



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-4-88-95>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.762.2

ОЧИСТКА ВОЗДУХА В ЗАКРЫТЫХ ПОМЕЩЕНИЯХ ОТ ВЫСОКОДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ И АЭРОЗОЛЕЙ

Л.П. ПИЛИНЕВИЧ, М.В. ТУМИЛОВИЧ, Д.М. РУМЯНЦЕВ, К.В. ГРИБ, А.Г. БУНАС

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)*

Поступила в редакцию 18 января 2022

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2022

Аннотация. В результате производственной деятельности предприятий реального сектора экономики во многих случаях происходит образование высокодисперсных частиц и аэрозолей, что требует последующего отделения данных тонких частиц из газопылевого потока. Особенно актуальна данная проблема очистки, например, для производств порошкообразных пигментов и наполнителей и полимеров, технического углерода, химических средств защиты растений, извести и цемента, пылевидного кварца и асбеста, а также при плавке цветных и редких металлов. По заключению врачей высокодисперсные частицы, проникая в альвеолы легких, вызывают различные профессиональные заболевания рабочих горнорудной, угольной, машиностроительной промышленности – пневмокониозы, характеризующиеся развитием диффузного фиброза легочной ткани. Так, высокодисперсная пыль диоксида кремния вызывает у работающих развитие одной из тяжелых форм пневмокониоза – силикоз, а высокодисперсная пыль бериллия вызывает другое тяжелое заболевание – бериллиоз. Для решения проблемы очистки воздуха от высокодисперсных частиц и аэрозолей используются самые различные физические силы и средства: гравитационные, инерционные, капиллярные, центробежные и электрические силы, а также фильтрующие материалы на органической и неорганической основе с заданными фильтровальными характеристиками. Для обеспечения повышения эффективности очистки воздуха в закрытых помещениях от высокодисперсных частиц и аэрозолей, которые наносят наибольший вред здоровью, в данной работе предложено использовать электростатические фильтры, обеспечивающие фильтрацию в электрическом поле через высокопористые ячеистые материалы. В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований определены параметры процесса очистки и конструктивные параметры электростатического фильтра, обеспечивающие высокие производительность процесса и степень очистки.

Ключевые слова: фильтрация, очистка, электростатический фильтр, тонкость очистки, высокодисперсные частицы, аэрозоли.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Пилиневич Л.П., Тумилович М.В., Румянцев Д.М., Гриб К.В., Бунас А.Г. Очистка воздуха в закрытых помещениях от высокодисперсных частиц и аэрозолей. Доклады БГУИР. 2022; 20(4): 88-95.

CLEANING OF INDOOR AIR FROM HIGHLY DISPERSED PARTICLES AND AEROSOLS

LEANID P. PILINIVICH, MIRASLAU V. TUMILOVICH, DMITRIY M. RUMIANTSAV,
KANSTANTIN V. HRYB, ANDREI G. BUNAS

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 18 January 2022

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2022

Abstract. The production activity of many industries is associated with the release of highly dispersed particles and aerosols, as well as the subsequent capture of fine particles. Such processes take place, for example, in the production of fillers and polymers, powdered pigments and chemicals, carbon black, plant protection chemicals, lime and cement, pulverized quartz and asbestos, in the melting of non-ferrous and rare metals. According to doctors, highly dispersed particles, penetrating into the alveoli of the lungs, cause various occupational diseases of workers in the mining, coal, machine-building industries – pneumoconiosis. For example, when working in the environment containing silicon dioxide dust, workers develop one of the severe forms of pneumoconiosis – silicosis, and exposure to beryllium dust causes a very serious disease – berylliosis. To purify air and other gases from mechanical impurities, a variety of physical forces and means are used: gravitational forces, inertial forces, centrifugal forces, electric interaction forces of charged particles, capillary forces, as well as filter partitions with the appropriate pore size. To solve the problem of cleaning indoor air from highly dispersed particles and aerosols that cause the greatest harm to health, in this paper it is proposed to use electrostatic filters that provide filtration in an electric field through highly porous cellular materials. As a result of the theoretical and experimental studies, the parameters of the cleaning process and the design parameters of the electrostatic filter were determined, ensuring high process performance and the degree of purification.

