

УДК 534.84
OECD 01.03.AA

Генерирование аэродинамического шума воздушной прослойкой

Мурзинов В.Л.^{1*}, Мурзинов П.В.², Мурзинов Ю.В.³

¹Д.т.н., профессор кафедры «Техносферная и пожарная безопасность»

²к.т.н., заведующий лабораторией «Исследование акустических процессов»

³к.т.н., ведущий инженер лаборатории «Исследование акустических процессов»

^{1,2,3}Воронежский государственный технический университет,

г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84

Аннотация

Разработана модель потенциала скорости малых перемещений в воздушных потоках применительно к пневмоконвейерам. В качестве воздушных потоков рассмотрено течение воздуха в узком зазоре между параллельными плоскостями. На основании потенциала скорости малых перемещений получена инженерная формула для вычисления уровня шума, возникающего в воздушной прослойке. В работе рассмотрен фрагмент пневмоконвейера, использующего щелевые отверстия для питания воздушной прослойки.

Ключевые слова: шум аэродинамического происхождения, воздушная прослойка, волновое уравнение, турбулентность, турбулентная вязкость, гидродинамическое моделирование.

Generation of aerodynamic noise by airbag

Murzinov V.L.^{1}, Murzinov P.V.², Murzinov Yu.V.³*

¹*Doctor of technical Sciences, Professor of Technosphere and fire safety Department*

²*Candidate of technical Sciences, head of the laboratory "Research of acoustic processes"*

³*Candidate of technical Sciences, leading engineer of the laboratory "Research of acoustic processes"*

^{1,2,3}*Voronezh state technical University, Voronezh, Russia, St. 20-letia Oktyabrya, 84*

Abstract

A model of the velocity potential of small displacements in air flows in relation to pneumatic conveyors is developed. Air flow in a narrow gap between parallel planes is considered as air flow. On the basis of the velocity potential of small displacements, an engineering formula for calculating the noise level arising in the air layer is obtained. The paper considers a fragment of a pneumatic conveyor that uses slotted holes to feed the air layer.

Key words: noise of aerodynamic origin, air layer, wave equation, turbulence, turbulent viscosity, hydrodynamic modeling.

Введение

Современные производства в качестве транспортных средств используют пневмоконвейеры, которые транспортируют изделия на воздушной прослойке. Использование воздушной прослойки позволяет совмещать транспортные операции с технологическими операциями сушки, нагрева, охлаждения и т.д. В некоторых производствах пневмоконвейеры становятся незаменимыми. Однако, воздушная

*E-mail: dr.murzinov@yandex.ru (Мурзинов В.Л.)

прослойка является источником повышенного шума аэродинамического происхождения, порождаемого турбулентностью [1, 2].

С позиции защиты от шума существуют различные подходы и методики для защиты от аэродинамического шума [3-6]. Источником повышенного аэродинамического шума в пневмоконвейерах является турбулентность, которая носит случайный характер. Однако, для стабильных параметров работы пневмоконвейера шум, так же будет иметь стабильный уровень. Это положение объясняется эргодической гипотезой [7], что в воздушной прослойке появляются квазистационарные процессы турбулентности, от которых распространяются квазистационарные аэродинамические звуковые потоки.

Звуковые потоки в воздушной прослойке взаимодействуют с турбулентностью, влияют на неё, и создается многогранная картина, характеризующая физический процесс. При этом необходимо учитывать такие показатели, как степень турбулентности, акустические характеристики параллельных плоскостей, динамические параметры струйного течения, геометрические характеристики сопел и несущей поверхности пневмоконвейера. Турбулентность струйного течения в воздушной прослойке порождает акустические колебания, возникает шум аэродинамического происхождения, который направлен на боковые грани воздушной прослойки. Интенсивность звукового потока, определяющего уровень аэродинамического шума, находится в корреляционной связи с акустическими показателями воздушного потока. Изменение параметров пневмоконвейера приводит к изменению акустических показателей воздушной прослойки. Турбулентные потоки характеризуются такими показателями, как турбулентная вязкость и «путь перемешивания», являющийся геометрической характеристикой турбулентности [8].

