БЕЗОПАСНОСТЬ СТРОИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ. ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ. ГЕОЭКОЛОГИЯ

УДК 504.3.054

DOI: 10.22227/1997-0935.2018.2.222-230

РАСЧЕТ КОНЦЕНТРАЦИЙ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ В НИЖНИХ СЛОЯХ АТМОСФЕРЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕОРИИ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ СТРУЙ

С.А. Яременко, К.В. Гармонов

*Воронежский государственный технический университет (ВГТУ),
394026, г. Воронеж, Московский пр-т, д. 14*

Предмет исследования: в настоящее время определение концентрации вредных веществ в выбросах предприятий независимо от высоты источника выброса и характеристик технологического процесса, согласно нормативам, основано на представлении о слоистом строении атмосферы. Применение модели температурной стратификации атмосферы в отношении вентиляционных источников выброса вредных веществ приводит к немотивированному росту значения максимальных концентраций.

Цели: определить возможность использования других методов для расчета концентраций вредных веществ от низких источников загрязнения атмосферы (ИЗА).

Материалы и методы: рассмотрена возможность использования теории вентиляционных струй для расчета концентраций вредных веществ в атмосфере.

Результаты: определено, что существующий подход расчета выбросов является некорректным в отношении низких ИЗА, к которым относится значительное количество вентиляционных и технологических выбросов вредных веществ.

Выводы: обоснована необходимость использования теории вентиляционных струй при расчетах концентраций вредных веществ от низких ИЗА. Получена зависимость, которая впервые позволяет определить концентрацию вредных веществ в воздухе для ИЗА высотой не более 30...40 м.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: источник загрязнения атмосферы, вредные выбросы, коэффициент стратификации атмосферы, турбулентные струи, коэффициент турбулентного обмена, модель стратификации, приземный слой атмосферы, высота выброса

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Яременко С.А., Гармонов К.В. Расчет концентраций вредных веществ в нижних слоях атмосферы с использованием теории вентиляционных струй // Вестник МГСУ. 2018. Т. 13. Вып. 2 (113). С. 222–230.

CALCULATION OF CONCENTRATIONS OF HARMFUL SUBSTANCES IN THE LOWER ATMOSPHERE USING THE THEORY OF VENTILATION JETS

S.A. Yaremenko, K.V. Garmonov

Voronezh State Technical University (VGTU), 14 Moskovsky prospekt, Voronezh, 394026, Russian Federation

Subject: currently, determination of concentration of harmful substances in the emissions of enterprises, regardless of the height of the emission source and characteristics of technological process, according to the current normative document OND-86, is based on the idea of layered structure of the atmosphere. Application of the model of thermal stratification of the atmosphere with respect to ventilation sources of emission of harmful substances leads to an unjustified increase in the value of maximum concentrations.

Research objectives: determine possibility of using other methods to calculate concentrations of harmful substances from low sources of air pollution.

Materials and methods: possibility of using the theory of ventilation jets for calculating concentrations of harmful substances in the atmosphere is considered.

Results: it is certain that the current approach to calculating emissions is incorrect for low sources of air pollution, which include a significant amount of ventilation and technological emissions of harmful substances.

Conclusions: the necessity of using the theory of ventilation jets in calculating concentrations of harmful substances from low sources of atmospheric pollution is justified. Dependence is obtained that for the first time makes it possible to determine concentration of harmful substances in the air for sources of atmospheric pollution no higher than 30–40 m.

KEY WORDS: source of atmospheric pollution, harmful emissions, atmospheric stratification coefficient, turbulent jets, turbulent exchange coefficient, stratification model, surface layer of the atmosphere, discharge height

FOR CITATION: Yaremenko S.A., Garmonov K.V. Raschet kontsentratsiy vrednykh veschestv v nizhnikh sloyakh atmosfery s ispol'zovaniem teorii ventilyatsionnykh struy [Calculation of concentrations of harmful substances in the lower atmosphere using the theory of ventilation jets]. Vestnik MGSU [Proceedings of the Moscow State University of Civil Engineering]. 2018, vol. 13, issue 2 (113), pp. 222–230.

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что методика ОНД-86¹, регламентируя расчет концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ (ВВ), содержащихся в выбросах предприятий, оперирует понятием «температурная стратификация атмосферы», используя с этой целью коэффициент, зависящий от температурной стратификации атмосферы A .

