

УДК 697.95

## ПРИМЕСНЫЕ ЧАСТИЦЫ В ТУРБУЛЕНТНОМ ПОТОКЕ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ

Гусенцова Я.А.<sup>1</sup>, Красногрудов А.В.<sup>2</sup>, Родыгина М.М.<sup>3</sup>, Высоцкая Н.Д.<sup>4</sup><sup>1,2,3</sup>ФГБОУ ВО «Луганский государственный университет им. В. Даля»

291034, Луганская Народная Республика, г.о. Луганский, г. Луганск, кв. Молодежный, 20А

<sup>4</sup>ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет им. В. И. Вернадского», институт «Агротехнологическая академия»  
295492, Республика Крым, г. Симферополь, п. Аграрное, институт «Агротехнологическая академия»E-mail: <sup>1</sup>gusentsova@gmail.com, <sup>2</sup>krasnogrudov@mail.ru, <sup>3</sup>sunsara\_06@mail.ru, <sup>4</sup>natali.v-v@mail.ru

**Аннотация.** Статья посвящена анализу времени пребывания частиц в системах вентиляции. Под временем пребывания понимается продолжительность нахождения отдельной частицы или элемента потока внутри объема аппарата или системы от момента входа до момента выхода. Исследование этого параметра является важным для оценки эффективности воздухообмена, равномерности распределения свежего воздуха и качества микроклимата в помещении.

В зависимости от вида входного воздействия получена: дифференциальная функция распределения, характеризующая долю частиц, время пребывания которых близко к заданному значению; интегральная функция распределения времени пребывания частицы в потоке ( $C(\tau)$ ).

Отмечено, что среднее время пребывания является ключевым расчетным параметром, и для идеализированных моделей потоков определяется как отношение объема аппарата к объемному расходу потока, структура потока в вентилируемом помещении напрямую определяет распределение времени пребывания частиц в потоке.

Анализ характеристик времени пребывания, приведенный в статье, позволяет оценить эффективность работы системы вентиляции и перемешивания воздуха.

Полученные результаты могут быть полезными для оптимизации систем вентиляции с целью повышения эффективности перемешивания воздушных масс и улучшения качества воздуха в помещениях. Это также может иметь практическое применение в области обеспечения безопасности и санитарии в зданиях и помещениях с высокими требованиями к системам вентиляции.

**Предметом исследования** является анализ времени пребывания частиц в системах вентиляции, что является важным для оценки эффективности воздухообмена, равномерности распределения свежего воздуха и качества микроклимата в помещении.

**Материалы и методы:** исследование времени пребывания частиц в системе вентиляции включают использование методов моделирования, экспериментов и анализа данных для определения связей между различными параметрами.

**Результаты:** На основе проведенного исследования выполнен анализ среднего времени пребывания частиц в потоке, определено распределение времени пребывания частиц в потоке. Анализ среднего времени пребывания частиц в потоке позволяет оценить общую эффективность перемешивания. Большое среднее время пребывания может свидетельствовать о необходимости оптимизации системы вентиляции.

Распределение времени пребывания частиц в потоке охарактеризовано дисперсией. Установлено, что низкая дисперсия указывает на равномерное перемешивание, в то время как высокая дисперсия может свидетельствовать о неравномерном распределении частиц.

Идентификация выбросов и аномалий в данных о времени пребывания частиц позволяет выявить возможные неисправности в системе вентиляции, требующие дополнительного внимания и регулировки.

Статистические характеристики времени пребывания частиц в потоке систем вентиляции и перемешивания являются важными для понимания и оптимизации гидродинамических процессов в этих системах.

**Выводы:** Анализ среднего времени пребывания частиц в потоке позволяет оценить общую эффективность перемешивания. Распределение времени пребывания частиц в потоке может быть охарактеризовано дисперсией. Идентификация выбросов и аномалий в данных о времени пребывания частиц позволяет выявить возможные неисправности в системе вентиляции. Исследование связи времени пребывания частиц с различными параметрами работы системы вентиляции может предоставить дополнительные возможности для оптимизации процессов вентиляции.

