

Д.Н. ВАТУЗОВ

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ СОЗДАНИЯ АППАРАТОВ ОЧИСТКИ ВОЗДУХА В ТРУБКАХ И ЩЕЛЕВЫХ КАНАЛАХ ОТ ВЫСОКОДИСПЕРСНОГО КАПЕЛЬНОГО АЭРОЗОЛЯ

THEORETICAL BACKGROUND OF DEVICES FOR AIR-CLEANING IN PIPES AND CONDUITS FROM FINELY DISPERSED DROPPING AEROSOL

Рассмотрены теоретические предпосылки для разработки аппаратов очистки вентиляционных выбросов от тонкодисперсного капельного аэрозоля, способствующих осаждению аэрозоля на стенках трубок и каналов при турбулентном движении аэрозоля. В результате исследований был выделен процесс формирования осаждения частиц после входа в осадительный элемент, где происходит формирование гидродинамического пограничного слоя. Выявлена теоретическая зависимость интенсивности осаждения частиц от особенностей турбулентного движения газа. Отражена особенность движения и осаждения капельного аэрозоля в турбулентном потоке в трубках и каналах, при наличии твердых границ (стенок), приводящих к сдвигу осредненной и пульсационных составляющих скорости течения. Сформулированы закономерности, при которых существенно возрастает осаждение тонкодисперсного капельного аэрозоля на стенках трубок и щелевых каналах осадительного элемента в зависимости от масштаба турбулентности. Выведен экспоненциальный закон падения концентрации частиц капельного аэрозоля по ходу движения потока.

**Ключевые слова:** уравнение неразрывности движения, уравнение несжимаемой жидкости, жидкие высокодисперсные аэрозоли, турбулентное движение газа, динамическая скорость

В существующей отечественной и зарубежной литературе вопросу очистки воздуха от высокодисперсных жидких аэрозолей уделено недостаточно внимания [1–5]. Сложности в очистке связаны с дисперсностью аэрозоля конденсационного происхождения, значительная доля которых по весу лежит в субмикронной области. Поэтому, чтобы обеспечить улавливание в газоочистных аппаратах, необходимо предварительно добиться их укрупнения.

Теория движения жидкости (газов) основывается на двух базисных уравнениях гидродинамики: уравнении неразрывности движения и динамическом уравнении несжимаемой жидкости (уравнении Навье-Стокса).

Уравнение неразрывности (сплошности) потока имеет следующий вид:

The article views theoretical background of devices for cleaning of vent losses from finely dispersed dropping aerosol that promote aerosol deposition at pipes and channels wall sides during aerosol turbulence. As a result of research is defined the process of particle settling formation after entering in settling element where hydrodynamic boundary layer is formed. Theoretical dependence of particles settling intensity on gas turbulence features is revealed. Special aspects of aerosol movement and settling in pipes and channels in turbulence flow with hard walls providing changes of remote and fluctuating velocity of the flow are described. The author presents the factors that increase finely dispersed aerosol settling at pipes and conduits wall sides depending on turbulence scale. Exponential law of decreasing of aerosol particles concentration along the flow is formulated.

**Keywords:** storage equation, incompressible liquid equation, liquid finely dispersed aerosols, gas turbulence, dynamic velocity

$$\frac{d\rho}{dt} + \frac{d(\rho_x v_x)}{dx} + \frac{d(\rho_y v_y)}{dy} + \frac{d(\rho_z v_z)}{dz} = 0, \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность среды (газа), кг/м<sup>3</sup>;  $t$  – время;  $v$  – скорость среды (газов), м/с;  $x, y, z$  – направление осей координат.

Второе основное уравнение определяет силы, действующие в жидкости (газе), и может быть представлено в виде:

$$-\frac{dp_x}{dx} + \mu \left( \frac{d^2 v_x}{dx^2} + \frac{d^2 v_x}{dy^2} + \frac{d^2 v_x}{dz^2} \right) = \rho \left( \frac{dv_x}{dt} + \frac{v_x dv_x}{dx} + \frac{v_y dv_x}{dy} + \frac{v_z dv_x}{dz} \right),$$