Максимальное значение приземной концентрации ВВ определяется по формулам:
для горячего источника загрязнения атмосферы (ИЗА)

$$c_m = \frac{AMFm\eta}{H^2 \sqrt[3]{V_1 \Delta T}}, \quad (1)$$

для холодного ИЗА

$$c_m = \frac{AMFm\eta D}{8V_1 H^{4/3}}, \quad (2)$$

где A — коэффициент, зависящий от температурной стратификации атмосферы, $c^{2/3} \cdot ^\circ\text{C}^{1/3} \cdot \text{мг/г}$; M — масса ВВ, выбрасываемого в атмосферу в единицу времени, г/с; F — безразмерный коэффициент, учитывающий скорость оседания вредных веществ в атмосферном воздухе; m и n — коэффициенты, учитывающие условия выхода газовой смеси из устья источника выброса; H — высота источника выброса над уровнем земли, м; η — безразмерный коэффициент, учитывающий влияние рельефа местности; ΔT — разность между температурой выбрасываемой газовой смеси и температурой окружающего атмосферного воздуха, $^\circ\text{C}$; V_1 — расход газовой смеси, $\text{м}^3/\text{с}$; D — диаметр устья, м.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Стратификация — слоистое строение атмосферы, обусловленное различием физических свойств слоев (температура, плотность и т.п.) на различных высотах [1]; распространение этой модели на все источники вентиляционных и технологических выбросов, классифицируемые в самом регламенте как высокие, средние высоты, низкие и наземные (в зависимости от расположения устья источника выброса над уровнем земли), означает лишь безусловное

преобладание сил плавучести над силами инерции во всем диапазоне высот $2 \geq H \geq 50$ м.

Более того, преобладание сил плавучести над силами инерции наблюдается и в случае, когда показатель f больше 100, к которым следует отнести вентиляционные ИЗА, доля которых составляет более 70 % общего количества источников на территории РФ [2–5].

В механике жидкости и газа отношение сил инерции к силам плавучести определяется числом Фруда

$$\text{Fr} = \frac{W_0^2}{g \frac{\rho_\infty - \rho_0}{\rho_0} D_0}, \quad (3)$$

где W_0 — начальная скорость истечения из устья ИЗА, м/с; ρ_∞ и ρ_0 — плотность окружающей среды и плотность газовой смеси, истекающей из устья, кг/м^3 , соответственно; D_0 — диаметр устья, м; g — ускорение силы тяжести, м/с^2 .

Число Ричардсона Ri , характеризующее отношение энергии, обусловленное архимедовыми силами, к продукции под действием напряжений Рейнольдса, может толковаться как отношение сил плавучести к силам инерции, следовательно, как величина, обратная числу Фруда Fr [6]:

$$\text{Ri} = \frac{g [\rho_\infty - \rho_0 / \rho_0] D_0}{W_0^2}. \quad (4)$$

Экспериментально установлено [6], что в области чисел Ричардсона от нуля до 0,08 профиль ветра и температуры подобны. Для вентиляционных ИЗА всегда присутствует возможность варьирования значением Ri или $1/\text{Fr}$ за счет изменения скорости истечения выброса W_0 .

Значение коэффициента стратификации A определяется местоположением источника на географической карте России. Учитывая протяженность пространства РФ и расположение источников выброса в этом пространстве, значения коэффициента, зависящего от температурной стратификации атмосферы, могут быть отнесены к случайным. В таком случае в ОНД-86 существует упорядоченная выборка ($A_1 < A_2 \dots < A_5$) и, нанеся значения A_i на вероятностную бумагу для нормального распределения (рис. 1), легко установить, что интегральная функция распределения для A подчинена нормальному распределению, которое полностью определяется двумя параметрами: центром рассеивания (математическим ожиданием) и среднеквадратическим отклонением.

¹ ОНД-86. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий (недейств.).

Рис. 1. Значения коэффициента A для нормального распределения [1]

Распространением ВВ в приземном слое атмосферы и расчет концентраций от ИЗА рассмотрены в работах [1–5]. В работах [6–14] рассмотрено движение воздушных потоков в приземном слое атмосферы, рассмотрена теория вентиляционных струй, в том числе при неблагоприятных метеорологических условиях. Вопросам снижения влияния ВВ на окружающую среду посвящены исследования [15–19].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Переходя к исследованию, отметим, что в качестве высоты ИЗА регламентируется геометрическая высота, т.е. расстояние от уровня поверхности земли до устья выброса. Поскольку подъем газовой смеси над устьем за счет инерции в методике ОНД-86 не учитывается, то речь следует вести о всплывающей затопленной струе.