Значение уровня аэродинамического шума можно определить, опираясь на эти показатели, но при этом необходимо учитывать динамические характеристики струйного течения в воздушной прослойке. Блохинцевым было получено неоднородное волновое уравнения, входящее в теоретический раздел классической акустики, применительно к потенциальному потоку звукопроводящей среды [9-11]. Поэтому возникает задача построения уравнения, но с учетом движения воздуха на основе классических уравнений механики жидкости [8]. При этом можно связать источники звука с основными параметрами, определяющими поток в воздушной прослойке и получить уравнения потенциала скорости малых перемещений, исходя из общих уравнений механики [10-13]. Построение уровня аэродинамического шума выполняется с учетом допущения, что влияние вязкости и теплопроводности отсутствует. Однако необходимо учесть наличие турбулентной вязкости и её влияния на генерирование, и распространение звукового потока.

1. Постановка задачи

Даны пространственные координаты изделия на воздушной прослойке, которая является источником аэродинамического шума. Рассматривается плоская задача.

На рис. 1 показана схема с изображением взаимного расположения источника аэродинамического шума и изделия.

Требуется построить аналитическую зависимость, связывающую уровень аэродинамического шума воздушной прослойки и параметров системы "воздушная прослойка – изделие". Задачей является определение с помощью аналитических методов потенциала скорости малых перемещений в воздушной прослойке с учетом её характеристик. На основании этого потенциала строится уравнение для определения уровня аэродинамического шума. Оригинальность задачи заключена в том, что рассматривается в качестве источника шума струйное течение воздуха в зазоре между

параллельными плоскостями.

2. Вывод основных соотношений

Рассмотрим фрагмент пневмоконвейера, содержащего щелевое отверстие и изделие на воздушной прослойке. Струйное течение в воздушной прослойке ограничивается параллельными плоскостями, между которыми создается слоистое течение. Это течение представляет собой сдвиговый поток. Осредненная скорость в струйном потоке определяется поперечной координатой. Кроме того струйное течение можно рассматривать как течение в канале.

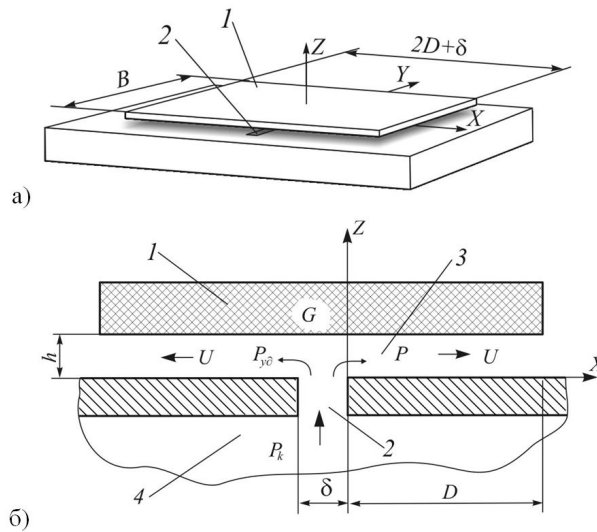


Рис. 1. Схема расположения изделия на воздушной подушке с указанием характерных размеров и положения осей координат: а) – аксонометрическое изображение схемы, б) – продольное сечение схемы. 1 – изделие, 2 – щелевое сопло, 3 – воздушная подушка, 4 – пневмокамера. G – вес изделия, Н; P – избыточное давления в воздушной прослойке, Па; U – скорость воздуха в прослойке под изделием, м/с; P_{yd} – среднее давление в воздушной прослойке, Па; P_k – давление в пневматической камере, Па; h – толщина воздушной прослойки, м.

Система уравнений для определения потенциала скорости малых перемещений применительно к течению воздуха в прослойке была построена с учетом методики, предложенной Блохинцевым Д.И. [7] в работах [1, 10] и имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left(U_{ok}^2 \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x_k \partial x_1} \right) - \frac{\partial U_{o1}}{\partial x_k} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} + c^2 \frac{\partial U_{o1}}{\partial x_k} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x_k^2} &= c^2 \frac{\partial U_{ok}}{\partial x_k} \frac{\partial U_{o1}}{\partial x_k} \\ \frac{\partial}{\partial t} \left(U_{ok}^2 \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x_k \partial x_2} \right) - \frac{\partial U_{o2}}{\partial x_k} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} + c^2 \frac{\partial U_{o2}}{\partial x_k} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x_k^2} &= c^2 \frac{\partial U_{ok}}{\partial x_k} \frac{\partial U_{o2}}{\partial x_k} \\ \frac{\partial}{\partial t} \left(U_{ok}^2 \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x_k \partial x_3} \right) - \frac{\partial U_{o3}}{\partial x_k} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} + c^2 \frac{\partial U_{o3}}{\partial x_k} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x_k^2} &= c^2 \frac{\partial U_{ok}}{\partial x_k} \frac{\partial U_{o3}}{\partial x_k} \end{aligned} \right\}. \quad (1)$$

В уравнении (1) используется индекс $k = 1,2,3$, по которому осуществляется суммирование; c – скорость звука, м/с.