Keywords: filtration, cleaning, electrostatic filter, fineness of cleaning, highly dispersed particles, aerosols.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Pilinevich L.P., Tumilovich M.V., Rumyantsev D.M., Grib K.V., Bunas A.G. Cleaning of Indoor Air from Highly Dispersed Particles and Aerosols. Doklady BGUIR. 2022; 20(4): 88-95.

Введение

Многие процессы трудовой деятельности человека сопровождаются образованием вредных высокодисперсных частиц в виде газообразных аэрозолей (дым, туман), которые вызывают заболевания органов дыхания, зрения, кожного покрова и внутренних органов человека. В связи с этим особую актуальность приобретает проблема очистки газопылевых потоков от вредных примесей, например, при производстве порошкообразных пигментов и химикатов, наполнителей и полимеров, технического углерода, химических средств защиты растений, извести и цемента, пылевидного кварца и асбеста, а также при плавке цветных и редких металлов, проведении сварочных работ, проведении огневой подготовки личного состава и др. [1]. Необходимо также отметить, что большую опасность для жизни представляют техногенные катастрофы, различного рода пожары и взрывы, всегда сопровождающиеся выделением вредных веществ, которые при попадании в организм человека вызывают различного рода отравления, в том числе и со смертельным исходом. По данным, опубликованным Международной организацией труда (МОТ) (Official bulletin. Series B / International Labour Office. Geneva : ILO, 2019), ежегодно из-за несчастных случаев на производстве и связанных с работой заболеваний гибнут 2,78 млн работников (из них 2,4 млн – из-за заболеваний).

Сегодня предъявляются высокие требования к очистке воздуха в помещениях, загрязненного в результате трудовой деятельности человека. Необходимо не только обеспечить очистку помещений от вредных веществ, но и произвести сам процесс очистки за максимально короткий промежуток времени. В связи с этим разработана конструкция устройств для очистки воздуха

в закрытых помещениях от высокодисперсных частиц и частиц аэрозолей, которые будут обладать одновременно высокой степенью очистки и высокой производительностью, является актуальной задачей, имеющей большое практическое значение.

Проведенный анализ информационных источников, посвященных методам и способам очистки помещений от высокодисперсных вредных веществ [2–6], показал, что одним из наиболее перспективных методов очистки является метод электростатического осаждения в электрофильтрах. Цель настоящей работы – исследовать процесс очистки воздуха в помещениях от высокодисперсных частиц и аэрозолей с помощью электростатических сил.

Теоретический анализ

Теоретические и экспериментальные исследования процесса очистки от высокодисперсных частиц [6, 7] показали, что степень очистки воздушной среды зависит от большого числа факторов. Необходимо отметить, что начало теории фильтрации положено французскими инженерами Дарси (1856 г.) и Дюпюи (1848–1863 гг.), которые провели экспериментальные исследования процесса фильтрации воды через трубы, заполненные песком. Именем Дарси назван линейный закон фильтрации, который он установил в результате экспериментальных исследований:

$$Q = k_{\phi} \frac{\Delta P}{H} S, \quad (1)$$

где Q – объемный расход жидкости через песчаный фильтр, высота которого H , а площадь поперечного сечения S ; ΔP – разность давлений воды перед фильтром и после; k_{ϕ} – коэффициент фильтрации.

Закон Дарси можно применять не только для расчетов, связанных с фильтрацией воды, но и для других жидких и газообразных сред. Формула для расчета имеет следующий вид:

$$Q = \frac{k}{\mu} \frac{\Delta P}{H} S, \quad (2)$$

где μ – динамический коэффициент вязкости; k – коэффициент проницаемости, который не зависит от свойств жидкости и является динамической характеристикой только пористой среды.

Эффективность процессов очистки (фильтрации) определяется гидродинамическими режимами, характеристиками фильтрующих материалов и устройств, а также характеристиками внешних воздействий.

Осаждение частиц загрязнителя воздушной среды в устройствах очистки может происходить под действием инерционных и гравитационных сил, броуновской диффузии, электрического притяжения и др.

Степень очистки η можно представить как функцию следующих величин:

$$\eta = f(St_k R, G', D_{\phi} K_s), \quad (3)$$

где St_k , R , G' , D_{ϕ} , K_s – безразмерные параметры осаждения за счет эффектов инерции, касания, гравитации, диффузии и электрических сил соответственно. Инерционное осаждение вызвано отклонением траектории движения частиц загрязнителя под действием сил инерции от линии фильтруемого потока жидкости или газа.