Если $T = T_{\infty} + T_1$, то $\rho = \rho_{\infty} + \rho_1$ и $\rho_1 = \rho - \rho_{\infty} = -\rho_{\infty} T$, здесь T_{∞} — постоянное среднее значение, равное средней максимальной температуре наружного воздуха наиболее жаркого месяца года [1]; T_1 — отклонение от T_{∞} ; ρ_{∞} — постоянная плотность окружающей среды при $T = T_{\infty}$; β — коэффициент объемного расширения воздуха $\beta = 3,66 \cdot 10^{-3}$ град⁻¹.

Плотность окружающей среды меняется по высоте z вследствие существующего в ней распределения температуры [7]. Очевидно, что так же, как ранее, верно

$$\rho(z) - \rho_{\infty} = -\beta \rho_{\infty} \Delta T_1(z), \quad (5)$$

где $T_1 = T - T_{\infty}$ — разность температур между потоком газовой смеси из устья источника выброса и окружающей средой.

Так как

$$T_{\infty} = T_{\infty}(z) = T_{\infty} + \Delta T(z), \quad (6)$$

то разность температур между температурой струи (выброса) и окружающей средой — это функция от z :

$$T_1(z) = T(x, y, z) - T_{\infty} - \Delta T_{\infty}(z), \quad (7)$$

где распределение $\Delta T_{\infty}(z)$ можно считать заданной функцией, а значение ΔT_{∞} [5]

$$\overline{\Delta T_{\infty}} \sim z^{-\frac{1}{3}}. \quad (8)$$

Если предположить, что данные экспериментального исследования [8] удовлетворяют решению в первом приближении, то $x = y = 0$, имеем для архимедовой силы

$$dp/dx = (\rho_{\infty} - \rho_{\text{ст}}) \cdot g \cdot F, \quad (9)$$

где $\rho_{\text{ст}}$ — плотность струи; F — площадь поперечного сечения струи.

Поскольку $\rho = \rho_{\infty}(z)$, то распределение плотности по высоте с учетом исследований [5] может быть описано формулой

Рис. 2. Изменение параметра $[\beta\rho_{\infty}\overline{\Delta T(H)}] \cdot g / \rho_{\text{ст}}$ с высотой источника выброса $H_{\text{ист}}$: 1–2 — область без плавучести; 2–3 — ярко выраженная тенденция к плавучести; 3–4 — область положительной плавучести

$$\rho = \rho_{\infty} - \beta\rho_{\infty}\overline{\Delta T(z)}. \quad (10)$$

Тогда:

$$\begin{aligned} & (1/\rho_{\text{ст}})(\rho - \rho_{\text{ст}})g = \\ & = (1/\rho_{\text{ст}})(\rho_{\infty} - \rho_{\text{ст}})g - (1/\rho_{\text{ст}})[\beta\rho_{\infty}\overline{\Delta T(z)}] \cdot g. \end{aligned} \quad (11)$$

В качестве примера рассмотрим выброс из вентиляционного ИЗА с начальной температурой 35 °С и $\rho_{\text{ст}} = 1,146 \text{ кг/м}^3$, истекающего в пространство с расчетной температурой 26 °С и $\rho_{\infty} = 1,18 \text{ кг/м}^3$; высота источника варьируется: 20, 25, 35, 50... и 100 м.

Графическая интерпретация решения (11) представлена на рис. 2.

Как следует из представленного рис. 2, для вентиляционного ИЗА высотой до 35...40 м (с учетом экспериментальных данных [8]) область плавучести отсутствует; для высот 40...50 м наблюдается тенденция к всплыванию струи, с которой приходится считаться и при высоте вентиляционного ИЗА 50...100 м плавучесть является функцией течения газозвушной смеси.

Однако следует отметить, что высоты вентиляционных выбросов более 45 м (даже с учетом устройство факельных выбросов) не присущи стационарным источникам загрязнения атмосферного воздуха.