Величины, входящие в уравнение (1) определяют скорость движения воздуха в

прослойке, а потенциал скорости малых перемещений имеет вид:

$$\Phi = \frac{1}{\rho_o} \int_0^t p d\tau$$

где ρ_o – плотность воздуха, кг/м³; p – давление, Па; t и τ – время, с.

Система уравнений (1) предназначена для определения потенциала скорости малых перемещений в процессе генерирования аэродинамического шума турбулентным воздушным потоком. Для решения этой системы необходимы граничные и начальные условия, а так же должны быть заданы осредненные скорости воздушного течения. Поэтому при рассмотрении конкретной физической задачи уравнение (1) будет упрощено и возможно будет получить аналитическое решение. Применительно к рассматриваемой задаче уравнение (1) упростится, так как рассматривается плоская задача течения струйного потока между параллельными плоскостями при наличии источника питания – щелевого отверстия. Расчетная схема для поставленной задачи показана на рис. 1. На схеме обозначены динамические и геометрические размеры основных элементов, изображены направления струйного течения. Применение уравнений неразрывности и уравнений Навье-Стокса позволили получить аэродинамические характеристики течения, которые показаны в табл. [1]

Таблица 1

Результаты решения аэродинамической задачи для течения в воздушной прослойке

1.	$\frac{\partial P}{\partial x} = -P_{y\partial} \frac{2}{D}$	3.	$U = \frac{1}{\mu D} P_{y\partial} (h - z) z$	5.	$h = \left[\frac{12\sqrt{2}\mu\delta D}{\sqrt{\rho_o P_{y\partial}}} \sqrt{\frac{(P_k - P_{y\partial})}{P_{y\partial}}} \right]^{1/3}$
2.	$P_{y\partial} = \frac{G}{B(\delta + D)}$	4.	$\frac{\partial U}{\partial z} = \frac{1}{\mu D} P_{y\partial} (h - 2z)$		

Для удобства дальнейших выкладок сделаем замену:

$$\left. \begin{aligned} U_{o1} &\equiv U & x_1 &\equiv x \\ U_{o2} &\equiv V & x_2 &\equiv y \\ U_{o3} &\equiv W & x_3 &\equiv z \end{aligned} \right\},$$

учитывая реальную картину физического процесса течения получим

$$\left. \begin{aligned} &\frac{\partial \Phi}{\partial x_2} = \frac{\partial \Phi}{\partial y} = 0 \\ V = 0 &\frac{\partial U_{o1}}{\partial x_1} = \frac{\partial U}{\partial x} = 0 \\ W = 0 &\frac{\partial U_{o1}}{\partial x_2} = \frac{\partial U}{\partial y} = 0 \end{aligned} \right\}. \quad (2)$$

Система (1) с учётом (2) примет вид:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left(U^2 \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} \right) - \frac{\partial U}{\partial z} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} + c^2 \frac{\partial U}{\partial z} \left(\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} \right) = 0 \\ \frac{\partial}{\partial t} \left(U^2 \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x \partial z} \right) = 0 \end{aligned} \right\}. \quad (3)$$

Окончательно получим уравнение для определения потенциала скорости малых перемещений применительно к рассматриваемой задаче

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(U^2 \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} \right) - \frac{\partial U}{\partial z} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} + c^2 \frac{\partial U}{\partial z} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} = 0, \quad (4)$$

удовлетворяющее следующим граничным и начальным условиям:

$$\Phi(0, z, t) = \Phi(L, z, t) = 0, \quad (5)$$

$$\Phi(x, z, 0) = E \sin \left(\frac{\pi x}{L} \right) \sin \left(\frac{\pi z}{h} \right), \quad (6)$$

$$\frac{\partial \Phi(x, z, 0)}{\partial t} = 0, \quad (7)$$

где $E = \left(\frac{\pi}{k} \right)^6 \frac{P_y \partial h^4}{\rho_0 L^3 c}$ амплитуда пульсаций турбулентных флюктуаций в воздушной прослойке, при этом учтен экспериментальный коэффициент $k = 0.46$. Умножая обе части уравнения (4) на $\exp(-pt)$ и интегрируя по t в интервале от 0 до ∞ и вводя замену $\int_0^\infty \Phi(x, z, t) \exp(-pt) dt = F(x, z, p)$, получаем уравнение

