

ЭКОЛОГИЯ / ECOLOGY

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.125.40>

РАСЧЕТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ПЫЛЕВЫХ ЧАСТИЦ ВНУТРИ ПОМЕЩЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ПРИМЕНЕНИЯ ВЕНТИЛЯЦИИ И ВОЗДУХООЧИСТИТЕЛЕЙ

Научная статья

Мартынов Д.Ю.^{1,*}, Брижанин В.В.², Сударикова Е.В.³, Киселева С.П.⁴, Лагутина Н.В.⁵, Жуков В.В.⁶, Новиченко А.И.⁷

¹ ORCID : 0000-0002-8279-5569;

² ORCID : 0000-0003-0592-0327;

³ ORCID : 0000-0002-6328-8414;

⁴ ORCID : 0000-0002-0564-7626;

⁵ ORCID : 0000-0003-1066-2211;

⁶ ORCID : 0000-0001-7702-9192;

^{1, 5, 7} Московская сельскохозяйственная академия имени К. А. Тимирязева, Москва, Российская Федерация

^{2, 3, 6} НИИ «Низкоуглеродная экономика», РЭУ имени Г.В. Плеханова, Москва, Российская Федерация

⁴ Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, Москва, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (dimamifi[at]mail.ru)

Аннотация

В статье выполнен массообменный расчет, определяющий изменение концентрации пылевых частиц заданного фракционного состава в воздухе небольших жилых, административных и производственных помещений. Получены формулы, определяющие значение средней концентрации пылевых частиц в воздухе помещения, при его естественной и искусственной вентиляции и при работе воздухоочистителя. Полученные формулы позволяют с небольшой погрешностью прогнозировать изменение концентрации отдельных фракций пылевых частиц внутри помещения за период времени в несколько часов. Расчет может быть использован при выборе методов и технологий вентиляции и пылеочистки зданий и помещений и дает возможность и подобрать наиболее простые и малозатратные способы вентиляции воздуха, а при очистке воздуха с помощью воздухоочистителя, правильно определить мощность воздухоочистителя и компоновку специализированных фильтров внутри него. Представленные в статье научные результаты могут быть применены в учебном процессе и использованы для проведения дальнейших исследований в соответствующей области.

Ключевые слова: безопасность жизнедеятельности, загрязнение воздуха, концентрация пылевых частиц, массообменный расчет, вентиляция помещения, пылеочистка, воздухоочиститель, экологическая и техносферная безопасность.

A CALCULATED MODELING OF INDOOR DUST PARTICULATE CONCENTRATIONS UNDER VENTILATION AND AIR PURIFICATION CONDITIONS

Research article

Martynov D.Y.^{1,*}, Brizhanin V.V.², Sudarikova E.V.³, Kiseleva S.P.⁴, Lagutina N.V.⁵, Zhukov V.V.⁶, Novichenko A.I.⁷

¹ ORCID : 0000-0002-8279-5569;

² ORCID : 0000-0003-0592-0327;

³ ORCID : 0000-0002-6328-8414;

⁴ ORCID : 0000-0002-0564-7626;

⁵ ORCID : 0000-0003-1066-2211;

⁶ ORCID : 0000-0001-7702-9192;

^{1, 5, 7} Moscow Agricultural Academy named after K. A. Timiryazev, Moscow, Russian Federation

^{2, 3, 6} Research Institute "Low-Carbon Economy", Plekhanov Russian University of Economics, Moscow, Russian Federation

⁴ Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation

* Corresponding author (dimamifi[at]mail.ru)

Abstract

The article performs a mass-exchanging calculation, determining the change in the concentration of dust particles of a given fractional composition in the air of small residential, administrative and industrial premises. The formulas determining the value of the average concentration of dust particles in the air of the premises during its natural and artificial ventilation and during the work of air purifier have been obtained. The obtained formulas allow to predict with a small margin of error the change in the concentration of individual fractions of dust particles inside the premises for a period of a few hours. The calculation can be used when selecting methods and technologies of ventilation and dust treatment of buildings and premises and choosing the simplest and the least expensive methods of air ventilation, and when purifying the air with an air cleaner, to determine correctly the capacity of the air cleaner and the layout of specialized filters inside it. Scientific results presented in the article can be applied in the educational process and used for further research in the relevant field.

Keywords: life safety, air pollution, dust particle concentration, mass exchanging calculation, room ventilation, dust purification, air purifier, environmental and technological safety.

Введение

В современном мире значимой практической задачей является определение концентраций частиц пыли различных фракционных размеров внутри помещений. Превышение нормативов содержания частиц пыли различных фракций и химического состава в воздухе жилых и рабочих помещений наносит вред находящимся внутри помещения людям, приводит к снижению производительности труда, потере рабочего времени, а при длительном воздействии уменьшает продолжительность их жизни, вызывает воспаление дыхательных путей и глаз, аллергические реакции кожи, злокачественные и иные заболевания [1], [2], [3], [5]. При этом пыль может поступать в помещение из загрязненного атмосферного воздуха, а также вырабатываться в результате различных технологических процессов (использование сыпучих материалов, шлифовка и т.д.) внутри помещения. В этой связи требование, связанное с обеспечением комфортного и безопасного нахождения людей внутри промышленных, общественных и жилых зданий обосновывается целым рядом нормативных документов, в том числе представленных в ГОСТ, СНиП, гигиенических нормативах [6], [10], [17], [18]. Существует много способов достижения вышеуказанных требований, это естественная и искусственная вентиляция помещения, использование воздухоочистителей с установленными НЕРА-фильтрами, гидрофильтрами, электростатическими и угольными фильтрами, и другими фильтрами, очищающими воздух [1]. Практическому применению данных способов и систем препятствует отсутствие расчетных методов, позволяющих определять изменение концентрации химических и биологических загрязнений в воздухе помещения.