Но в таком случае распространение модели температурной стратификации атмосферы на вентиляционные источники выброса ВВ приводит к немотивированному росту значения максимальных концентраций.

Если, следуя [9], предпринять попытку отыскания минимальной толщины слоя, в котором мо-

жет развиваться конвективный перенос тепла в турбулентной атмосфере для случая одной свободной границы и одной твердой границы, то, заменяя (как это сделано в работе [8] для случая свободных верхней и нижней границ) молекулярные коэффициенты теплопроводности и вязкости на отношение коэффициента турбулентного обмена на плотность A'/ρ , для $A'=10^2 \text{ г/см} \cdot \text{с}$ имеем

$$\beta\gamma_{\infty}gh^4 / (A'/\rho)^2 \geq 1100,6, \quad (12)$$

где γ_{∞} — адиабатический градиент температуры, равный $10^{-4} \text{ }^{\circ}\text{С} \cdot \text{см}^{-1}$; $\rho = 1,3 \cdot 10^{-3} \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$.

Очевидно, минимальная толщина слоя неустойчивости в турбулентной атмосфере для рассматриваемого случая $h \approx 40 \text{ м}$ за счет взаимодействия истечений из ИЗА с подстилающей поверхностью земли (кустарники, деревья, заборы и т.д.).

Однако, кроме модели стратификации, существует альтернативный вид течения ВВ, транспортируемых газозвушной смесью, истекающей из устья вертикального источника, — свободная приточная турбулентная струя [10, 11].

Наибольший интерес в расчете рассеивания ВВ в атмосфере представляет установление границы струи (факела): если за «скоростную» границу струи принять линию, проходящую через точки поперечного сечения данного струйного течения, где скорость газозвушной смеси $u_{\text{тр}}$ в точках с координатами x и y , составляет 5 % от скорости u_x на оси (координаты $x, 0$), то $u_{\text{тр}} = 1/3u_x$, и обозначив через R текущее значение поперечного размера струи, можно получить

$$y_{\text{тр}} = R = cx \left[2 \ln(u_x / u_{\text{тр}}) \right]^{1/2}. \quad (13)$$

Поскольку, экспериментальная константа для струи, истекающей из открытого круглого отверстия, равна 0,08, то получим

$$y_{\text{тр}} = 0,08x \left[2 \ln(u_x / u_{\text{тр}}) \right]^{1/2}. \quad (14)$$

где x — расстояние от устья истечения газовой смеси по потоку.

Другими словами, речь идет о дальнотойности струи газовой смеси, транспортирующей ВВ [12, 13].

Используя понятие о кинематической характеристике струи [12], с помощью которого можно получить

$$u_x = \left(m u_0 F_0^2 / x \right)^{1/2}, \quad (15)$$

представляется возможным описать границы струи или факела при известных значениях начальной скорости истечения u_0 и площади поперечного сечения устья F_0 с помощью построения линий равных скоростей — изотак — в поперечных сечениях струи на различных расстояниях x , варьируя отношением $u_0/u_{\text{тр}}$ (рис. 3).

Поскольку предполагается осесимметричное движение газовой смеси, то сразу же оказывается известной площадь струи в данном поперечном сечении, и рис. 3 легко изменяется в рис. 4, иллюстрирующий изменение отношения $F_{\text{стр}}/F_0$, так как F_0 всегда известна.

Из рис. 4 следует, что площадь струи газовой смеси, транспортирующей ВВ, ограничена изотаксами $F_{\text{стр}} = \pi y_{\text{тр}}^2$, в этом случае, как следует из рис. 4, эта площадь сначала возрастает до некоторого предельного значения, которому должен соответствовать предельный радиус $R_{\text{тр}}$, а затем уменьшается до нуля вследствие поворота линии тока в направлении оси y .

Установлено [9]

$$\begin{aligned} x(R_{\text{тр}}) &= 0,61m(u_0 / u_{\text{тр}})F_0^{1/2}, \\ R_{\text{тр}} &= 0,05m(u_0 / u_{\text{тр}})F_0^{1/2}, \end{aligned} \quad (16)$$

т.е. объем свободной струи $V_{\text{сп}}$, по мере взаимодействия с окружающей средой растет до определенного значения (при истечении из цилиндрической трубы $V_{\text{тр}} = 0,52(u_0 / u_{\text{тр}})^3 F_0^{3/2}$, а затем уменьшается.