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x^2} \left(U^2 p + c^2 \frac{\partial U}{\partial z} \right) - \frac{\partial U}{\partial z} p^2 F + \left(\frac{\partial U}{\partial z} p + U^2 \frac{\pi^2}{L^2} \right) E \sin \left(\frac{\pi x}{L} \right) \sin \left(\frac{\pi z}{h} \right) = 0. \quad (8)$$

Решением уравнения (8) будет выражение

$$F = E \sin \left(\frac{\pi z}{h} \right) \sin \left(\frac{\pi x}{L} \right) \left[\frac{p}{p^2 + \frac{\pi^2 U^2}{L^2} \frac{\partial U}{\partial z} p + \frac{\pi^2}{L^2} c^2} + \frac{\frac{\pi^2 U^2}{L^2} \frac{\partial U}{\partial z}}{p^2 + \frac{\pi^2 U^2}{L^2} \frac{\partial U}{\partial z} p + \frac{\pi^2}{L^2} c^2} \right] \quad (9)$$

Выполнив обратное преобразование Лапласа $\Phi(x, z, t) = \frac{1}{2\pi i} \int_{s-i\infty}^{s+i\infty} F(x, z, p) e^{pt} dp$ для уравнения (9) получим потенциал скорости малых перемещений для рассматриваемой задачи

$$\Phi = E \sin \left(\frac{\pi z}{h} \right) \sin \left(\frac{\pi x}{L} \right) \exp(-A_1 t) \left[\cos(t A_1 A_2) + \frac{1}{A_2} \sin(t A_1 A_2) \right] \quad (10)$$

где $A_1 = \frac{\pi^2 U^2}{2L^2} \frac{\partial U}{\partial z}$, $A_2 = \sqrt{\frac{4c^2 L^2}{\pi^2 U^4} \left(\frac{\partial U}{\partial z} \right)^2 - 1}$.

В уравнение (10) входят величины U и $\frac{\partial U}{\partial z}$, значения которых вычислены в работе [1] и показаны в таблице, откуда $U = \frac{1}{\mu L} P_g (h - z) z$ и $\frac{\partial U}{\partial z} = \frac{1}{\mu L} P_g (h - 2z)$.

Вязкость μ , входящая в эти уравнения величина постоянная и не связанная с интенсивностью турбулентности и поэтому не связанная с уровнем аэродинамического шума. Однако можно сделать замену: использовать вместо обычной вязкости - турбулентную, принимая во внимание допущение, что порядок величин этих вязкостей одинаков. Тогда можно применить для моделирования характеристик турбулентных течений понятие «путь перемешивания», предложенный Прандтлем[8]. Длина «пути перемешивания» является функцией координаты z , т.е. $l = k \cdot z$, где k - экспериментальный коэффициент. Следовательно, можно определить турбулентную вязкость как функцию характеристик системы «пневмоконвейер – изделие» и записать [4]

$$\mu_T^2 = \rho_o k^2 P_{y\partial} L^{-1} z^2 (h - 2z). \quad (11)$$

Используя соотношения для аэродинамических характеристик воздушного потока в прослойке из таблицы можно преобразовать уравнение (10) к виду

$$\Phi = E \sin\left(\frac{\pi z}{h}\right) \sin\left(\frac{\pi x}{L}\right) \exp\left(-\frac{\pi^2 \sqrt{L P_{y\partial} h^3}}{2L^3 k \sqrt{\rho_o}} t\right) \left[\cos\left(\frac{\pi c}{L} t\right) + \frac{\pi \sqrt{P_{y\partial} h^3}}{2kc \sqrt{\rho_o L^3}} \sin\left(\frac{\pi c}{L} t\right) \right] \quad (12)$$

Уровень шума на расстоянии от источника определяется уравнением

$$L_z = 10 \lg \left(\frac{P_w}{I_o 4\pi R^2} \right), \quad (13)$$

где P_w – звуковая мощность, излучаемая воздушной прослойкой, Вт; I_o – исходное пороговое значение интенсивности звука, Вт/м². Мощность звукового потока, сформированного воздушной прослойкой будет

$$P_w = \int_0^h \int_0^L I_1 dx dz, I_1 = \frac{\bar{p}^2(x, z)}{\rho_o c} \quad (14)$$