В связи с этим, проведем прямой массообменный расчет для отдельного загрязняющего воздух вещества (аэрозоли в виде биологического или химического загрязнителя). Введем упрощение, связанное с небольшими линейными размерами помещения и быстрым выравниванием концентрации загрязняющего воздух вещества внутри помещения в результате массообмена и диффузии. Массообменный расчет разобьем на две части, изменение концентрации загрязняющего воздух вещества при естественной и искусственной вентиляции помещения и изменение концентрации загрязняющего воздух вещества при использовании воздухоочистителя.

Основная часть

Изменение концентрации загрязняющего воздух вещества при естественной и искусственной вентиляции помещения может быть рассчитано следующим образом. Для расчета введем показатель суммарной массы загрязнений аэрозоли или химического соединения (X) в воздухе комнаты зависящий от времени, $a(t)$. Откуда значение средней концентрации загрязняющего воздух вещества $C_t(X)$ в воздухе помещения рассчитывается по формуле:

$$C_t(X) = \frac{a(t)}{V} \quad (1)$$

где $a(t)$ – суммарная масса загрязнений химического элемента (X) в воздухе помещения, мг;
 V – объем помещения, м³.

Расчет будем проводить с учетом небольших размеров частиц пыли w'_{oc} , актуальной для режима течения потоков воздуха внутри помещения и концентрации частиц. При небольших скоростях движения воздуха (менее 0,5 м/с) и концентрациях частиц измеряемых миллиграммами на кубометр воздуха скорость осаждения для частиц может быть выражена через $w'_{oc} \approx w_{oc}$, где w_{oc} – скорость осаждения частиц в диапазоне применимости закона Стокса. Скорость осаждения для частиц эффективного диаметра d_u , находится по следующей формуле, достаточно хорошо согласующейся с экспериментальными данными по осаждению кремнийсодержащих пылевых частиц размерами менее 0,1 мм [1], [19]:

$$w_{oc} = \frac{F}{3 \cdot \pi \cdot \mu} \quad (2)$$

Где: F – сила, действующая на закрепленную неподвижную частицу при обтекании ее низкоскоростным потоком газа;

d_u – диаметр (эффективный) частиц, м;

ρ_u – средняя плотность частиц, кг/м³;

ρ_c – плотность среды (воздуха), кг/м³;

μ – динамическая вязкость среды (воздуха), Па·с (вязкость воздуха при 300К⁰, равна 18,5·10⁻⁶ Па·с).

Данная формула также может быть преобразована при замене F на стандартное уравнение Стокса для газа и жидкости [1]:

$$w_{oc} = \frac{g \cdot (\rho_u - \rho_c) \cdot d_u^2}{18 \cdot \mu} \quad (3)$$

Где g – ускорение свободного падения, м/с²;

d_u – диаметр (эффективный) частиц, м;

ρ_u – средняя плотность частиц, кг/м³;

ρ_c – плотность среды (воздуха), кг/м³.

Масса оседающей в единицу времени пыли dm_{oc} , пропорциональна объему площадки, оседающей в единицу времени dt на поверхность, умноженному на концентрацию частиц внутри площадки на которую ложится пыль, или:

$$dm_{oc} = C_t(X) \cdot dV = \frac{a(t)}{V} \cdot S \cdot w_{oc} dt = \frac{a(t)}{V} \cdot \frac{V}{H} \cdot w_{oc} dt = \frac{a(t)}{H} \cdot w_{oc} dt \quad (4)$$

Где S – площадь помещения, м²;

H – высота помещения, м;

w_{oc} – скорость осаждения частиц пыли м/с;

t – переменная, определяющая интегрирование по времени от 0 до T .

Начальные условия

Считаем, что концентрация загрязняющих воздух частиц в атмосферном воздухе за пределами помещения на период расчета остается постоянной $C_{вх}$, а вынужденная или естественная вентиляция сопровождается отводом из помещения воздуха с объемным расходом Q и подачей из атмосферы вне помещения воздушной массы с таким же расходом Q . Тогда для расчета суммарной массы загрязняющего воздух вещества (X) справедлива следующая формула:

$$a(T) = a_0 - \int_0^T C_T(X) \cdot Q \cdot dt - \int_0^T \frac{a(t)}{H} \cdot w_{oc} \cdot dt + \int_0^T C_{вх} \cdot Q \cdot dt \quad (5)$$

где Q – расход воздуха, выходящего из помещения, [м³/с];

V – объем помещения, [м³];

$C_{вх}$ – концентрация загрязняющего вещества во входящем потоке воздуха, [мг/м³];

a_0 – первоначальная суммарная масса загрязнений химического элемента (X) в воздухе помещения [мг];

T – общее время вентиляции помещения, [с];

t – переменная, определяющая интегрирование по времени от 0 до T .

В формуле (5) величина $\int_0^T C_t(X) \cdot Q \cdot dt$ – определяет массу загрязняющего вещества в потоке отводимого воздуха, покинувшего помещение и попавшего в атмосферу за время T , а величина $\int_0^T C_{вх} \cdot Q \cdot dt$ – определяет массу загрязняющего вещества, поступившего в помещение в потоке воздуха из атмосферы за время T . С учетом этого формула (4) может быть преобразована в уравнение:

$$a(T) = a_0 - \int_0^T \frac{a(t)}{V} \cdot Q \cdot dt - \int_0^T \frac{a(t)}{H} \cdot w_{oc} \cdot dt + \int_0^T C_{вх} \cdot Q \cdot dt \quad (6)$$

Решаем уравнение (6) методом подстановки, с использованием следующей зависимости:

$$a(t) = \gamma \cdot e^{\alpha t} + \beta \quad (7)$$

где: e – число Эйлера (2,718..);

γ, α, β – константы, определяемые при решении уравнения (6).