$$\begin{aligned}
 & -\frac{dp_y}{dy} + \mu \left( \frac{d^2 v_y}{dx^2} + \frac{d^2 v_y}{dy^2} + \frac{d^2 v_y}{dz^2} \right) = \\
 & = \rho \left( \frac{dv_y}{dt} + v_x \frac{dv_y}{dx} + v_y \frac{dv_y}{dy} + v_z \frac{dv_y}{dz} \right), \\
 & -\rho g - \frac{dp_z}{dz} + \mu \left( \frac{d^2 v_z}{dx^2} + \frac{d^2 v_z}{dy^2} + \frac{d^2 v_z}{dz^2} \right) = \\
 & = \rho \left( \frac{dv_z}{dt} + v_x \frac{dv_z}{dx} + v_y \frac{dv_z}{dy} + v_z \frac{dv_z}{dz} \right),
 \end{aligned} \quad (2)$$

где  $p$  – давление в рассматриваемой точке потока, Н/м<sup>2</sup>;  $\mu$  – динамическая вязкость среды, кг/(м·с).

Дифференциальные уравнения характеризуют внутренний механизм процесса и способствуют установлению взаимосвязи между физическими условиями процесса и изменениями этих условий во времени.

Аэрозольные частицы при своем перемещении на том или ином этапе достигают пристеночной области и, когда расстояние до стенки становится равным их радиусу  $R$ , касаются ее и осаждаются на ней, если поверхность стенки удерживает частицы, т.е. если она является поглощающей.

Основой теоретических предпосылок для разработки высокоэффективных аппаратов очистки вентиляционных выбросов от высокодисперсных капельных аэрозолей стала особенность турбулентного движения газа [6–11].

Турбулентность – это форма движения газов и жидкостей, характеризующаяся потерей гидродинамической устойчивости движения потока.

Основными параметрами, характеризующими турбулентное течение, являются: число Рейнольдса, динамическая скорость, степень турбулентности (интенсивности), масштаб турбулентности, частота турбулентных пульсаций, их распределение и характерные значения.

Течение становится турбулентным с момента превышения безразмерного параметра – числа Рейнольдса:

$$Re_L = \frac{u_m L}{\vartheta}, \quad (3)$$

где  $u_m$  – средняя скорость течения газа или жидкости, м/с;  $\vartheta$  – кинематическая вязкость воздуха, м<sup>2</sup>/с (при 20 °С  $\nu = 15 \cdot 10^{-6}$ , м<sup>2</sup>/с);  $L$  – характерный размер потока, м.

Турбулентный режим характеризуется, в отличие от ламинарного, перемешиванием объемов газа между собой, хаотическими пульсациями скорости в различных направлениях, интенсивной диффузией газа и резким падением скорости у стенок. И поэтому распределение концентрации частиц по поперечному сечению турбулентного потока значительно отличается от распределения частиц в ламинарном потоке, а интенсивность осаждения частиц из турбулентного потока резко возрастает [4].

Особенностью движения турбулентного потока в трубках и каналах является наличие твердых границ – стенок, которые приводят к сдвигу осредненной и пульсационных составляющих скорости течения (рис. 1).

В случае турбулентного режима аналитическое решение данной гидродинамической задачи невозможно, поэтому она решается полуэмпирическими методами с использованием опытных данных.

В качестве масштаба потока в трубе принимается внутренний диаметр  $D$ , а в каналах – эквивалентный диаметр  $D_э$ , равный  $4R_э$  ( $R_э$  – гидравлический радиус):

$$R_э = \frac{F}{P}; \quad (4)$$

$$D_э = \frac{4F}{P}, \quad (5)$$

где  $F$  и  $P$  – соответственно площадь поперечного сечения и периметр.

Нижнее критическое значение числа  $Re_D$ , при котором ламинарное движение возможно, для прямых гладких труб составляет около 2000, для щелевых каналов – 1200.

Устойчивое турбулентное течение наблюдается для труб – при  $Re_D > 10000 - 12000$ , для каналов –  $Re_D \geq 4800$ .