Расстояние x_m от источника выброса, где приземная концентрация достигает максимального значения, представленное в ОНД-86 функцио-

Рис. 3. Линии равных скоростей в поперечных сечениях струи при $u_0/u_{\text{тр}}$: 1-1 — $u_0/u_{\text{тр}} = 5$; 2-2 — $u_0/u_{\text{тр}} = 10$; 3-3 — $u_0/u_{\text{тр}} = 15$; 4-4 — $u_0/u_{\text{тр}} = 20$

Рис. 4. Изменение площади поперечного сечения осесимметричной струи вдоль ее оси при $u_0/u_{\text{тр}}$: 1-1 — $u_0/u_{\text{тр}} = 5$; 2-2 — $u_0/u_{\text{тр}} = 10$; 3-3 — $u_0/u_{\text{тр}} = 15$; 4-4 — $u_0/u_{\text{тр}} = 20$

нальной зависимостью $x_m = f(w_0, D_0, V_0, \Delta T, H)$, оказывается идентично описанному выше, так как $n = \psi(\Delta T)$.

Таким образом, применение теории свободных вентиляционных турбулентных струй в расчетах рассеивания ВВ позволяет, с одной стороны, избежать излишнего эмпиризма в определении коэффициента d [1], с другой — избежать нарушений метода размерностей при его определении.

Итак, согласно изложенному выше, на высоте источника выброса ВВ на некотором расстоянии от устья x в результате распада струи, образовалось облако ВВ, размеры которого известны (рис. 4) с концентрацией, имеющей максимальное значение C_m .

Дальнейшее описание процесса рассеивания ВВ в атмосферном воздухе, где наблюдается средняя скорость ветра u_∞ , основано на модели «движущегося источника».

Если $\theta = x - u_\infty \tau$ (где τ — время), то система движется с неизменной скоростью u_∞ относительно неподвижной системы x, y, z и направление u_∞ параллельно x . В таком случае наблюдатель, расположенный неподвижно на оси x , отметит изменение концентрации ВВ в окружающей среде по мере продвижения облака; наблюдатель, расположенный в точке на оси θ , будет лишен такой возможности.

Такое условие кажущегося стационарного состояния концентрации может быть интерпретировано как квазистационарное, которое в движущейся системе координат представляется в виде $\partial C / \partial \tau = 0$ [14].

Обозначим для удобства, концентрацию $C_{\text{окр}} = q$ и, полагая, что $\partial q / \partial \tau = 0$, запишем уравнение распределения концентраций в виде

$$\frac{\partial^2 q}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 q}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 q}{\partial z^2} = -\frac{u_\infty}{A'} \frac{\partial q}{\partial \theta}, \quad (17)$$

где A' — коэффициент турбулентного обмена, $\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$.

Если вновь обратиться к инженерной практике расчетов загрязнения вентиляционными выбросами атмосферного воздуха [15–18], то, как правило, они сводятся к решению двухмерной задачи, что позволяет представить (17) в виде

$$\frac{\partial^2 q}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 q}{\partial y^2} = -\frac{u_\infty}{A'} \frac{\partial q}{\partial \theta}. \quad (18)$$

С целью интегрирования последнего уравнения достаточно предположить

$$q = e^{[-(u_\infty / 2A')\theta]} \cdot F(\Theta, y), \quad (19)$$

где F — функция в цилиндрических координатах, $F = F(r, \varphi) / r^2 = x^2 + y^2$; $\varphi = \arctg(y/x)$.

Используя граничные условия

$$dq / dr = 0 \text{ при } r \rightarrow \infty,$$

$$-L(2\pi r) dq / dr = M \text{ при } r \rightarrow 0,$$

где L — объемный секундный расход газовой смеси в устье источника; M — масса ВВ, выбрасываемое в единицу времени. После преобразований и возвращения к прямоугольным координатам уравнение (18) принимает вид

$$C = C_{\text{окр}} + \frac{M}{2\pi L} e^{-(u_\infty / 2A')(x - u_\infty \tau)} \cdot K_0 \left(\frac{u_\infty}{2A'} \sqrt{(x - u_\infty \tau)^2 + y^2} \right). \quad (20)$$

Полученное уравнение (20) не может быть решено одновременно относительно x и y ; поэтому, выбрав x в качестве параметра, вычислим затем C , как функцию только y .