Вероятность столкновения частиц загрязнителя с поровой стенкой перегородки определяется параметром инерционного осаждения, характеризующимся критерием Стокса:

$$St_k = \frac{V^2 S_0^2 \rho C}{18 \mu d_n}, \quad (4)$$

где C – поправка Кенингема; S_0 – условный диаметр частицы загрязнителя; ρ – плотность фильтруемой среды; d_n – диаметр поры фильтрующего материала; V – скорость потока; μ – динамическая вязкость.

Осаждение частиц за счет механизма касания проявляется при движении частиц по траектории, строго совпадающей с линиями потока. Улавливание частиц осуществляется

только за счет непосредственно зацепления. Определяющим параметром эффекта касания R является отношение размера частицы загрязнителя S к диаметру поры d_n :

$$R = \frac{S}{d_n}. \quad (5)$$

Наибольшая вероятность захвата частиц за счет механизма касания наблюдается при вязком течении, когда влияние сил инерции невелико (число Рейнольдса $Re < 0,5$).

Для газовых потоков эффективность захвата частиц за счет механизма касания η_k можно оценить выражением, предложенным авторами работы [4]:

$$\eta_k = R^2 \left(\frac{d_n V \rho}{\mu} \right)^{0,625}. \quad (6)$$

Гравитационное осаждение частиц заметно проявляется при малых скоростях потока и при горизонтальном течении жидкости или газа через пористые перегородки. Параметр осаждения частиц за счет гравитационных сил может быть определен из выражения

$$G' = \frac{St_k}{2F_r}, \quad (7)$$

где $F_r = \frac{V^2}{2gd_n}$ – критерий Фруда.

За счет броуновской диффузии главным образом осаждаются частицы размером менее 5 мкм при малых скоростях движения; данный механизм осаждения в основном проявляется при очистке газов. Уравнение для коэффициента диффузии D_ϕ , полученное Эйнштейном, имеет вид

$$D_\phi = \frac{K_B T C}{3\pi S_0 \mu}, \quad (8)$$

где K_B – константа Больцмана, T – абсолютная температура.

Наиболее существенное воздействие на процесс улавливания высокодисперсных частиц оказывают электростатические силы, однако в общем виде эта задача пока не решена в связи со сложностью учета структуры фильтрующих материалов и огромным разнообразием условий фильтрации, конкретной газообразной среды, содержащей высокодисперсные частицы загрязнителя. Поэтому необходимо проведение дополнительных экспериментальных исследований.

Результаты работы и их обсуждение

Как было отмечено выше, наиболее высокую эффективность очистки воздуха от высокодисперсных частиц из газовых потоков обеспечивают электростатические фильтры различных типов. Основным механизмом очистки от высокодисперсных частиц является их осаждение на осадительных электродах. Для экспериментального исследования процесса осаждения высокодисперсных частиц на электродах под воздействием электрического поля, разработан и изготовлен экспериментальный образец двухзонного электростатического фильтра, состоящий из зоны осаждения и зоны зарядки.

Экспериментальный образец электростатического фильтра содержит следующие основные элементы: корпус; высоковольтный блок питания с регулятором величины напряжения; датчики контроля напряжения и тока; коронирующие и осадительные электроды; систему крепления осадительных и коронирующих электродов, позволяющую закреплять и менять электроды, имеющие различную площадь поверхности; систему подвода, распределения и отвода очищаемых газов. Согласно работе [1], наиболее высокую тонкость очистки обеспечивают электростатические фильтры, у которых осадительные электроды выполнены из высокопористого материала с ячеистой структурой. Поэтому экспериментальные исследования проводились с использованием осадительных электродов, выполненных из высокопористого ячеистого материала на основе никеля, имеющего пористость до 98 % (рис. 1).