**Ключевые слова:** перемешивающая вентиляция, турбулентность, время пребывания частиц в потоке, статистические характеристики, входной сигнал.

## ВВЕДЕНИЕ

Основная роль вентиляции – защита здоровья и жизни работников путем контроля за воздушной средой в рабочей зоне. Ее значение можно разделить на несколько важных функций: поддержание требуемых параметров микроклимата в помещениях; обеспечение кислородом и удаление избыточного тепла и влаги в воздухе помещений; защита от взрывов и пожаров; защита от биологических загрязнителей [2, 12].

Примеси в вентиляционных системах промышленных предприятий можно систематизировать по физическому состоянию и отраслевой специфике. По физическому состоянию можно выделить твердые частицы (пыль и аэрозоли), газообразные вещества, жидкие аэрозоли и пары, биологические примеси. Типичные примеси по отраслям промышленности: металлургия и металлообработка, химическая и нефтехимическая промышленность, деревообработка и целлюлозно-бумажное производство, пищевая промышленность и др.

Примеси представляют серьезную угрозу для безопасности труда. Они могут вызывать острые и хронические заболевания, снижать работоспособность и приводить к профессиональным патологиям. Основные риски связаны с воздействием на органы дыхания, кожу, слизистые оболочки и общее состояние здоровья работников.

Перемешивающая вентиляция – это один из основных способов распределения воздуха в помещении, при котором высокоскоростной турбулентный поток приточного воздуха активно перемешивается с воздушной массой помещения.

Это создает относительно равномерное поле температур и скоростей по всему объему. В таких системах частицы пыли, микроорганизмы и другие взвешенные вещества подвергаются воздействию воздушных потоков, что влияет на качество воздуха и комфорт людей. В приведенной статье рассматривается поведение частиц в потоке перемешивания, ключевые факторы влияния и особенности проектирования таких систем.

## АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ

Поведение частиц в потоке перемешивающей вентиляции определяется сложным взаимодействием аэродинамических сил, свойств частиц и параметров воздушного потока [1, 4]. Правильное проектирование систем перемешивающей вентиляции, включая выбор воздухораспределителей с высоким коэффициентом эжекции и учет факторов, влияющих на движение частиц, позволяет обеспечить высокое качество воздуха и комфортные условия в помещении. Однако в помещениях с высокими требованиями к чистоте воздуха (например, медицинские учреждения) целесообразно комбинировать перемешивающую вентиляцию с вытесняющей для достижения оптимальных результатов.

Время пребывания частиц в потоке перемешивания системы вентиляции является критическим параметром, определяющим эффективность воздухообмена, распределение загрязняющих веществ и качество микроклимата в помещении. Этот показатель отражает среднюю продолжительность нахождения воздушных частиц (или загрязнений) в вентилируемом пространстве до их удаления. Расчет времени пребывания позволяет оптимизировать работу вентиляционных систем, обеспечивая энергоэффективность и соответствие санитарно-гигиеническим нормам.

Расчет времени пребывания частиц в потоке перемешивания системы вентиляции является неотъемлемой частью проектирования и эксплуатации современных вентиляционных

систем [5, 7]. Он напрямую влияет на здоровье людей, энергопотребление и соответствие нормативным требованиям. Дальнейшее развитие методов расчета будет способствовать созданию более эффективных автоматизированных систем вентиляции, адаптирующихся к изменяющимся условиям.

Применительно к системам вентиляции «время пребывания частиц в потоке» обычно означает период времени, в течение которого частицы находятся в воздушном потоке системы вентиляции перед тем, как покинуть систему или быть удаленными. Это важный параметр для оценки эффективности системы вентиляции, особенно в контексте удаления загрязнений из воздуха, таких как пыль, газы или микроорганизмы [3, 9].

Время пребывания частиц в потоке в системе вентиляции зависит от типа потока (ламинарный, турбулентный поток [1, 11], характера сигнала [6, 10] и ряда других факторов [4, 9].