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Таким образом, модель «движущегося источника», как и модель «предельного радиуса» (статистическая модель), представляются лишь следствием, вытекающим из основных положений теории свободных турбулентных струй, где струйное течение определяется в виде потока ограниченных поперечных размеров в среде с однородными физическими свойствами и вовсе неограниченного твердыми стенками.

Полученная авторами зависимость (20) впервые позволяет определить концентрацию ВВ в воздухе при выбросах от вентиляционных и технологических ИЗА высотой не более 30...40 м.

ВЫВОДЫ

1. В работе установлено, что применение методики ОНД-86 при расчете выбросов от низких ИЗА приводит к немотивированному росту значения максимальных концентраций ВВ в воздухе.

2. Обоснована необходимость использования теории вентиляционных струй при расчетах концентраций ВВ от низких ИЗА.

3. Полученная авторами зависимость впервые позволяет определить концентрацию ВВ в воздухе для ИЗА высотой не более 30...40 м.

ЛИТЕРАТУРА

1. Полосин И.И., Гармонов К.В. Распространение в приземном слое атмосферы вредных веществ

от работающих двигателей автомобилей // Экология и промышленность России. 2013. № 200. С. 48–49.

2. Полосин И.И., Гармонов К.В., Плотников А.В. Распределение концентрации загрязняющих веществ в приземном слое атмосферы в условиях тумана и дождя // *Экология промышленного производства*. 2013. № 3. С. 26–28.
3. Jaremenko S.A., Garmonov K.V., Sheps R.A. Research of air pollution by dust aerosols during construction // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety (ICCATS 2017)*. 2017. № 262. Режим доступа: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/262/1/012189/pdf>.
4. Полосин И.И., Жерлыкина М.Н., Чуйкин С.В. Эффективные конструктивные решения по снижению концентрации загрязняющих веществ в выбросах предприятий пищевой промышленности // *Экология и промышленность России*. 2011. № 9. С. 8–9.
5. Полосин И.И., Алексенцев В.А. Влияние аэродинамических показателей строительства жилых домов с индивидуальных отоплением в черте городской застройки на загрязнение приземного слоя атмосферы // *Экология и промышленность России*. 2012. № 3. С. 53–55.
6. Ламли Дж., Пановски Г. Структура атмосферной турбулентности: пер. с англ. М. : Мир, 1966. 236 с.
7. Шепс Р.А., Куцев Л.А., Шашин А.В., Лобанов Д.В. Влияние запыленности ограждающих конструкций на способность поглощать солнечную энергию // *Приволжский научный журнал*. 2017. № 4 (44). С. 51–59.
8. Вульфсон Н.И. Некоторые результаты исследования конвективных движений в свободной атмосфере // *Исследование облаков, осадков и грозowego электричества : II сб. докладов VI Межведомств. конф.* М. : Изд-во АН СССР, 1961. С. 108–119.
9. Шишкин Н.С. Облака, осадки и грозвое электричество. М. : ГИТТЛ, 1954. 280 с.
10. Абрамович Г.Н. Теория турбулентных струй. М. : Физматгиз, 1960 115 с.
11. Скрыпник А.И., Жерлыкина М.Н. Расчетная модель определения наиболее вероятной величины вентиляционного выброса химических веществ при аварийной ситуации // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2004. № 5. С. 72–75.
12. Шенелев И.А. Аэродинамика воздушных потоков в помещении М. : Стройиздат, 1978. 144 с.
13. Полосин И.И., Лобанов Д.В. Схема создания комфортных климатических параметров в офисах // *Сантехника, отопление, кондиционирование*. 2015. № 2 (158). С. 58–61.
14. Талиев В.Н. Аэродинамика вентиляции М. : Стройиздат, 1979. 295 с.
15. Сушко Е.А., Переславцева И.И., Дурукин В.Н., Ряскова А.В. Анализ эффективности систем пылеулавливания при применении уголкового фильтра // *Инженерные системы и сооружения*. 2010. № 2. С. 192–196.
16. Сушко Е.А., Переславцева И.И., Шепс Р.А. Использование уголковых фильтров для уменьшения концентрации пыли в аспирационном воздухе // *Научный вестник ВГАСУ. Серия: Физико-химические проблемы и высокие технологии строительного материаловедения*. 2013. № 6. С. 119–123.
17. Грей Э., Мэтьюз Г.Б. Функции Бесселя и их приложения к физике и механике. М. : Изд-во иностр. лит-ры, 1953. 371 с.
18. Полосин И.И. Охрана атмосферы от выбросов промышленной вентиляции и котельных. Воронеж : ВГАСУ, 2007. 192 с.
19. Zherlykina M.N., Vorob'eva Y.A., Jaremenko S.A. Technical means and methods of environmental protection in case of accident at chemically hazardous industrial facility // *IOP conference series: Materials science and engineering. International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety (ICCATS 2017)*. 2017. № 262. Режим доступа: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/262/1/012176/pdf>.