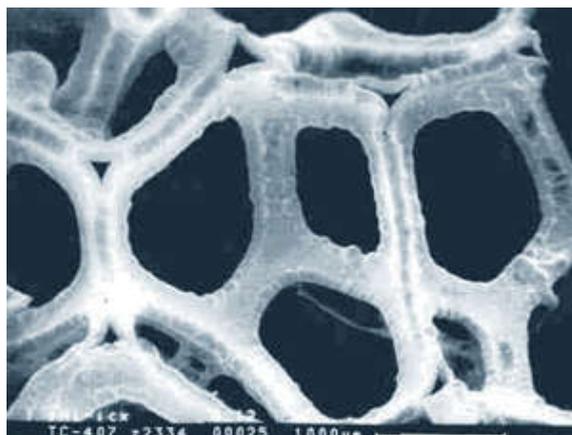


Рис. 1. Фрактограмма высокопористого ячеистого материала
Fig. 1. Fractogram of highly porous cellular material

Экспериментальные исследования гидравлических характеристик, тонкости очистки электростатического фильтра проводили с помощью стенда для определения эксплуатационных характеристик фильтрующих устройств.

Принцип работы стенда состоит в следующем, через исследуемое фильтрующее устройство, установленное и герметично закрепленное в специальной оснастке, вентилятором подается воздух. Одновременно с помощью датчика расхода газа измеряется расход воздуха через исследуемое устройство, а также с помощью датчика давления соответствующий ему перепад давления на фильтрующем устройстве. Установка определенной величины расхода осуществляется регулируемыми дросселями. Для определения тонкости очистки перед оснасткой с фильтрующим устройством устанавливается распылитель с мелкодисперсным порошком загрязнителя. В качестве модельных высокодисперсных частиц загрязнителя выбраны высокодисперсные порошки оксида алюминия Al_2O_3 , состоящие из частиц диаметром от 0,02 до 2 мкм.

Подсчет количества частиц загрязнителя по размерам осуществляли при помощи лазерного спектрометра LAS-01(250X) фирмы «PMS, Inc» (США).

Экспериментальные исследования проводили следующим образом. Вначале определяли гранулометрический состав и количество инородных частиц в воздухе без загрязнителя, полученные результаты заносили в таблицу. Испытываемое фильтрующее устройство помещали и герметично закрепляли в специальной оснастке, потом включали вентилятор. Затем с помощью регулируемого дросселя устанавливали заданный расход воздуха и фиксировали перепад давления на исследуемом устройстве. Измерения повторяли при нескольких перепадах давления или расходах на фильтрующем устройстве. Полученные данные заносили в таблицу. Затем в генератор аэрозолей засыпали мелкодисперсный загрязнитель (Al_2O_3) и с помощью спектрометра определяли гранулометрический состав и количество частиц загрязнителя, прошедшего через испытываемое устройство очистки воздуха при тех же значениях перепада и расхода воздуха, что и без мелкодисперсного загрязнителя.

Абсолютную тонкость очистки A определяли по максимальному размеру частиц, прошедших через устройство для очистки.

Удельное содержание m частиц загрязнителя в воздухе, проходящем через электрофильтр, определяли как массу M частиц загрязнителя, поступающих в электрофильтр в единицу времени при расходе воздуха Q , т. е.

$$m = \frac{M}{Q} \quad (9)$$

Степень очистки электрофильтра в процентах определяется как отношение массы осажденных частиц в электрофильтре M_2 к массе частиц, поступивших в электрофильтр M_1 :

$$\frac{M_2}{M_1} \cdot 100 \% \quad (10)$$

С целью определения влияния количества осадительных электродов N , их площади S , величины напряжения и величины зазора H между ними, напряжения питания U , толщины электрода L на процесс осаждения высокодисперсных частиц и эксплуатационные характеристики электрофильтра (абсолютную тонкость и степень очистки), исследовали его экспериментальный образец с одним, двумя и четырьмя осадительными электродами, выполненными в виде дисков с размером ячейки 4–5 мм, толщиной 10 и 23 мм, площадью поверхности 100 и 200 см².

Для исследования влияния величины зазора между осадительными электродами на абсолютную тонкость очистки в экспериментальном образце электрофильтра, расстояние между осадительными электродами изменяли от 3,4 до 20 мм. Результаты проведенных экспериментальных исследований образцов электростатических фильтров, их гидравлические и эксплуатационные характеристики представлены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры экспериментальных образцов электрофильтра и результаты исследований их характеристик

Table 1. Parameters of experimental samples of the electrofilter and the results of studies of their characteristics