После подстановки (7) в уравнение (6), с учетом упрощения о постоянстве $C_{вх}$ получаем соотношение:

$$\begin{aligned} \gamma \cdot e^{\alpha T} + \beta = a_0 - \frac{\gamma \cdot Q}{\alpha \cdot V} \cdot e^{\alpha T} - \frac{\beta \cdot Q}{V} \cdot T + \frac{\gamma \cdot Q}{\alpha \cdot V} - \frac{\gamma \cdot w_{oc}}{\alpha \cdot H} \cdot e^{\alpha T} - \\ - \frac{\beta \cdot w_{oc}}{H} \cdot T + \frac{\gamma \cdot w_{oc}}{\alpha \cdot H} + C_{вх} \cdot Q \cdot T \end{aligned} \quad (8)$$

Выражение (8) с учетом различных параметрических зависимостей от конечного времени T и констант может быть разбито на отдельные составные уравнения:

$$\gamma \cdot e^{\alpha T} = -\left(\frac{\gamma \cdot Q}{\alpha \cdot V} + \frac{\gamma \cdot w_{oc}}{\alpha \cdot H}\right) \cdot e^{\alpha T}; \quad (9)$$

$$\beta = a_0 + \frac{\gamma \cdot Q}{\alpha \cdot V} + \frac{\gamma \cdot w_{oc}}{\alpha \cdot H};$$

$$-\frac{\beta \cdot Q}{V} \cdot T - \frac{\beta \cdot w_{oc}}{H} \cdot T + C_{вх} \cdot Q \cdot T = 0$$

Из уравнений (9) получаем следующие решения:

$$1 = -\left(\frac{Q}{\alpha \cdot V} + \frac{w_{oc}}{\alpha \cdot H}\right) \quad (10)$$

$$\alpha = -\left(\frac{Q}{V} + \frac{w_{oc}}{H}\right)$$

$$-\frac{\beta \cdot Q}{V} - \frac{\beta \cdot w_{oc}}{H} + C_{вх} \cdot Q = 0 \quad (11)$$

$$\beta \cdot \left(\frac{Q}{V} + \frac{w_{oc}}{H}\right) = C_{вх} \cdot Q$$

$$\beta = \frac{C_{вх} \cdot Q}{\left(\frac{Q}{V} + \frac{w_{oc}}{H}\right)}$$

$$\beta = a_0 + \frac{\gamma \cdot Q + \gamma \cdot w_{oc}}{V + H} \quad (12)$$

$$\frac{C_{вх} \cdot Q}{\left(\frac{Q}{V} + \frac{w_{oc}}{H}\right)} = a_0 + \frac{\gamma \cdot Q + \gamma \cdot w_{oc}}{-\left(\frac{Q}{V} + \frac{w_{oc}}{H}\right)}$$

$$C_{вх} \cdot Q = a_0 \cdot \left(\frac{Q}{V} + \frac{w_{oc}}{H}\right) - \gamma \cdot \left(\frac{Q}{V} + \frac{w_{oc}}{H}\right)$$

$$\gamma = a_0 - \frac{C_{вх} \cdot Q}{\left(\frac{Q}{V} + \frac{w_{oc}}{H}\right)}$$

Подставив величины (10), (11), (12) в выражение (7) получим суммарную массу загрязнений химического элемента (X) в воздухе помещения в момент конечного времени T:

$$a(T) = \left(a_0 - \left(\frac{C_{вх} \cdot Q}{\left(\frac{Q}{V} + \frac{w_{oc}}{H}\right)} \right) \right) \cdot e^{-\left(\frac{Q}{V} + \frac{w_{oc}}{H}\right) \cdot T} + \frac{C_{вх} \cdot Q}{\left(\frac{Q}{V} + \frac{w_{oc}}{H}\right)} \quad (13)$$

С учетом выражения (13) значение средней концентрации загрязняющего воздух вещества $C_t(X)$ в воздухе помещения может быть определено как:

$$C_t(X) = \left(\frac{a_0}{V} - \left(\frac{C_{вх} \cdot Q}{V \cdot \left(\frac{Q}{V} + \frac{w_{oc}}{H}\right)} \right) \right) \cdot e^{-\left(\frac{Q}{V} + \frac{w_{oc}}{H}\right) \cdot T} + \frac{C_{вх} \cdot Q}{V \cdot \left(\frac{Q}{V} + \frac{w_{oc}}{H}\right)} \quad (14)$$

или:

$$C_t(X) = \left(C_0 - \left(\frac{C_{вх} \cdot Q}{V \cdot \left(\frac{Q}{V} + \frac{w_{oc}}{H}\right)} \right) \right) \cdot e^{-\left(\frac{Q}{V} + \frac{w_{oc}}{H}\right) \cdot T} + \frac{C_{вх} \cdot Q}{V \cdot \left(\frac{Q}{V} + \frac{w_{oc}}{H}\right)} \quad (15)$$

$$C_0 = \frac{a_0}{V} \quad (16)$$

где C_0 – начальная концентрация загрязняющего вещества в воздухе помещения, [мг/м³].