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследование времени пребывания частиц в системе вентиляции включают использование методов моделирования и анализа данных для определения связей между различными параметрами. Рассмотрены различные характеристики возмущения (импульсное, частотное).

Частотный анализ позволил заменить временные функции частотными с помощью операторного метода Лапласа.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

Исследование времени пребывания частиц в системе вентиляции может включать в себя использование методов моделирования, экспериментов и анализа данных для определения связей между различными параметрами.

При ступенчатом возмущении меняют входную величину (например, расход воздуха, расход теплоносителя в калорифере, его температуры и т.д.) до нового значения скачком и получают так называемую *F*-выходную кривую (рис. 1, а).

При импульсном возмущении получают так называемую *C*-выходную кривую (рис. 1, б). При частотном возмущении входная величина изменяется по закону гармонического колебания и на выходе получают измененную синусоиду по амплитуде и фазе (рис. 1, в).

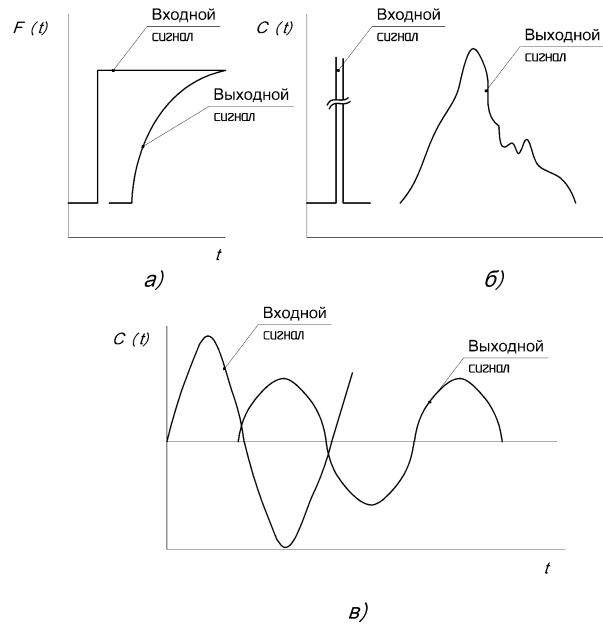


Рис.1. Виды входных и выходных сигналов  
 Fig. 1. Types of input and output signals

Статистическая функция распределения входного сигнала (при нанесении импульсного возмущения записывается, С-кривая) в виде [6]:

$$C = \int_0^{\infty} \tau C(\tau) d\tau. \quad (1)$$

Среднее время пребывания  $\bar{\tau}$  можно определить следующим образом:

$$\bar{\tau} = \frac{\int_0^{\infty} \tau C(\tau) d\tau}{\int_0^{\infty} C(\tau) d\tau} \approx \frac{\sum \tau C}{\sum C}. \quad (2)$$

Обычно  $C(\tau)$  представляют в виде:

$$C(\tau) = \frac{1}{\tau} \frac{C}{C_0} = \frac{C}{\sum C \Delta\tau}, \quad (3)$$

где  $\Delta\tau$  – интервал измерения параметра;  $C$  – значение параметра;  $C_0$  – начальное значение параметра.

Безразмерное время пребывания в равно:

$$\theta = \frac{\tau}{\bar{\tau}}. \quad (4)$$

Если известно среднее времени  $\tau$ , С-кривая может выражаться уравнением:

$$C = \frac{C}{C_0} = \tau C(\tau), \quad (5)$$

где  $C_0$  – начальное значение параметра.