Устоявшийся с неизменным профилем скорости турбулентный поток, т.е. стабилизированный, устанавливается в трубах и каналах не сразу, а лишь на до-

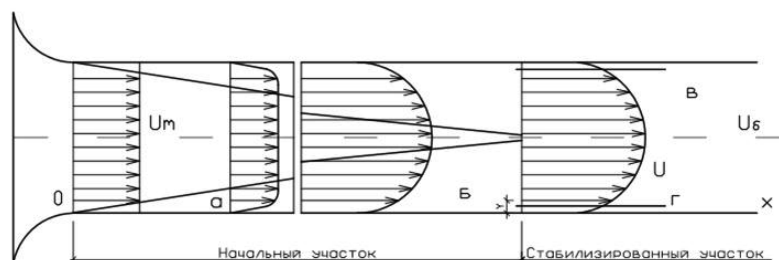


Рис. 1. Схема формирования стабилизированного турбулентного потока в трубе и канале: а – ламинарный пограничный слой; б – переходная область течения; в – стабилизированный турбулентный поток; г – вязкий подслой

вольно значительном расстоянии от входа (см. рис. 1). Турбулентный поток вступает в трубу или канал с достаточно равномерным распределением скорости по поперечному сечению, но, соприкасаясь со стенкой, притормаживается силами вязкостного трения, а на самой стенке даже прилипает, т. е. имеет нулевую скорость. По мере продвижения вдоль осадительного элемента заторможенный слой вентиляционных выбросов (аэрозоля) все более утолщается, образуя ламинарный пограничный слой с толщиной  $\delta_l$ .

Основной движущей силой процесса осаждения высокодисперсных жидких аэрозольных частиц являются турбулентная диффузия и турбулентная миграция частиц.

Причем первая – не может обеспечить наблюдаемых в экспериментах высоких значений скорости осаждения частиц  $V_t$  (м/с), поэтому ей уделяется лишь роль подвода частиц к пристеночной области на участке стабилизированного участка трубы [4].

В противоположность турбулентной диффузии турбулентная миграция обладает высокой интенсивностью именно в пристеночной области, где она имеет конечное значение, а не равное нулю, как коэффициент турбулентной диффузии.

Теоретические расчеты численным методом показали, что величина  $V_t$  сильнее всего зависит от скорости газа  $u_m$ , диаметра частиц  $d_p$  и вязкости газа  $\mu$ .

Эмпирические формулы для скорости турбулентного осаждения частиц достаточно многообразны и могут быть представлены в общем виде:

$$V_t = a + bu_m^n, \quad (6)$$

$$V_{t+} = A \left( \frac{\tau_+}{1 + \omega_E \tau} \right)^2, \quad (7)$$

где  $a, b, A$  – коэффициенты, определяемые опытным путем;  $\omega_E$  – частота энергоемких пульсаций газа,  $c^{-1}$ ;  $\tau_+ = \tau u_m^2 / \nu$  – безразмерное время релаксации.

Основным показателем интенсивности осаждения частиц является массовая доля частиц, выпадающих на стенку из потока в единицу времени на единицу поверхности. На участке  $dx$  (м) трубы за 1 секунду будет осаждаться по периметру  $P$  (м) следующее количество частиц:

$$Pj_w dx = PV_t c_x dx, \quad (8)$$

где  $j_w$  – удельный поток частиц к стенке, г/(м<sup>2</sup>·с);  $V_t$  – скорость осаждения частиц, м/с;  $c_x$  – средняя концентрация частиц в данном сечении F(м<sup>2</sup>) трубы, г/м<sup>3</sup>.

В связи с выпадением из потока, движущегося со средней скоростью  $u_m$  (м/с) частиц, его средняя концентрация в секундном объеме  $Fu_m$  уменьшится в конце участка  $dx$  на величину  $dc_x$ , а общее количество частиц – на величину  $Fu_m dc_x$ . На основании (8):

$$Fu_m dc_x = -PV_t c_x dx, \quad (9)$$

$$-\frac{dc_x}{c_x} = \frac{PV_t}{Fu_m} dx. \quad (10)$$

Преобразование уравнения (10) в пределах от  $x=0$  до  $x=l$  при условии, что при  $x=0, c_x=c_n$  ( $c_n$  – начальная концентрация частиц при входе в трубу), приводит к следующему уравнению:

$$\ln \frac{c_x}{c_n} = -\frac{P}{Fu_m} \int_0^l V_t dx. \quad (11)$$

На стабилизированном участке труб и каналов скорость оседания частиц  $V_t$  не зависит от продольной координаты, в силу чего уравнение (11) сводится к экспоненциальной зависимости

$$\frac{c_x}{c_n} = e^{-\frac{PV_t l}{Fu_m}}. \quad (12)$$

Для круглых труб  $F = \pi D^2/4$ , а их отношение  $P/F=4/D$ .