Таким образом, зная такие параметры как: концентрация загрязняющего вещества во входящем потоке воздуха, начальная концентрация загрязняющего вещества в воздухе помещения, расход воздуха, объем и высоту помещения, по формуле (15) можно определить, как будет меняться концентрация пылевых частиц в зависимости от времени естественной или искусственной вентиляции помещения. В качестве примера изучим два предельных случая для помещения с внутренним объемом, $V = 60 \text{ м}^3$ и температурой 26,85 °С (300 °К), соответствующей динамической вязкости воздуха $\mu = 1,85 \cdot 10^{-5} \text{ Па}$. В первом случае рассмотрим ситуацию, когда небольшое жилое, административное или офисное помещение находится на нижнем этаже сильно запыленного города, например, Махачкалы или Магнитогорска, в которых среднесуточная концентрация взвешенных веществ в 2017 годукратно превышала среднесуточные значения ПДК [7, 20]. При закрытом окне пыль в течение нескольких часов оседает и далее удаляется в процессе уборки помещения, при проветривании помещения оно постепенно заполняется воздухом с большим содержанием пыли. Рассмотрим допущение, при котором в воздухе преобладает фракция пыли с эффективным диаметром в 10 мкм или фракция пыли с эффективным диаметром в 3 мкм для частиц со средней плотностью $\rho_c = 2500,00 \text{ кг/м}^3$, оседающих в воздухе при температуре 26,85 °С (соответствующей плотности воздуха $\rho_a = 1,18 \text{ кг/м}^3$). Для удобства сопоставим полученные данные с ПДК максимальная разовая (ПДК_{м.р.} = 0,3 мг/м³) для взвешенных частиц размерами менее 10 мкм (PM 10). Для расчетов определим как незначительную, начальную концентрацию взвешенных веществ в помещении, $C_0 = 0,001 \text{ мг/м}^3$ и концентрацию взвешенных частиц на улице как $C_{вх} = 0,6 \text{ мг/м}^3$. Во втором предельном случае рассмотрим обратную ситуацию, когда помещение очищается за счет входящего воздуха, и концентрации загрязняющих веществ на улице не значительны, а в помещении превышают ПДК, зададим начальные значения как, $C_0 = 0,6 \text{ мг/м}^3$ и концентрацию взвешенных частиц на улице как, $C_{вх} = 0,001 \text{ мг/м}^3$. Для жилого помещения, требуемый воздухообмен на одного человека при общей площади более 20 м² должен составлять не менее 30 м³/час (0,008 м³/с), определим расчетный расход воздуха при вентиляции как, $Q = 0,015 \text{ м}^3/\text{с}$, высоту помещения как $H = 2,8 \text{ метра}$ [18]. Результаты расчетов в программе Microsoft Excel по формуле (15) представлены на Рисунке 1.

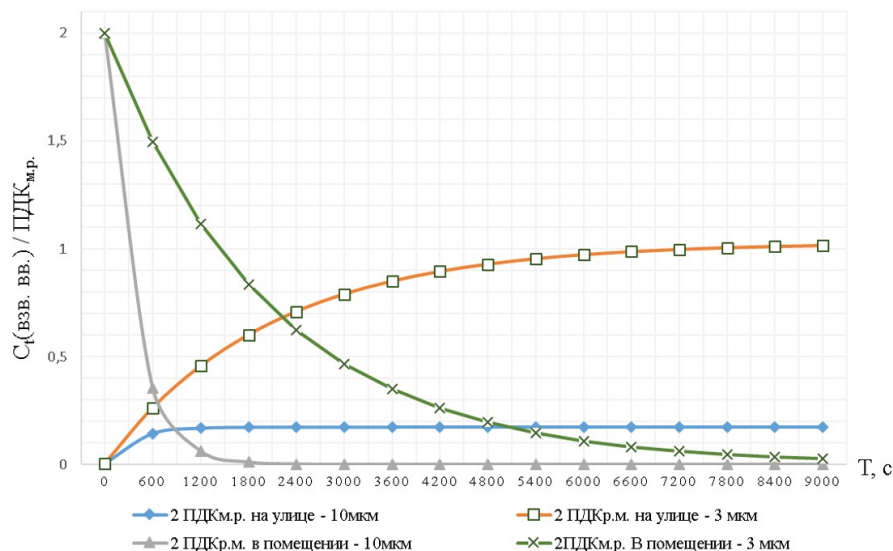


Рисунок 1 - Расчет изменения соотношения средней концентрации взвешенных частиц размерами 10 и 3 мкм к ПДК_{м.р.} (PM 10) от времени, в помещении объемом 60 м³, при его естественной вентиляции (с расходом 0,015 м³/с) и начальных концентрациях взвешенных частиц $C_{вх}=0,6$ мг/м³, $C_0 = 0,001$ мг/м³, и при начальных концентрациях взвешенных частиц $C_{вх}=0,001$ мг/м³, $C_0 = 0,6$ мг/м³
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.125.40.1>

Как видно на Рисунке 1, ввиду малых потоков воздуха внутри помещения пыль, особенно более крупная, достаточно быстро оседает и концентрация пыли внутри помещения всегда будет ниже чем на запыленной улице, с существенно большей скоростью ветра при вентиляции сильно загрязненного частицами пыли помещения. При этом чем больше будут размеры пылевых частиц, тем ниже будет предел их максимальной концентрации, ввиду существенно большей скорости осаждения более крупных частиц $w_{ос}$. При обратном процессе, низкоскоростной вентиляции запыленного помещения воздухом с улицы, с небольшими концентрациями пылевых частиц, динамика уменьшения концентрации пылевых частиц также существенным образом зависит от их размеров и для частиц размерами 10 мкм падает практически до 0 через 2000 секунд, а для частиц размерами 4 мкм динамика их осаждения не столь значительна и основным фактором уменьшения их концентрации является именно вентиляция помещения.