№ обр.	Параметры образца				Толщина электрода L , мм	Гидравлические характеристики		Эксплуатационные характеристики	
	S , см ²	H , мм	N , шт.	U , кВ		Q , м ³ /ч	ΔP , с фильтро-элементом, Па	Степень очистки, %	Абс. тонкость очистки, мкм
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
						150 270	Перепад давления без фильтро-элементов 10 19	Размер частиц аэрозоли (пыли) в воздухе помещения 1 – 14 мкм	
1	100	3,4	1	5	10	150	340	99,4	0,1
2	100	3,4	1	5	10	270	500	99,2	0,1
3	200	3,4	2	5	10	150	680	99,5	0,1
4	200	3,4	2	5	10	270	1000	99,4	0,1
5	200	3,4	2	3	10	150	680	99,4	0,15
6	200	3,4	1	5	23	150	680	99,5	0,15
7	400	3,4	2	5	23	150	1200	99,6	0,1
8	400	3,4	2	5	23	270	2000	99,5	0,1
9	600	3,4	3	5	10	150	2100	99,6	0,08
10	300	3,4	3	5	10	150	1200	99,5	0,09
11	400	3,4	4	5	10	150	2500	99,7	0,08
12	800	3,4	4	5	23	150	4950	99,9	0,055
13	800	3,4	4	3,5	23	150	4950	99,7	0,06
14	800	10	4	5	23	150	4960	99,8	0,06
15	800	20	4	5	23	150	4970	99,8	0,06
16	800	3,4	4	5	23	270	8559	99,8	0,06
17	800	10	4	5	23	270	8559	99,8	0,06
18	800	20	4	5	23	270	8580	99,8	0,06
19	800	20	4	3,5	23	270	8580	99,75	0,065

Анализ результатов экспериментальных исследований, представленных в таблице, позволяет сделать следующие выводы:

1. Увеличение количества высокопористых осадительных электродов от 1 до 4 позволяет повысить степень и абсолютную тонкость очистки (см. образец № 12).

2. Уменьшение величины зазора между осадительными электродами приводит к увеличению степени очистки с одновременным увеличением абсолютной тонкости очистки.

3. Увеличение производительности очистки приводит к уменьшению степени и абсолютной тонкости очистки. Поэтому для обеспечения необходимых тонкости и производительности процесса очистки помещений от высокодисперсных частиц и аэрозолей целесообразно увеличивать количество электростатических фильтров.

Заключение

Приведенные в данной работе результаты теоретических и экспериментальных исследований, выполненных известными исследователями и авторами, позволяют сделать вывод, что электростатические силы оказывают значительное влияние на повышение степени очистки газопылевых потоков от высокодисперсных частиц и аэрозолей с размером частиц менее 0,5 мкм, и в частности от наиболее трудноулавливаемых частиц с размером около 0,3 мкм. Показано, что наибольшая степень очистки достигается в случае прохождения заряженных частиц сквозь заряженные осадительные электроды. Показано, что степень очистки увеличивается с повышением величины заряда частиц и осадительных электродов, а также с уменьшением скорости потока, что, однако, снижает производительность процесса очистки. В связи с этим важной и актуальной проблемой является увеличение производительности при сохранении высокой степени очистки от высокодисперсных частиц и аэрозолей. Для этих целей в качестве осадительных электродов предложено использовать высокопористые ячеистые материалы на металлической основе, имеющие пористость до 98 % при размере ячейки 0,5–2 мм, которые получают методом электролитического осаждения металлов (никель, медь) на высокопористый ячеистый пенополиуретан.

Список литературы

1. Тумилович В.В., Пилиневич Л.П., Савич В.В. *Пористые порошковые материалы и изделия на их основе для защиты здоровья человека и охраны окружающей среды: получение, свойства, применение*. Минск: Беларус. наука; 2010.
2. Shaddon R.W.L. Electrically enhanced collection of reparable aerosols in granular bed filters at low Reynolds numbe. *IEEE Trans. Ind. appl.* 1985;21(2):501-506.
3. Wang C. *Dust collection by particle inertia and electrical forces*. Powder Techn. Pap. Int. Symp. Kyoto; 1981.
4. Мазус М.Г., Малыгин А.Д., Моргулес М.Л. *Фильтры для улавливания промышленных пылей*. Москва: Машиностроение; 1985.
5. Двухименный В.А., Столяров Б.М., Черный С.С. *Системы очистки воздуха от аэрозольных частиц на АЭС*. Москва: Энергоиздат; 1987.
6. Галкин А.Е., Тумилович М.В., Пилиневич Л.П. Эффективность фильтрации аэрозолей в условиях действия электрических сил в зависимости от скорости потока. *Материалы. Технологии. Инструменты*. 2010;15(2):78-84.
7. Пилиневич Л.П., Мазюк В.В., Рак А.Л. *Пористые порошковые материалы с анизотропной структурой для фильтрации жидкостей и газов*. Минск: ОДО «Томпик»; 2005.