Дисперсия рассматриваемой величины около среднего значения определяется формуле [6, 11]:

$$\sigma_{\tau}^2 = \frac{\sum x_i^2 f(x_i)}{\sum f(x_i)} - \left[ \frac{\sum x_i f(x_i)}{\sum f(x_i)} \right]^2. \quad (6)$$

Тогда

$$\begin{aligned} \sum f(x_i) &= \sum C_i; \quad \sum x_i f(x_i) = \sum \tau_i C_i; \\ \sum x_i^2 f(x_i) &= \sum \tau_i^2 C_i. \end{aligned} \quad (7)$$

В безразмерных единицах времени  $\sigma^2$ :

$$\sigma^2 = \frac{\sigma_{\tau}^2}{(\bar{\tau})^2}, \quad (8)$$

или

$$\sigma^2 = \frac{\sum \theta^2 C}{\sum C} - 1 = \sum \theta^2 C \Delta\theta - 1. \quad (9)$$

Связь между функциями распределения при ступенчатом и импульсном возмущении [8]:

$$F = \int_0^{\theta} C d\theta; \quad C = \frac{dF}{d\theta}. \quad (10)$$

Умножив  $C(\tau)d\tau S$  на значение параметра  $C_A$ , определяем среднюю величину параметра  $\bar{C}_A$ :

$$\bar{C}_A = \int_{\tau=0}^{\tau=\infty} C_A C(\tau) d\tau. \quad (11)$$

Линейными системами назовем такие, для которых между входной и выходной величиной имеется прямая пропорциональность, т. е.

$$\frac{\Delta(\text{выход})}{\Delta(\text{вход})} = \frac{d(\text{выход})}{d(\text{вход})}, \quad (12)$$

или интегрируя, получим:

$$\text{выход} = k_1(\text{вход}) + k_2. \quad (13)$$

Линейные процессы обладают следующими особенностями:

1. Если ряд независимых линейных процессов протекает последовательно в системе, то их результирующий эффект есть также линейный процесс.

2. Результирующий эффект индивидуальных линейных процессов, протекающих последовательно, может быть проанализирован на основе рассмотрения отдельных процессов.

Частотные характеристики [8]. получают циклическим изменением возмущения (рис. 1, в) с определенной частотой. Частотный анализ позволяет заменять временные функции частотными с помощью операторного метода Лапласа [3]:

$$F(p) = \int_0^{\infty} \exp(-p\tau) f(\tau) d\tau. \quad (14)$$

Таким образом, если имеется функция  $f(\tau)$ , описывающая поведение какой-либо системы во времени, то ее можно заменить соответствующей ей функцией  $F(p)$  произвольной комплексной переменной  $p = a + j\omega$  (где  $j = \sqrt{-1}$ ,  $\omega$  – частота). Операция перехода оригинала к изображению:

$$F(p) \div f(\tau), F(p) = L[f(\tau)].$$

Обратное преобразование Лапласа:

$$f(\tau) = \frac{1}{2\pi j} \int_{-j\infty}^{+j\infty} F(p) \exp(-p\tau). \quad (15)$$

Из этого выражения по величине  $F(p)$  можно найти  $f(t)$ . Сокращенное обозначение перехода имеет вид:

$$f(\tau) \div F(p), f(\tau) = L^{-1}[F(p)].$$

Используя преобразования Лапласа, дифференциальные уравнения приводим к уравнениям в операторной форме:

$$\begin{aligned} \frac{df}{d\tau} \div pF(p) - pf(0); \\ \frac{d^2f}{d\tau^2} \div p^2F(p) - p^2f(0) - pf'(0); \\ \frac{d^nf}{d\tau^n} \div p^nF(p) - p^nf(0) - p^{n-1}f'(0) - \dots - pf^{(n-1)}(0). \end{aligned} \quad (16)$$

При нулевых начальных условиях для функций  $f(\tau)$  вместе с производными до  $(n-1)$  порядка равны нулю, формулы можно упростить:

$$\begin{aligned} \frac{df}{d\tau} \div pF(p); \\ \frac{d^2f}{d\tau^2} \div p^2F(p); \\ \frac{d^nf}{d\tau^n} \div p^nF(p). \end{aligned} \quad (17)$$

Справедливо следующее правило:

$$\int_0^{\tau} f(\tau) d\tau \div \frac{1}{p} F(p); \int_0^{\tau} \dots \int_0^{\tau} f(\tau) d\tau \div \frac{1}{p^n} F(p). \quad (18)$$

Это свойство оператора значительно облегчает многие действия над дифференциальными уравнениями, позволяя свести их к действиям над алгебраическими уравнениями.