На втором этапе найдем формулу, позволяющую при усредненных начальных данных с небольшой погрешностью определять изменение концентрации пылевых частиц в помещении, внутри которого функционирует воздухоочиститель. Для определения эффективности работы воздухоочистителя используем значение средней концентрации загрязняющего вещества в воздухе помещения $C_{тпом}(X)$. Эффективность работы воздухоочистителя выразима через коэффициент очистки, k , как отношение массовой доли загрязняющего вещества задерживаемой на фильтрах воздухоочистителя ко всей массе загрязняющего вещества, проходящего через воздухоочиститель при номинальном расходе воздуха. Коэффициент очистки меняется от 0 до 1, и при $k = 1$ вся масса загрязняющего вещества задерживается воздухоочистителем, а при $k = 0$, проходит через воздухоочиститель, не задерживаясь на фильтрах. Сделаем небольшое упрощение, считая, что в течение нескольких часов работы воздухоочистителя, качество очистки сильно не меняется и k остается постоянной величиной. Для расчета введем показатель суммарной массы загрязняющего вещества, аэрозоли или химического соединения (X) в воздухе помещения, зависящий от времени, $a(t)$. Соответственно, по аналогии с формулой (1) значение средней концентрации загрязняющего вещества $C_{тпом}(X)$ в воздухе помещения определяется как:

$$C_{тпом}(X) = \frac{a(t)}{V} \quad (17)$$

где V – объем помещения, м³;

$C_{тпом}(X)$ – концентрация загрязняющего вещества (X) в воздухе помещения, мг/м³;

$a(t)$ – суммарная масса загрязнений химического элемента (X) в воздухе помещения, мг.

Тогда массу $m_t(X)$ загрязняющего вещества (X), задерживаемую воздухоочистителем за единицу времени, в момент времени t можно рассчитать на основе следующего выражения:

$$m_t(X) = C_{тпом}(X) \cdot Q_{воз} \cdot k \quad (18)$$

где $m_t(X)$ – масса загрязняющего вещества, задерживаемая воздухоочистителем в единицу времени мг/с;

$Q_{воз}$ – расход воздуха проходящего через воздухоочиститель м³/с;

k – безразмерный коэффициент очистки, определяющий эффективность работы воздухоочистителя при очистке воздуха от выбранного загрязняющего вещества (X).

Тогда для расчета суммарной массы пылевых частиц (X) в воздухе помещения, с учетом их осаждения в момент времени T , справедлива следующая формула:

$$a(T) = a_0 - \int_0^T m_t(X) \cdot dt - \int_0^T \frac{a(t)}{H} \cdot w_{ос} \cdot dt \quad (19)$$

где: a_0 – первоначальная суммарная масса загрязнений химического элемента (X) в воздухе помещения [мг];
 T – общее время очистки помещения, с;
 w_{oc} – скорость осаждения частиц м/с;
 t – переменная, определяющая интегрирование по времени от 0 до T .

Здесь выражение $\int_0^T m_t(X) \cdot dt$ определяет массу вещества задержанную воздухоочистителем за время T .

С учетом (16) и (17) формула (19) может быть преобразована в уравнение:

$$a(T) = a_0 - \int_0^T \frac{a(t)}{V} \cdot Q_{воз} \cdot k \cdot dt - \int_0^T \frac{a(t)}{H} \cdot w_{oc} \cdot dt$$

Уравнение (16) решается методом подстановки, с использованием следующей зависимости:

$$a(t) = \varepsilon \cdot e^{\tau t} \quad (20)$$

где: e – число Эйлера (2,718..);

ε , τ – константы, определяемые при решении уравнения (16).

После подстановки (20) в (19) и интегрирования может быть получено следующее уравнение:

$$\varepsilon \cdot e^{\tau T} = a_0 - \frac{\varepsilon \cdot e^{\tau T}}{V \cdot \tau} \cdot Q_{воз} \cdot k + \frac{\varepsilon}{V \cdot \tau} \cdot Q_{воз} \cdot k - \frac{w_{oc} \cdot \varepsilon \cdot e^{\tau T}}{H \cdot \tau} + \frac{w_{oc} \cdot \varepsilon}{H \cdot \tau} \quad (21)$$

Выражение (18) имеет следующие решения для констант ε и τ :

$$\tau = - \left(\frac{Q_{воз} \cdot k}{V} + \frac{w_{oc}}{H} \right) \quad (22)$$

$$\varepsilon = a_0 \cdot \frac{\left(\frac{Q_{воз} \cdot k}{V} + \frac{w_{oc}}{H} \right)}{\left(\frac{Q_{воз} \cdot k}{V} + \frac{w_{oc}}{H} \right)} = a_0 \quad (23)$$

С учетом (21) и (22), выражение (20) может быть преобразовано в формулу суммарной массы загрязняющего вещества (X) в воздухе помещения:

$$a(T) = a_0 \cdot e^{-\left(\frac{Q_{воз} \cdot k}{V} + \frac{w_{oc}}{H} \right) \cdot T} \quad (24)$$

Формула (24) с учетом (16) преобразуется в:

$$C_{tпом}(X) = C_{0пом}(X) \cdot e^{-\left(\frac{Q_{воз} \cdot k}{V} + \frac{w_{oc}}{H} \right) \cdot t} \quad (25)$$

$$C_{0пом}(X) = \frac{a_0}{V} \quad (26)$$

где $C_{0пом}(X)$ – начальная концентрация загрязняющего вещества в воздухе помещения, мг/м³.

На Рисунке 2 представлены результаты расчета по формуле (25) для помещения запыленного в результате технических работ помещения при показателях: $k=0$ (без фильтра), $k=0,85$, $k=0,95$ и $k=0,99995$ (соответствующих классам эффективности фильтров E10, E11, H14 согласно ГОСТ Р ЕН 1822-1-2010), размерах пылевых частиц 3 мкм, и при расчетном расходе воздуха проходящего через фильтр, $Q = 0,015$ м³/с, объеме помещения, $V = 60$ м³, высоте помещения, $H = 2,8$ метра [21]. Для удобства также взято отношение концентрации пылевых частиц в помещении к ПДК максимальная разовая (ПДКм.р. = 0,3 мг/м³) для взвешенных частиц размерами менее 10 мкм.