где I_1 – интенсивность звукового потока воздушной прослойки, Вт/м²; h – толщина воздушной прослойки, м; L – линейный размер воздушной прослойки, м; \bar{p}^2 – среднеквадратическое отклонение давления от средней величины, (Н/м²)².

$$\bar{p}^2(x, z) = \frac{1}{T} \int_0^T \tilde{p}^2 dt, \tilde{p} = \rho_o \frac{\partial \Phi}{\partial t} \quad (15)$$

Теоретическое значение уровня шума воздушной прослойки определится из уравнения (13) при подстановке в него выражений (14) и (15).

$$L_z = 10 \lg \left[\frac{\rho_o}{I_o 4\pi c R^2} \int_0^h \int_0^L \left(\frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{\partial \Phi}{\partial t} \right)^2 dt \right) dx dz \right] \quad (16)$$

В уравнении (16) не определён временной показатель, который можно оценить, как время прохождения звуковой волны вдоль протяженности воздушной прослойки в виде $T = L/c$ и получим уравнение (16) в форме

$$L_z = 10 \lg \left[\frac{\rho_o E^2 \pi c}{64 I_o R^2 L} h \left(\frac{\pi^2 P_{y\partial}}{\rho_o L^3 k^2 c^2} h^3 + 2 \right) \right] \quad (17)$$

В уравнении (17) присутствует комплекс величин, который имеет размерность единица и его величина значительно меньше единицы $\frac{\pi^2 P_{y\partial}}{\rho_o L^3 k^2 c^2} h^3 \approx 10^{-6} \ll 1$ и тогда уравнение

(17), определяющее уровень шума воздушной прослойки, будет иметь вид

$$L_z = 10 \lg \left[\frac{\pi}{32} \left(\frac{\pi}{k} \right)^{12} \left(\frac{h}{L} \right)^7 (P_{y\theta})^2 \frac{h^2}{\rho_o c^2 I_o R^2} \right] \quad (18)$$

где I_o – пороговая интенсивность звукового потока, Вт/м².

Заклучение

Уравнение (18) можно использовать в инженерных расчетах для вычисления уровня шума пневмоконвейера на этапе его проектирования. Это уравнение содержит параметры, которые легко поддаются определению. В процессе проектирования транспортных систем на воздушной прослойке возникает необходимость определения теоретического уровня аэродинамического шума, который будет издавать проектируемая конструкция. Формула (18) позволяет оценить ориентировочно порядок величины этого шума. Для проверки адекватности формулы (18) были проведены экспериментальные исследования, которые показали удовлетворительную сходимость экспериментальных и теоретических значений.

Список литературы

1. Мурзинов В.Л. Снижение шума в устройствах транспортирования на воздушной подушке. Воронеж: Росинформресур, 2008. 196 с.
2. Мурзинов В.Л. Метод снижения аэродинамического шума в пневмоконвейерах [Текст] // Безопасность труда в промышленности. – 2007, №3. – С.54–58.
3. Murzinov V.L. Mathematical modeling of sound insulation for sound suppressing lightweight structured panels (SSLWSP) / V.L. Murzinov, P.V. Murzinov, Yu.V. Murzinov, V.I. Buyanov, V.A. Popov // International Journal of Engineering & Technology International. – 2018, N 7 (2.13) – Pp. 109-113. DOI: 10.14419/ijet.v7i2.13.11621.
4. Дроздова Л.Ф., Кудаев А.В., Куклин Д.А. Влияние шума компрессорных станций на окружающую среду // NOISE Theory and Practice – 2017 – Т.3, №2 – С. 38–43.
5. Murzinov V.L. Modeling of the sound absorption coefficient of sound-proof lightweight structured panels (SLSP) / V.L. Murzinov, P.V. Murzinov, Y.V. Murzinov // Journal of Fundamental and Applied Sciences. – 2017, N 9(7S). – Pp. 834-841. DOI: <http://dx.doi.org/10.4314/jfas.v9i7s.76>. ISSN 1112-9867.
6. Rousounelos A. Optimisation of the structural modes of automotive-type panels using line stiffeners and point masses to achieve weak acoustic radiation / Rousounelos A., Walsh S.J., Krylov V.V., Horner J.L. // Applied Acoustics. – 2015. Т. 93. – С. 23-37.
7. Ордынцев В.М. Математическое описание объектов автоматизации. М.: машиностроение, 1965. – 360 с.
8. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа: Уч.д/вузов–М.:Дрофа, 2003–840 с.
9. Блохинцев Д.И. Акустика неоднородной движущейся среды. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1981. 208 с.
10. Мунин А.Г., Кузнецов В.М., Леонтьев Е.А. Аэродинамические источники шума. М.: Машиностроение, 1981. 248 с.
11. Кузнецов В.М. Идентификация источников шума турбулентной струи // Акустический журнал, 2012. № 4. С. 498 – 508.
12. Мурзинов В.Л., Мурзинов П.В. Аэродинамический шум производственных транспортных систем на воздушной подушке // Безопасность труда в промышленности. – 2015, №10. – С.30–35.