Поступила в редакцию 2 декабря 2016 г.

Принята в доработанном виде 10 октября 2017 г.

Одобрена для публикации 20 января 2018 г.

ОБ АВТОРАХ: Яременко Сергей Анатольевич — кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой жилищно-коммунального хозяйства, Воронежский государственный технический университет (ВГТУ), 394026, г. Воронеж, Московский пр-т, д. 14, jaremenko83@mail.ru, ORCID 0000-0002-7302-7111;

Гармонов Кирилл Валерьевич — старший преподаватель кафедры жилищно-коммунального хозяйства, Воронежский государственный технический университет (ВГТУ), 394026, г. Воронеж, Московский пр-т, д. 14, garmonkir@mail.ru, ORCID 0000-0003-0423-0535.

REFERENCES

1. Polosin I.I., Garmonov K.V. Rasprostranenie v prizemnom sloe atmosfery vrednykh veshchestv ot rabotayushchikh dvigateley avtomobiley [Dissipation of pollutants in ground layer from functional motors of cars]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* [Ecology and Industry of Russia]. 2013, no. 200, pp. 48–49. (In Russian)
2. Polosin I.I., Garmonov K.V., Plotnikov A.V. Raspredelenie kontsentratsii zagryaznyayushchikh veshchestv v prizemnom sloe atmosfery v usloviyakh tumana i dozhdya [Distribution of concentration of polluting substances in a ground layer of the atmosphere in the conditions of a fog and a rain]. *Ekologiya promyshlennogo proizvodstva* [Ecology of Industrial Production]. 2013, no. 3, pp. 26–28. (In Russian)
3. Jaremenko S.A., Garmonov K.V., Sheps R.A. Research of air pollution by dust aerosols during construction. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: International Conference on Construction, Architecture and Techno sphere Safety (ICCATS 2017)*. 2017, no. 262. Available at: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/262/1/012189/pdf>.
4. Polosin I.I., Zherlykina M.N., Chuykin S.V. Effektivnye konstruktivnye resheniya po snizheniyu kontsentratsii zagryaznyayushchikh veshchestv v vybrosakh predpriyatiy pishchevoy promyshlennosti [Effective structural solutions for reduction of pollutant concentrations in emissions of enterprises of food industry]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* [Ecology and Industry of Russia]. 2011, no. 9, pp. 8–9. (In Russian)
5. Polosin I.I., Aleksentsev V.A. Vliyanie aerodinamicheskikh pokazateley stroitel'stva zhilykh domov s individual'nykh otopeniem v cherte gorodskoy zastroйки na zagryaznenie prizemnogo sloya atmosfery [Influence of the aerodynamic performance of the construction of residential buildings with individual heating within the city limits on the pollution of the ground atmospheric layer]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* [Ecology and Industry of Russia]. 2012, no. 3, pp. 53–55. (In Russian)
6. Lumley J.L., Panofsky H.A. *The structure of atmospheric turbulence*. New York, Wiley, 1964.
7. Sheps R.A., Kushchev L.A., Shashin A.V., Lobanov D.V. Vliyanie zapylennosti ograzhdayushchikh konstruktsey na sposobnost' pogloshchat' solnechnuyu energiyu [Impact of dust walling the ability to absorb solar energy]. *Privolzhskiy nauchnyy zhurnal* [Privolzhsky Scientific Journal]. 2017, no. 4 (44), pp. 51–59. (In Russian)
8. Vul'fson N.I. Nekotorye rezul'taty issledovaniya konvektivnykh dvizheniy v svobodnoy atmosfere [Some of the results of the study of convective motions in the free atmosphere]. *Issledovanie oblakov, osadkov i grozovogo elektrichestva : II sb. dokladov VI Mezhdvostv. konf.* [Study of clouds, precipitation and thunderstorm electricity: Proceedings of the VI of reports of the Interdepartmental conference]. Moscow, Academy of Sciences of the SSSR, 1961, Pp. 108–119. (In Russian)