$$\frac{c_x}{c_n} = e^{-\frac{4lV_t}{Du_m}}. \quad (13)$$

Для плоскощелевых каналов  $P=2H$  и  $F=Hh$  ( $H$  – ширина плоскостей,  $h$  – расстояние между ними), соответственно  $P/F= 2/h$  и для них

$$\frac{c_x}{c_n} = e^{-\frac{2lV_t}{hu_m}}. \quad (14)$$

Поскольку  $P/h, h/2$  и  $D/4$  являются гидравлическим радиусом  $R_3$  ( $R_3 = F/P$ ), уравнение принимает вид:

$$\frac{c_x}{c_n} = e^{-\frac{lV_t}{R_3 u_m}} \quad \text{или} \quad \frac{c_x}{c_n} = e^{-\frac{4lV_t}{D_3 u_m}}. \quad (15)$$

В этой зависимости слева величина проскока частиц –  $P$ . Эффективность осаждения  $\eta$  в данном случае будет равна:

$$\eta = 1 - \frac{c_x}{c_n} = 1 - e^{-\frac{lV_t}{R_3 u_m}}. \quad (16)$$

Так как отношение  $l/u_m$  есть время пребывания частицы в трубе –  $t_{np}$ , то очевидно

$$\frac{c_x}{c_n} = e^{-\frac{V_t t_{np}}{R_3}}. \quad (17)$$

Увеличение  $u_m$  уменьшает  $t_{np}$ , но происходит усиление эффекта осаждения частиц, так как  $V_t$  растет пропорционально  $u_m$ , что компенсирует снижение  $t_{np}$ .

Из приведенных уравнений следует, что полное осаждение частиц возможно достигнуть только при бесконечно большом времени пребывания частиц в канале. Пределом этому при создании очистных аппаратов является экономическая целесообразность.

Экспоненциальный закон падения концентрации частиц по ходу потока хорошо согласуется со многими опытными данными [4, 12–15].

Таким образом, в работе проанализированы основные положения гидродинамики и турбулентности с позиций влияния на осаждение аэрозольных частиц в трубах и каналах, определены основные факторы, влияющие на частицу в турбулентном потоке, их зависимость от размера частиц и режима движения. В связи с этим можно сделать **вывод**, что осаждение частиц аэрозоля в трубках и щелевых каналах, зависящее от турбулентной диффузии и турбулентной миграции частиц, сформировано геометрическими размерами осадительного элемента и режимом движения турбулентного потока [16,17].

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аэрозоли [Электронный ресурс] // ВикиПро: отраслевая База Знаний. М., [2011]. URL: <http://www.vikipro.ru> (дата обращения: 21.12.2012).
2. Ужов В.Н., Мягков Б.И. Очистка промышленных газов фильтрами. М.: Химия, 1970. С.107–122.
3. Внутренние санитарно-технические устройства: в 3 ч. Ч. 3. Вентиляция и кондиционирование воздуха: справочник проектировщика / В.Н. Богословский [и др.]; под ред. И.Г. Старовойтова, Ю.И. Шиллера. 4-е изд., перераб. и доп. М: Стройиздат, 1992. 378 с.
4. Медников Е.П. Миграционная теория турбулентно-инерционного осаждения аэрозолей в трубах и каналах: сравнение с экспериментом // Коллоидный журн. 1975. Т.37, вып. 2. С.292–299.
5. Пат. 1212516 СССР, МПК 4 В 01 D 47/10. Устройство для очистки воздуха от тумана пластификаторов / Бакунов Г.А., Тюрин Н.П., Щибраев Е.В. № 3734360/23-26; заявл. 21.04.84; опубл. 23.02.86, Бюл. №7.
6. Пат. 2178332 Российская Федерация, МПК В 01 D 45/00. Устройство для очистки газа от частиц жидкого аэрозоля / Щибраев А.Е., Полонский В.М., Хурин И.А. / заявитель и патентообладатель Самарская государственная архитектурно-строительная академия (СамГАСА). № 2000129478/12; заявл. 24.11.00; опубл. 20.01.02, Бюл. №2.
7. Пат. 2126288 Российская Федерация, МПК В 01 D 45/04. Сепаратор частиц маслянистых жидкостей субмикронных размеров / Бакунов Г.А., Тюрин Н.П., Щибраев А.Е. / заявитель и патентообладатель Самарская государственная архитектурно-строительная академия (СамГАСА). № 95112997/25; заявл. 26.07.95; опубл. 20.02.99, Бюл. №5.