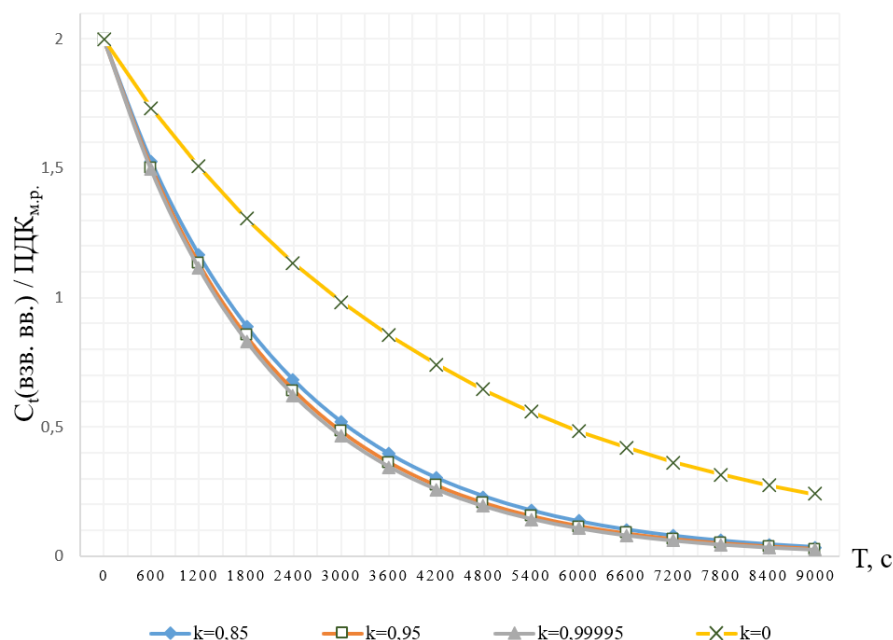


Рисунок 2 - Расчет изменения соотношения концентрации пылевых частиц размерами 3 мкм к ПДК_{м.р.} (PM 10) от времени, с учетом их осаждения и прохождения через фильтр в помещении объемом 60 м³, при начальной концентрации взвешенных частиц $C_0 = 0,6 \text{ мг/м}^3$, $k=0$, $k=0,85$, $k=0,95$ и $k=0,99995$
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.125.40.2>

Как видно на Рисунке 2 применение воздухоочистителя приводит к значимому уменьшению концентрации пылевых частиц по сравнению с изменением концентрации при их естественном осаждении, при этом фильтры с меньшими классами эффективности E10 ($k=0,85$) обеспечивают сопоставимый уровень очистки помещения с более дорогостоящими и классами фильтров E11, H14 ($k=0,95$ и $k=0,99995$).

Заключение

Для вентилируемого или очищаемого помещения, с учетом начальных условий и параметров, определяющих средние по продолжительности временные периоды (не более нескольких часов), расхода, поступающего или очищаемого воздуха, объема помещения, начальных концентраций загрязняющего вещества в атмосферном воздухе и в воздухе помещения, параметров эффективности работы воздухоочистителя, проведены массообменные расчеты определяющие изменение концентрации отдельных фракций пылевых частиц в воздухе помещения. Получены формулы, определяющие значение средней концентрации фракций пылевых частиц в воздухе помещения, при естественной и искусственной вентиляции помещения, и работе воздухоочистителя, расположенного внутри помещения.

Представленные в статье научные результаты могут быть применены в учебном процессе, в частности, по дисциплинам «Безопасность жизнедеятельности» и «Методы исследований и обработка информации в природопользовании», а также по другим дисциплинам, в рамках которых рассматриваются вопросы обеспечения экологической и техносферной безопасности [2, 3]. Данная работа может быть использована для проведения дальнейших исследований в рамках научных школ, которые развиваются под руководством ведущих учёных в области обеспечения безопасности и эколого-ориентированного развития экономики на базе Российского государственного аграрного университета – МСХА имени К. А. Тимирязева, Государственного университета управления, Финансового университета при Правительстве РФ, Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана, Российского экономического университета имени Г. В. Плеханова и других вузов России [2], [4].

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Ветошкин А.Г. Процессы и аппараты пылеочистки / А.Г. Ветошкин – Пенза: Издательство Пензенского государственного университета, 2005. – 210 с.