9. Shishkin N.S. *Oblaka, osadki i grozovoe elektrichestvo* [Clouds, precipitation and thunderstorm electricity]. Moscow, GITTL, 1954. 280 p. (In Russian)
10. Abramovich G.N. *Teoriya turbulentnykh struy* [Theory of turbulent jets]. Moscow, Fizmatgiz Publ., 1960. 115 p. (In Russian)
11. Skrypnik A.I., Zherlykina M.N. Raschetnaya model' opredeleniya naibolee veroyatnoy velichiny ventilyatsionnogo vybrosa khimicheskikh veshchestv pri avariynoy situatsii [Calculation model for determining the most probable value of venting of chemicals in an emergency situation]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Stroitel'stvo* [News of Universities. Construction]. 2004, no. 5, pp. 72–75. (In Russian)
12. Shepelev I.A. *Aerodinamika vozdushnykh potokov v pomeshchenii* [Aerodynamics of air flows in rooms]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1978. 144 p. (In Russian)
13. Polosin I.I., Lobanov D.V. Skhema sozdaniya komfortnykh klimaticheskikh parametrov v ofisakh [Scheme for creating comfortable climatic parameters in the office]. *Santekhnika, otopenie, konditsionirovanie* [Plumbing, heating, air conditioning]. 2015, no. 2 (158), pp. 58–61. (In Russian)
14. Taliev V.N. *Aerodinamika ventilyatsii* [Aerodynamics of ventilation]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1979. 295 p.
15. Sushko E.A., Pereslavl'tseva I.I., Durukin V.N., Ryaskova A.V. Analiz effektivnosti sistem pyleulavlivaniya pri primenenii ugolkovogo fil'tra [Analysis of efficiency of dust recovery systems at use in the angular filter]. *Inzhenernye sistemy i sooruzheniya* [Engineering Systems and Constructions]. 2010, no. 2, pp. 192–196. (In Russian)
16. Sushko E.A., Pereslavl'tseva I.I., Sheps R.A. Ispol'zovanie ugolkovykh fil'trov dlya umen'sheniya kontsentratsii pyli v aspiratsionnom vozdukh [Use of angular filters for reduction of concentration of dust in aspiration air]. *Nauchnyy vestnik VGASU. Seriya: Fiziko-khimicheskie problemy i vysokie tekhnologii stroitel'nogo materialovedeniya* [Scientific bulletin of the Voronezh state architectural and construction university. Series: Physical and chemical problems and high technologies of construction materials science]. 2013, no. 6, pp. 119–123. (In Russian)
17. Gray A., Mathews G.B. *A treatise on Bessel functions and their applications to physics*. 2nd Edition, Dover, New York, 1966.
18. Polosin I.I. *Okhrana atmosfery ot vybrosov promyshlennoy ventilyatsii i kotel'nykh* [Protection of atmosphere from emissions of industrial ventilation and boilers]. Voronezh, Voronezh State Architecture and Construction University, 2007. 192 p. (In Russian)

19. Zherlykina M.N., Vorob'eva Y.A., Jaremenko S.A. Technical means and methods of environmental protection in case of accident at chemically hazardous industrial facility. *IOP conference series: Materials science and engineering. International Con-*

ference on Construction, Architecture and Technology Safety (ICCATS 2017). 2017, no. 262. Available at: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/262/1/012176/pdf>.

Received December 2, 2016.

Adopted in revised form October 10, 2017.

Approved for publication on January 20, 2018.

ABOUT THE AUTHORS: **Yaremenko Sergey Anatol'evich** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Housing and Communal Services, **Voronezh State Technical University (VGTU)**, 14 Moskovsky prospekt, Voronezh, 394026, Russian Federation; jaremenko83@mail.ru;

Garmonov Kirill Valer'evich — Senior Lecturer, Department of Housing and Communal Services, **Voronezh State Technical University (VGTU)**, 14 Moskovsky prospekt, Voronezh, 394026, Russian Federation; garmonkir@mail.ru; ORCID 0000-0003-0423-0535.