References

1. Tumilovich V.V., Pilinevich L.P., Savich V.V. [*Porous powder materials and products based on them for the protection of human health and environmental protection: preparation, properties, application*]. Minsk: Belarus. Science; 2010. (In Russ.)
2. Shaddon R.W.L. Electrically enhanced collection of reparable aerosols in granular bed filters at low Reynolds numbe. *IEEE Trans. Ind. appl.* 1985;21(2):501-506.
3. Wang C. *Dust collection by particle inertia and electrical forces*. Powder Techn. Pap. Int. Symp. Kyoto; 1981.
4. Mazus M.G., Malygin A.D., Morgulis M.L. [*Filters for capturing industrial dust*]. Moscow: Mashinostroenie; 1985. (In Russ.)
5. Dvukhimenny V.A., Stolyarov B.M., Cherny S.S. [*Air purification systems from aerosol particles at nuclear power plants*]. Moscow: Energoizdat; 1987. (In Russ.)
6. Galkin A.E., Tumilovich M.V., Pilinevich L.P. [Filtration efficiency of aerosols under the action of electric forces depending on the flow rate]. *Materials. Technologies. Tools. = Materialy. Tekhnologii. Instrumenty*. 2010;15(2):78-84. (In Russ.)
7. Pilinevich L.P., Mazyuk V.V., Rak A.L. [*Porous powder materials with anisotropic structure for filtration of liquids and gases*]. Minsk: ODO "Tompik"; 2005. (In Russ.)

Вклад авторов

Пилиневич Л.П. провел теоретический анализ исследуемой проблемы.

Тумилович М.В. сформулировал цель и задачи исследований, разработал схему стенда для определения эксплуатационных характеристик фильтрующих устройств, подготовил введение, заключение, провел анализ полученных результатов.

Румянцев Д.М. Гриб К.В. и Бунас А.Г. провели экспериментальные исследования влияния параметров фильтрации и фильтрующих элементов на эксплуатационные характеристики устройств.

Authors' contribution

Pilinevich L.P. carried out a theoretical analysis of the problem under study.

Tumilovich M.V. formulated the purpose and objectives of the research, developed a scheme of the stand for determining the operational characteristics of filtering devices, wrote an introduction, conclusion, and analyzed the results obtained.

Rumyantsev D.M. Grib K.V. and Bunas A.G. conducted experimental studies of the influence of filtration parameters and filter elements on the operational characteristics of devices.

Сведения об авторах

Пилиневич Л.П., д.т.н., профессор, профессор кафедры инженерной психологии и эргономики Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Тумилович М.В., д.т.н., доцент, начальник управления подготовки научных кадров высшей квалификации Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Румянцев Д.М., аспирант кафедры инженерной психологии и эргономики Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Гриб К.В., аспирант кафедры инженерной психологии и эргономики Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Бунас А.Г., аспирант-соискатель кафедры инженерной психологии и эргономики Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники..

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники;
тел.+375-17-293-88-83;
e-mail: tumilovich@bsuir.by
Тумилович Мирослав Викторович

Information about the authors

Pilinevich L.P., Dr. of Sci. (Tech.), Professor, Professor at the Department of Engineering Psychology and of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Tumilovich M.V., Dr. of Sci. (Tech.), Associate Professor, Dr. of Sci., Associate Professor, Head of the Department of Highest Qualification Scientific Personnel Training of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Rumiantsev D.M., Postgraduate at the Department of Engineering Psychology and Ergonomics of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Hryb K.V., Postgraduate at the Department of Engineering Psychology and Ergonomics of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Bunas A.G., Postgraduate Candidate at the Department of Engineering Psychology and Ergonomics of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka St., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics;
tel. +375-17-293-88-83;
e-mail: tumilovich@bsuir.by
Tumilovich Miraslau Viktoravich