8. Пат. 2188060 Российская Федерация, МПК В 01 D 45/00. Устройство для очистки газа от частиц жидкого аэрозоля / Тюрин Н.П., Щибраев Е.В., Щибраев А.Е.; заявитель и патентообладатель Самарская государственная архитектурно-строительная академия (СамГАСА). № 2000125399/12; заявл. 09.10.00; опубл. 27.08.02, Бюл. №24.

9. Пат. 2327508 Российская Федерация, МПК В 01 D 45/04. Коаксиальный сепаратор капельного аэрозоля / Тюрин Н.П., Ватузов Д.Н., Щибраев А.Е., Тюрин Д.Н., Тарасова Е.В.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Самарский государственный архитектурно-строительный университет» (СГАСУ). № 2007100310/15; заявл. 09.01.07; опубл. 27.06.08, Бюл. №18.

10. Пуринг С.М., Ватузов Д.Н. Способы повышения эффективности вихревых пылеуловителей // Современная наука: актуальные проблемы науки и практики. Серия: естественные и технические науки. М., 2013. № 1-2. С.10–12.

11. Пуринг С.М., Ватузов Д.Н., Хурин И.А. Совершенствование устройств очистки вентиляционных выбросов загрязняющих веществ при производстве изделий из пластмасс // Экология и промышленность России. М., 2013. № 8. С.22–26.

12. Пуринг С.М., Ватузов Д.Н. Очистка воздуха от капельных аэрозолей: сб. докладов V Международной научно-технической конференции МГСУ 20-22 ноября 2013 г. М., 2013. С. 212–217.

13. Пуринг С.М., Ватузов Д.Н. Экспериментальные исследования – основа проектирования установок по очистке воздуха от тонкодисперсных частиц // Международный научно-исследовательский журнал = Research Journal of International Studies. 2014. № 1 (20). Ч. 1. С. 40–43.

14. Пуринг С.М., Ватузов Д.Н. Очистка воздуха от мелкодисперсных капельных аэрозолей // Сантехника, отопление, кондиционирование. 2014. № 1 (145). С. 109–111.

15. Пуринг С.М., Ватузов Д.Н. К вопросу о конструировании аппаратов для очистки воздуха // Научное обозрение. 2014. № 4. С. 94–97.

16. Пуринг С.М., Ватузов Д.Н. Экспериментальные исследования по определению конструктивных особенностей аппаратов по очистке воздуха от субмикронных частиц // Научное обозрение. 2014. № 4. С. 90–93.

17. Ватузов Д.Н., Пуринг С.М. Методика подбора и расчета аппаратов очистки воздуха от капельных аэрозолей // Вестник СГАСУ. Градостроительство и архитектура. 2016. № 2 (23). С. 14–18. DOI:10.17673/Vestnik.2016.02.3.

Об авторе:

#### ВАТУЗОВ Денис Николаевич

старший преподаватель кафедры теплогазоснабжения и вентиляции

Самарский государственный технический университет  
Архитектурно-строительный институт  
443001, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 194,  
тел. 8(927)658-00-87  
E-mail: vatuzov74@mail.ru

Для цитирования: Ватузов Д.Н. Теоретические предпосылки создания аппаратов очистки воздуха в трубках и щелевых каналах от высокодисперсного капельного аэрозоля // Градостроительство и архитектура. 2016. №4(25). С. 40-43. DOI: 10.17673/Vestnik.2016.04.7.

For citation: Vatuzov D.N. Theoretical background of devices for air-cleaning in pipes and conduits from finely dispersed dropping aerosol // Urban Construction and Architecture. 2016. №4(25). Pp. 40-43. DOI: 10.17673/Vestnik.2016.04.7.

#### VATUZOV Denis N.

Senior Lecturer of the Heat and Gas Supply and Ventilation Chair

Samara State Technical University  
Institute of Architecture and Civil Engineering  
443001, Russia, Samara, Molodogvardeyskaya str., 194  
E-mail: vatuzov74@mail.ru