Если входную временную функцию преобразовать по Лапласу и отнести ее к выходной временной функции, также преобразованной по Лапласу, то получим так называемую передаточную функцию:

$$W(p) = W(j\omega) = \frac{F_{\text{вых}}(p)}{F_{\text{вх}}(p)} = \frac{a}{A} \exp(-j\varphi), \quad (19)$$

где  $a/A$  – отношение амплитуд колебаний выходного и входного сигналов;

$\varphi$  – отставание по фазе выходного сигнала по сравнению с входным.

Путем комбинации различных моделей возможно оценить передаточную функцию реального процесса. Для получения передаточной функции реального вентиляционного процесса составляют уравнение материального или теплового баланса,

выполняют его линеаризацию. Преобразуют полученное уравнение по Лапласу и находят отношение изображение выходного сигнала к входному.

## ВЫВОДЫ

Исследование статистических характеристик времени пребывания частиц в потоке перемешивания системы вентиляции предоставляет важные данные о эффективности и производительности вентиляционной системы. На основе проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Анализ среднего времени пребывания частиц в потоке позволяет оценить общую эффективность перемешивания. Большое среднее время пребывания может свидетельствовать о необходимости оптимизации системы вентиляции.

2. Распределение времени пребывания частиц в потоке может быть характеризовано дисперсией. Низкая дисперсия указывает на равномерное перемешивание, в то время как высокая дисперсия может свидетельствовать о неравномерном распределении частиц.

3. Идентификация выбросов и аномалий в данных о времени пребывания частиц позволяет выявить возможные неисправности в системе вентиляции, требующие дополнительного внимания и регулировки.

4. Исследование связи времени пребывания частиц с различными параметрами работы системы вентиляции (например, скорость вентилятора, конфигурация воздуховодов) может предоставить дополнительные возможности для оптимизации процессов вентиляции.

5. Статистические характеристики времени пребывания частиц в потоке систем вентиляции и перемешивания являются важными для понимания и оптимизации гидродинамических процессов в этих системах.

6. Использование математических моделей позволяет более точно описывать и контролировать эти процессы, что необходимо для обеспечения требуемых параметров воздушной среды в различных помещениях, особенно в помещениях с высокими требованиями к микроклимату помещений.

Для дальнейшего улучшения систем рекомендуется проводить дополнительные исследования с целью разработки более точных моделей и методик, учитывающих специфические особенности различных типов потоков и конфигураций систем.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамович Г.Н. Теория турбулентных струй / Г.Н. Абрамович. – М.: ЭКОЛИТ, 2011. – 720 с.
2. Ананьев В.А. Системы вентиляции и кондиционирования воздуха. Теория и практика/ В.А. Ананьев, Л.Н. Балуева и [др.]. – М.: Евроклимат, 2003. – 416 с.

3. Аэрогидромеханика / А.А. Коваленко, В.И. Соколов, Ю.И. Осенин и [др.]. – Луганск: Изд-во ВНУ им. В. Даля, 2009. – 516 с.

4. Гусенцова Я.А. Модели турбулентности в расчетах аэродинамических характеристик газовых потоков/ Я.А. Гусенцова, А.В. Красногрудов, М.М. Родыгина, Н.Д. Высоцкая // *Строительство и техногенная безопасность*. – 2024. – № 32(84). – с.47– 54. – DOI: 10.29039/2413-1873-2024-32-47-54.

5. Гусенцова Я.А. Моделирование характеристик вентиляционных систем техногенно-опасных объектов. Монография / Я.А. Гусенцова, А.В. Красногрудов, В.Ю. Малкин, М.М. Родыгина. – Луганск: Изд-во ЛГУ им. В. Даля, 2024. – 104 с. – ISBN 978-5-6051816-2-0.