13. Маков Ю.Н. Возможно ли проникновение импульса звукового удара от современного истребителя в водную среду и с его дальнейшим волновым распространением в этой среде? // *NOISE Theory and Practice*. – 2017. – Т. 4, № 1. – С. 18 – 29.

14. Vasilyev A.V. Experience of estimation and reduction of noise and vibration of industrial enterprises of Russia / Vasilyev A.V., Sannikov V.A., Tyurina N.V. // *Akustika*. 2019. Т. 32. С. 247-250.

15. Kholopov Yu. The comparative analysis of the noise characteristics of land rail transport and the efficiency of noise protection measures / Kholopov Yu., Musatkina B., Denisova I. // *Akustika*. 2019. Т. 32. С. 299-304.

References

1. Murzinov V.L. Noise Reduction in air cushion devices transportation. Voronezh: Rosinformresurs, 2008. 196 С.

2. Murzinov V.L. Method of reducing aerodynamic noise in pneumatic convoys // *Safety in industry*. – 2007, №3. – P. 54–58.

3. Murzinov V.L. Mathematical modeling of sound insulation for sound suppressing lightweight structured panels (SSLWSP) / V.L. Murzinov, P.V. Murzinov, Yu.V. Murzinov, V.I. Buyanov, V.A. Popov // *International Journal of Engineering & Technology International*. – 2018, N 7 (2.13) – Pp. 109-113. DOI: 10.14419/ijet.v7i2.13.11621.

4. L.F. Drozdova. The noise effects of compressor stations on the environment/L.F. Drozdova, A.V. Kudaev, D.A. Kuklin//*NOISE Theory and Practice–2017-Vol.3, No.2–P.38–43*.

5. Murzinov V.L. Modeling of the sound absorption coefficient of sound-proof lightweight structured panels (SLSP) / V.L. Murzinov, P.V. Murzinov, Y.V. Murzinov // *Journal of Fundamental and Applied Sciences*. – 2017, N 9(7S). – Pp. 834-841. Doi: <http://dx.doi.org/10.4314/jfas.v9i7s.76>. ISSN 1112-9867.

6. Rousounelos A. Optimisation of the structural modes of automotive-type panels using line stiffeners and point masses to achieve weak acoustic radiation / Rousounelos A., Walsh S.J., Krylov V.V., Horner J.L. // *Applied Acoustics*. – 2015. Т. 93. – С. 23-37.

7. Ordyn'tsev V.M. Mathematical description of automation objects. M: Mechanical engineering, 1965. – 360 p.

8. Loitsyansky L.G. Fluid Mechanics: Studies for universities.–M.:Drofa, 2003 – 840 p.

9. Blokhintsev D.I. Acoustics of inhomogeneous moving medium. M.: Science. Home edition of physical and mathematical literature, 1981. 208.

10. Munin A.G., Kuznetsov V. M., Leontiev E. A. Aerodynamic noise sources. Moscow: Mashinostroenie, 1981. 248 p.

11. Kuznetsov V.M. Identification of turbulent jet noise sources // *Acoustic journal*, 2012. No. 4. S. 498 – 508.

12. Murzinov V.L., Murzinov P.V. Aerodynamic noise production of transport systems on the airbag // *Safety in industry*. – 2015, No. 10. P. 30 – 35.

13. Makov Yu. N. Is it Possible to penetrate the pulse of a sonic boom from a modern fighter into the water environment and with its further wave propagation in this environment? // *NOISE Theory and Practice*. – 2017. - Vol. 4, No. 1. – P. 18 – 29.

14. Vasilyev A.V. Experience of estimation and reduction of noise and vibration of industrial enterprises of Russia / Vasilyev A.V., Sannikov V.A., Tyurina N.V. // *Akustika*. 2019. Т. 32. С. 247-250.

15. Kholopov Yu. The comparative analysis of the noise characteristics of land rail transport and the efficiency of noise protection measures / Kholopov Yu., Musatkina B., Denisova I. // *Akustika*. 2019. Т. 32. С. 299-304.