелкодисперсных частиц / СГАСУ. Самара, 2015. 124 с.
4. *Puring S.M., Vatuzov D.N., Tyurin N.P.* Parameter choice optimization of ventilating air cleaning equipment while designing and constructing industrial buildings // *Procedia Engineering* 2016. V. 153. P. 563-568.
5. Экологические требования к установкам очистки газов: Письмо Минприроды России от 21.06.1996 № 11-01/02-474.
6. *Lu H., Wang Y.* Particle deposition in ventilation ducts: A review. *Build. Simul.*, 2019. V.12. P. 723-734. <https://doi.org/10.1007/s12273-019-0522-8>.
7. *Boutsikakis A., Fede P., Pedrono A.* et al. Numerical Simulations of Short- and Long-Range Interaction Forces in Turbulent Particle-Laden Gas Flows. *Flow Turbulence Combust* 2020. <https://doi.org/10.1007/s10494-020-00115-3>.
8. *Ranz W.E., Wong J.B.* Impaction of dust and smoke particles on surface and body collectors, *Ind. Eng. Chem.* 1952. V. 44. P.1371-1381.
9. *Будыка А.К., Припачкин Д.А., Цовьянов А.Г.* Моделирование и экспериментальное исследование осаждения аэрозольных частиц в персональном импакторе // *АНРИ.* 2009. № 3. С. 27-37.
10. *Левич В.Г.* Физико-химическая гидродинамика. М., 1959. 700 с.
11. Устройство для очистки воздуха от мелкодисперсных твердых частиц Пат. 2710425 РФ, МПК В01D 45/00 / Ватузов Д.Н., Пурин С.М., Тюрин Н.П., Тюрин Д.Н.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО Самарский государственный технический университет. № 2019107824, заявл. 19.03.2019, опублик. 26.12.19, Бюл. № 36. 10 с.
12. *Тюрин Н.П.* Очистка вентиляционного воздуха от аэрозолей пластификаторов: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.03 / Ленинградский ордена Октябрьской революции и ордена трудового красного знамени инженерно-строительный институт. Л., 1982. 159 с.

REFERENCES

1. *Vetoshkin A. G., Tarantseva K. R.* *Tekhnologiya zashchity okruzhayushchej sredy (teoreticheskie osnovy)* [Technology of environmental protection (theoretical foundations)]. Moscow, SIC «Infra-M», 2015. 362 p.

2. Uzhov V. N. *Ochistka promyshlennykh gazov ot pyli* [Cleaning of industrial gases from dust]. Moscow, Chemistry, 1981. 392 p.
3. Tyurin N. P. *Vysokoeffektivnye ustrojstva ochistki ventilyacionnykh vybrosov ot melkodispersnykh chastic* [High-Efficiency devices for cleaning ventilation emissions from fine particles]. Samara, SGASU, 2015. 124 p.
4. Puring S. M., Vatzov D. N., Tyurin N. P. Parameter choice optimization of ventilating air cleaning equipment while designing and constructing industrial buildings. *Procedia Engineering*, 2016, no. 153, pp. 563-568.
5. *Ekologicheskie trebovaniya k ustanovkam ochistki gazov* [Environmental requirements for gas treatment plants]. Letter no. 11-01/02-474 of the Ministry of natural resources of the Russian Federation dated 21.06.1996.
6. Lu H., Wang Y. Particle deposition in ventilation ducts: A review. *Build. Simul.*, 2019, no. 12, pp. 723-734. DOI:10.1007/s12273-019-0522-8.
7. Boutsikakis A., Fede P., Pedrono A. et al. Numerical Simulations of Short - and Long-Range Interaction Forces in Turbulent Particle-Laden Gas Flows. *Flow Turbulence Combustion*, 2020. DOI: 10.1007/s10494-020-00115-3.
8. Ranz W. E., Wong J. B., Impaction of dust and smoke particles on surface and body collectors, *Ind. Eng. Chem*, 1952, no. 44, pp. 1371-1381.
9. Budyka A. K., Pripachkin D. A., Zavialov A. G. *Modelirovanie i eksperimental'noe issledovanie osazhdeniya aerazol'nykh chastic v personal'nom impaktore* [Modeling and experimental investigation of deposition of aerosol particles in the personal impactor]. ANRI, 2009, no. 3, pp. 27-37.
10. Levich V. G. *Fiziko-himicheskaya gidrodinamika* [Physical and chemical hydrodynamics]. Moscow, 1959. 700 p.
11. Vatzov D. N., Puring S. M., Tyurin N. P., Tyurin D. N. *Ustrojstvo dlya ochistki vozduha ot melkodispersnykh tverdykh chastic* [Device for cleaning of air from finely dispersed solid particles]. Patent RF, no. 2019107824, 2019.
12. Tyurin N. P. *Ochistka ventilyacionnogo vozduha ot aerazolej plastifikatorov: dis ... kand. tekhn. nauk* [Cleaning of ventilation air from plasticizer aerosols: dis... Cand. Techn. science]. Leningrad, 1982. 159 p.

Об авторах:

ПУРИНГ Светлана Михайловна

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры теплогазоснабжения и вентиляции Самарский государственный технический университет Академия строительства и архитектуры 443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244 E-mail: Puring@mail.ru

ВАТУЗОВ Денис Николаевич

кандидат технических наук, доцент кафедры теплогазоснабжения и вентиляции Самарский государственный технический университет Академия строительства и архитектуры 443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244 E-mail: Vatzov74@mail.ru.

PURING Svetlana M.

PhD in Engineering Science, Associate Professor of the Heat and Gas Supply and Ventilation Chair Samara State Technical University Academy of Architecture and Civil Engineering 443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 244 E-mail: Puring@mail.ru.

VATUZOV Denis N.

PhD in Engineering Science, Associate Professor of the Heat and Gas Supply and Ventilation Chair Samara State Technical University Academy of Architecture and Civil Engineering 443100, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 244 E-mail: Vatzov74@mail.ru.

Для цитирования: Пуринг С.М., Ватузов Д.Н. Модернизация аппаратов очистки воздуха от твердых высокодисперсных аэрозолей // Градостроительство и архитектура. 2020. Т. 10, № 2. С. 16–21. DOI: 10.17673/Vestnik.2020.02.3.

For citation: Puring S.M., Vatzov D.N. Modernization of Devices for Purification of Air from Solid High-Dispersed Aerosols. *Gradostroitel'stvo i arhitektura* [Urban Construction and Architecture], 2020, Vol. 10, no. 2, Pp. 16–21. (in Russian) DOI: 10.17673/Vestnik.2020.02.3.