6. Джонсон Н. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке /Н. Джонсон, Ф. Лион . – М.: Мир, 1981. – 616 с.

7. Посохин В.Н. Аэродинамика вентиляции / В.Н. Посохин. – М.: Информационно-издательское предприятие «АВОК-ПРЕСС», 2008 г. – 209 с. – ISBN: 978-5-98267-044-1.

8. Юевич Е.И. Теория автоматического управления / Е.И. Юевич. – Л.: Энергия, 1975. – 418 с.

9. Batchelor G.K. The Theory of Homogeneous Turbulence. Cambridge University Press, 1982. – 212 p.

10. King, M.-F. A methodology for the statistical analysis of the transport time to exposure in a room / M.-F. King, C.J. Noakes, P.M. Sleigh // *Journal of Hazardous Materials*. – 2022. – Vol. 423, Part B. – P. 127183.

11. Liu, S. Statistical characteristics of airborne particle transport in a ventilated space under unsteady conditions / S. Liu, M. Sandberg, M. Vesely // *Indoor Air*. – 2021. – Vol. 31, Issue 4. – P. 1123–1135.

12. Zhang, Z. Particle residence time and dispersion in a cross-ventilated model room / Z. Zhang, Q. Chen // *Building and Environment*. – 2020. – Vol. 168. – P. 106497.

## REFERENCES

1. Abramovich G.N. Teoriya turbulentny`x struj / G.N. Abramovich. – М.: E`KOLIT, 2011. – 720 s.

2. Anan`ev V.A. Sistemy` ventilyatsii i kondicionirovaniya vozduxa. Teoriya i praktika/ V.A. Anan`ev, L.N. Balueva i [dr.]. – М.: Evroklimat, 2003. – 416 s.

3. Ae`rogidromexanika / A.A. Kovalenko, V.I. Sokolov, Yu.I. Osenin i [dr.]. – Lugansk: Izd-vo VNU im. V. Dalya, 2009. – 516 s.

4. Gusenczova Ya.A. Modeli turbulentnosti v raschetax ae`roodinamicheskix karakteristik gazovy`x potokov/ Ya.A. Gusenczova, A.V. Krasnogradov, M.M. Rody`gina, N.D. Vy`soczka // *Stroitel`stvo i texnogennaya bezopasnost`*. – 2024. – № 32(84). – с.47 – 54. – DOI: 10.29039/2413-1873-2024-32-47-54.

5. Gusenczova Ya.A. Modelirovanie karakteristik ventilyacionny`x sistem texnogenno-opasny`x ob`ektov. Monografiya / Ya.A. Gusenczova, A.V. Krasnogradov, V.Yu. Malkin, M.M. Rody`gina. – Lugansk: Izd-vo LGU im. V. Dalya, 2024. – 104 s. – ISBN 978-5-6051816-2-0.

6. Dzhonson N. Statistika i planirovanie e`ksperimenta v texnike i nauke /N. Dzhonson, F. Lion . – М.: Mir, 1981. – 616 s.

7. Posoxin V.N. Ae`roodinamika ventilyatsii / V.N. Posoxin. – М.: Informacionno-izdatel`skoe predpriyatie «AVOK-PRESS», 2008 g. – 209 s. – ISBN: 978-5-98267-044-1.

8. Yurevich E.I. Teoriya avtomaticheskogo upravleniya / E.I. Yurevich. – L.: E`nergiya, 1975. – 418 s.  
 9. Batchelor G.K. The Theory of Homogeneous Turbulence. Cambridge University Press, 1982. – 212 p.  
 10. King, M.-F. A methodology for the statistical analysis of the transport time to exposure in a room / M.-F. King, C.J. Noakes, P.M. Sleight // Journal of Hazardous Materials. – 2022. – Vol. 423, Part B. – P. 127183.