2. Мартынов Д.Ю. Методы определения качества воздушной среды / Д.Ю. Мартынов, Т.М. Джанчаров, Н.В. Лагутина – М.: ДПК Пресс, 2022. – 120 с.
3. Киселева С.П. Дисциплина «Безопасность жизнедеятельности» – основополагающая дисциплина образовательных программ по всем направлениям подготовки бакалавров в вузах. / С.П. Киселева, С.А. Пухов // Отходы и ресурсы. – 2020. – № 1. – с. 1-17. – URL: <https://resources.today/PDF/01ECOR120.pdf> (дата обращения: 05.10.22). – DOI: 10.15862/01ECOR120
4. Вишняков Я.Д. Научная школа «Управление рисками и обеспечение безопасности социально-экономических и общественно-политических систем и природно-техногенных комплексов» / Я.Д. Вишняков, С.П. Киселева – М.: Мир науки, 2021. – 131 с.
5. Novikov A.V. Impact factory assessment on air on the Pekhorka river basin . / A.V. Novikov, M.A. Shiryayeva, O.V. Sumarukova et al. // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 723 (052005); – Issue 723. – Smolensk: IOP Publishing Ltd, 2021. – p. 1-7.
6. Russian Federation. Об охране окружающей среды: Федеральный закон Рос. Федерации от 10 января 2002 г. : Федеральный закон №7 : [принят принят Гос. Думой Федер. Собр. Рос. Федерации 2001-12-20 : одобр. одобр. Советом Федерации Федер. Собр. Рос. Федерации 2001-11-26]. 2002.
7. СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. – Введ. 2021-01-28. – М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2021. – 469 с.
8. СанПиН 2.1.2.2645-10. Санитарно-эпидемиологические требования к условиям проживания в жилых зданиях и помещениях. . – Введ. 2010-06-10. – М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2010. – 27 с.
9. СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений. – Введ. 1996-10-01. – М.: Госкомсанэпиднадзор, 1996. – 12 с.
10. ГН 2.2.5.3532-18. Предельно допустимые концентрации (ПДК) вредных веществ в воздухе рабочей зоны. – Введ. 2018-02-13. – М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2018. – 170 с.
11. ГОСТ 12.1.007-76. Система стандартов безопасности труда. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности. – Введ. 1977-01-01. – М.: Стандартиформ, 1976. – 7 с.
12. ГОСТ 30494-2011. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях. – Введ. 2012-04-28. – М.: Межгосударственная научно-техническая комиссия по стандартизации, техническому нормированию и оценке соответствия в строительстве , 2012. – 23 с.
13. ГОСТ 12.1.014-84. Воздух рабочей зоны. – Введ. 1984-12-14. – М.: Стандартиформ , 2010. – 8 с.
14. ГОСТ 12.1.005-88. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны. – Введ. 1989-01-01. – М.: Стандартиформ, 1989. – 77 с.
15. ЕН 13779:2005. Технические требования к системам вентиляции и кондиционирования. – Введ. 2008-01-10. – Москва : Стандартиформ , 2008. – 47 с.
16. СНиП 41.01-2003. Отопление, вентиляция и кондиционирование. – Введ. 2003-06-26. – М.: Стандартиформ, 2004. – 89 с.
17. ГОСТ 33007-2014. Оборудование газоочистное и пылеулавливающее. – Введ. 2014-10-20. – М.: Стандартиформ, 2015. – 27 с.
18. СП 54.13330.2016 Здания жилые многоквартирные (актуализированная редакция СНиП 31-01-2003). – Введ. 2016-12-03. – М.: Консультант плюс, 2019. – 55 с.
19. Береснев С.А. Физика атмосферных аэрозолей. Курс лекций [Электронный ресурс] / С.А. Береснев, В.И. Грязин // Электронный научный архив УрФУ. – 2008. – URL: https://elar.urfu.ru/bitstream/10995/1407/6/1332025_lectures.pdf. (дата обращения: 07.09.22)
20. Ануфриева А.Ф. Состояние загрязнения атмосферы в городах на территории России за 2017 год / А.Ф. Ануфриева, М.С. Загайнова, Т.П. Ивлева и др. – Саратов: Амрит, 2019. – 251 с.
21. ГОСТ Р ЕН 1822-1-2010. Высокоэффективные фильтры очистки воздуха ЕРА, HEPA и ULPA. Классификация, методы испытаний, маркировка. – Введ. 2022-10-06. – М.: стандартиформ, 2011. – 12 с.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Vetoshkin A.G. Processy i apparaty' py'leochistki [Dust cleaning processes and devices] / A.G. Vetoshkin – Penza: Izdatel'stvo Penzenskogo gosudarstvennogo universiteta, 2005. – 210 p. [in Russian]
2. Marty'nov D.Yu. Metody' opredeleniya kachestva vozduшной sredy' [Methods for determining the quality of the air environment] / D.Yu. Marty'nov, T.M. Dzhancharov, N.V. Lagutina – М.: DPK Press, 2022. – 120 p. [in Russian]
3. Kiseleva S.P. Disciplina «Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti» – osnovopolagayushhaya disciplina obrazovatel'ny'x programm po vsem napravleniyam podgotovki bakalavrov v vuzakh [The Discipline “Life safety” is a fundamental discipline of educational programs in all areas of bachelor's degree training in universities]. / S.P. Kiseleva, S.A. Puxov // Otxody' i resursy' [Waste and Resources]. – 2020. – № 1. – p. 1-17. – URL: <https://resources.today/PDF/01ECOR120.pdf> (accessed: 05.10.22). – DOI: 10.15862/01ECOR120 [in Russian]
4. Vishnyakov Ya.D. Nauchnaya shkola «Upravlenie riskami i obespechenie bezopasnosti social'no-e'konomicheskix i obshhestvenno-politicheskix sistem i prirodno-texnogenny'x kompleksov» [Scientific School "Risk Management and security of socio-economic and socio-political systems and natural and man-made complexes"] / Ya.D. Vishnyakov, S.P. Kiseleva – М.: Mir nauki, 2021. – 131 p. [in Russian]
5. Novikov A.V. Impact factory assessment on air on the Pekhorka river basin . / A.V. Novikov, M.A. Shiryayeva, O.V. Sumarukova et al. // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 723 (052005); – Issue 723. – Smolensk: IOP Publishing Ltd, 2021. – p. 1-7.