11. Liu, S. Statistical characteristics of airborne particle transport in a ventilated space under unsteady conditions / S. Liu, M. Sandberg, M. Vesely // Indoor Air. – 2021. – Vol. 31, Issue 4. – P. 1123–1135  
 12. Zhang, Z. Particle residence time and dispersion in a cross-ventilated model room / Z. Zhang, Q. Chen // Building and Environment. – 2020. – Vol. 168. – P. 106497.

## ADDITIONAL PARTICLES IN A TURBULENT MIXING FLOW

Gusentsova Ya.A.<sup>1</sup>, Krasnogradov A.V.<sup>2</sup>, Rodygina M.M.<sup>3</sup>, Vysotskaya N.D.<sup>4</sup>

<sup>1, 2, 3</sup> Volodymyr Dahl Luhansk State University

291034, Luhansk People's Republic, Luhansk Urban District, Luhansk, Molodezhny Apartment 20A

<sup>4</sup> Vernadsky Crimean Federal University, Agrotechnological Academy

295492, Republic of Crimea, Simferopol, Agrarnoe Village

E-mail: <sup>1</sup>gusentsova@gmail.com, <sup>2</sup>krasnogradov@mail.ru, <sup>3</sup>sunsara\_06@mail.ru, <sup>4</sup>natali.v-v@mail.ru

**Abstract.** The article is dedicated to the analysis of particle residence time in ventilation systems. Residence time is understood as the duration of an individual particle or flow element's presence within the volume of a device or system from the moment of entry to the moment of exit. The study of this parameter is important for assessing the efficiency of air exchange, the uniformity of fresh air distribution, and the microclimate quality in a room.

Depending on the type of input impact, the following were obtained: a differential distribution function characterizing the proportion of particles whose residence time is close to a given value; and an integral residence time distribution function of a particle in the flow ( $C(\tau)$ ).

It is noted that the average residence time is a key calculation parameter, and for idealized flow models, it is determined as the ratio of the device volume to the volumetric flow rate. The flow structure in a ventilated room directly determines the distribution of particle residence time in the flow.

The analysis of residence time characteristics presented in the article allows for the evaluation of the efficiency of ventilation and air mixing systems.

Thus, the study of particle residence time is a powerful tool for diagnosing, designing, and optimizing ventilation systems aimed at creating a healthy and comfortable microclimate in rooms.

The obtained results can be useful for optimizing ventilation systems to enhance the efficiency of air mass mixing and improve indoor air quality. This can also have practical applications in ensuring safety and sanitation in buildings and premises with high demands on ventilation systems.

The subject of the research is the analysis of particle residence time in ventilation systems, which is important for assessing the efficiency of air exchange, the uniformity of fresh air distribution, and the microclimate quality in a room.

**Materials and Methods:** The study of particle residence time in ventilation systems involves the use of modeling, experimental, and data analysis methods to determine the relationships between various parameters.

**Results:** Based on the conducted research, an analysis of the average particle residence time in the flow was performed, and the distribution of particle residence time in the flow was determined.

The analysis of average particle residence time in the flow allows for the assessment of overall mixing efficiency. A long average residence time may indicate the need for ventilation system optimization.

The distribution of particle residence time in the flow is characterized by dispersion. Low dispersion indicates uniform mixing, while high dispersion may suggest uneven particle distribution.

The identification of outliers and anomalies in particle residence time data allows for the detection of potential malfunctions in the ventilation system that require additional attention and adjustment.

The statistical characteristics of particle residence time in the flow of ventilation and mixing systems are important for understanding and optimizing hydrodynamic processes within these systems.

**Conclusions:** The analysis of average particle residence time in the flow allows for the assessment of overall mixing efficiency. The distribution of particle residence time in the flow can be characterized by dispersion. The identification of outliers and anomalies in particle residence time data allows for the detection of potential malfunctions in the ventilation system. Investigating the relationship between particle residence time and various ventilation system operating parameters can provide additional opportunities for optimizing ventilation processes.

**Key words:** mixing ventilation, particle residence time in flow, statistical characteristics, input signal.