6. Russian Federation. Ob oxrane okruzhayushhej sredy': Federal'ny'j zakon Ros. Federacii ot 10 yanvarya 2002 g. [On Environmental Protection: Federal Law of the Russian Federation. Federation of January 10, 2002] : Federal Law №7 : [accepted by adopted by the State Duma Feder. Sobr. R. Federations 2001-12-20 : approved by approval. Federation Council Feder. Sobr. R. Federations 2001-11-26]. 2002. [in Russian]
7. SanPiN 1.2.3685-21. Gigienicheskie normativy' i trebovaniya k obespecheniyu bezopasnosti i (ili) bezvrednosti dlya cheloveka faktorov sredy' obitaniya [Sanitary Rules And Normatives 1.2.3685-21 "Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and (or) harmlessness of environmental factors for humans"]. – Introduced 2021-01-28. – M.: Federal'ny'j centr gigieny' i e'pidemiologii Rospotrebnadzora, 2021. – 469 p. [in Russian]
8. SanPiN 2.1.2.2645-10. Sanitarno-e'pidemiologicheskie trebovaniya k usloviyam prozhivaniya v zhily'x zdaniyax i pomeshheniyax. [Sanitary rules and regulations 2.1.2.2645-10. Sanitary and epidemiological requirements for living conditions in residential buildings and premises.]. – Introduced 2010-06-10. – M.: Federal'ny'j centr gigieny' i e'pidemiologii Rospotrebnadzora, 2010. – 27 p. [in Russian]
9. SanPiN 2.2.4.548-96. Gigienicheskie trebovaniya k mikroklimatu proizvodstvenny'x pomeshhenij [Sanitary rules and regulations 2.2.4.548-96. Hygienic requirements for the microclimate of industrial premises.]. – Introduced 1996-10-01. – M.: Goskomsane'pidnadzor, 1996. – 12 p. [in Russian]
10. GN 2.2.5.3532-18. Predel'no dopustimye koncentracii (PDK) vredny'x veshhestv v vozduxe rabochej zony' [Hygiene standards 2.2.5.3532-18. Maximum permissible concentrations (MPC) of harmful substances in the air of the working area]. – Introduced 2018-02-13. – M.: Federal'ny'j centr gigieny' i e'pidemiologii Rospotrebnadzora, 2018. – 170 p. [in Russian]
11. GOST 12.1.007-76. Sistema standartov bezopasnosti truda. Vredny'e veshhestva. Klassifikaciya i obshhie trebovaniya bezopasnosti [GOST 12.1.007-76. The system of occupational safety standards. Harmful substances. Classification and general safety requirements]. – Introduced 1977-01-01. – M.: Standartinform, 1976. – 7 p. [in Russian]
12. GOST 30494-2011. Zdaniya zhily'e i obshhestvenny'e. Parametry' mikroklimata v pomeshheniyax [GOST 30494-2011. Residential and public buildings. Indoor microclimate parameters]. – Introduced 2012-04-28. – M.: Mezhgosudarstvennaya nauchno-texnicheskaya komissiya po standartizacii, texnicheskomu normirovaniyu i ocenke sootvetstviya v stroitel'stve , 2012. – 23 p. [in Russian]
13. GOST 12.1.014-84. Vozdux rabochej zony' [GOST 12.1.014-84. The air of the working area]. – Introduced 1984-12-14. – M.: Standartinform , 2010. – 8 p. [in Russian]
14. GOST 12.1.005-88. Obshhie sanitarno-gigienicheskie trebovaniya k vozduxu rabochej zony' [GOST 12.1.005-88. General sanitary and hygienic requirements for the air of the working area]. – Introduced 1989-01-01. – M.: Standartinform, 1989. – 77 p. [in Russian]
15. EN 13779:2005. Texnicheskie trebovaniya k sistemam ventilyacii i kondicionirovaniya [EN 13779:2005. Technical requirements for ventilation and air conditioning systems]. – Introduced 2008-01-10. – Moskva : Standartinform , 2008. – 47 p. [in Russian]
16. SNiP 41.01-2003. Otoplenie, ventilyaciya i kondicionirovanie [SNiP 41.01-2003. Heating, ventilation and air conditioning]. – Introduced 2003-06-26. – M.: Standartinform, 2004. – 89 p. [in Russian]
17. GOST 33007-2014. Oborudovanie gazoочистное i py'leulavlivayushhee [GOST 33007-2014. Gas cleaning and dust collecting equipment]. – Introduced 2014-10-20. – M.: Standartinform, 2015. – 27 p. [in Russian]
18. SP 54.13330.2016 Zdaniya zhily'e mnogokvartirny'e (aktualizirovannaya redakciya SNiP 31-01-2003) [SP 54.13330.2016 Residential apartment buildings (updated version of SNiP 31-01-2003)]. – Introduced 2016-12-03. – M.: Konsul'tant plyus, 2019. – 55 p. [in Russian]
19. Beresnev S.A. Fizika atmosfery'x ae'rozolej. Kurs lekcij [Physics of atmospheric aerosols. A course of lectures] [Electronic source] / S.A. Beresnev, V.I. Gryazin // UrFU Electronic Scientific Archive. – 2008. – URL: https://elar.urfu.ru/bitstream/10995/1407/6/1332025_lectures.pdf. (accessed: 07.09.22) [in Russian]
20. Anufrieva A.F. Sostoyanie zagryazneniya atmosfery' v gorodax na territorii Rossii za 2017 god [The state of atmospheric pollution in cities in Russia in 2017] / A.F. Anufrieva, M.S. Zagajnova, T.P. Ivleva et al. – Saratov: Amrit, 2019. – 251 p. [in Russian]
21. GOST R EN 1822-1-2010. Vy'sokoe'ffektivny'e fil'try' ochistki vozduxa ERA, HEPA i ULPA. Klassifikaciya, metody' ispy'tanij, markirovka [GOST R EN 1822-1-2010. Highly efficient EPA, HEPA and ULPA air purification filters. Classification, test methods, marking]. – Introduced 2022-10-06. – M.: standartinform, 2011. – 12 p. [in Russian]