



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-4-5-12>

*Оригинальная статья*  
*Original paper*

УДК 621.762.2

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ ИЗ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ ДЛЯ ТЕПЛОВЫХ ТРУБ

Л.П. ПИЛИНЕВИЧ<sup>1</sup>, М.В. ТУМИЛОВИЧ<sup>1</sup>, А.Г. КРАВЦОВ<sup>2</sup>, Д.М. РУМЯНЦЕВ<sup>1</sup>, К.В. ГРИБ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
(г. Минск, Республика Беларусь)*

<sup>2</sup>*Отделение физико-технических наук Президиума Национальной академии наук Беларуси  
(г. Минск, Республика Беларусь)*

*Поступила в редакцию 9 сентября 2020*

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2021

**Аннотация.** Тепловые трубы предназначены для эффективного отвода тепла от нагреваемых элементов и позволяют снижать температуру различных приборов. Тепловые трубы с капиллярными пористыми структурами предназначены для работы в условиях неблагоприятного действия сил тяжести. Основными их достоинствами являются высокая теплопередающая способность, а также способность удержания теплоносителя в капиллярно-пористой структуре при динамических силовых нагрузках. Цель работы – исследование процесса получения капиллярно-пористых материалов из металлических порошков для тепловых труб с повышенной эффективностью с использованием метода вибрационного формования. В статье обоснована актуальность создания тепловых труб из металлических порошков, приведены сведения о влиянии краевого угла смачивания, поверхностного натяжения и капиллярного давления на теплопередающую способность тепловой трубы. Показано, что для эффективной работы тепловой трубы необходимо создать такую капиллярную структуру пористого материала, которая одновременно могла бы обеспечить высокую скорость движения теплоносителя и его подъем на заданную высоту. Удовлетворить вышеуказанные требования возможно созданием капиллярной структуры методами порошковой металлургии путем оптимизации распределения размеров пор. При этом наиболее перспективным представляется способ формования при наложении на форму с порошком вибрационных колебаний. Получить необходимое порораспределение данным способом можно путем правильного выбора размеров частиц, формы, а также параметров вибрации. Это позволяет обеспечить заданную укладку частиц по размерам, определяющую плотность их укладки, размер пор, извилистость и длину поровых каналов. Исследовано распределение максимальных размеров пор по толщине образцов, полученных из порошков различного гранулометрического состава с применением вибрации. В результате разработан процесс получения капиллярных структур методом вибрационного формования металлических порошков в зависимости от размеров частиц порошка, амплитуды и частоты вибрации. Показано, что данным методом можно обеспечить заданное порораспределение капиллярной структуры для тепловых труб, что позволяет повысить их теплопередающую способность.

**Ключевые слова:** тепловая труба, капиллярная структура, теплопередающая способность, вибрационное формование, параметры вибрации, размеры пор.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования.** Пилиневич Л.П., Тумилович М.В., Кравцов А.Г., Румянцев Д.М., Гриб К.В. Исследование процесса получения капиллярно-пористых материалов из металлических порошков для тепловых труб. Доклады БГУИР. 2021; 19(4): 5-12.

## RESEARCH OF THE PROCESS OF OBTAINING CAPILLARY-POROUS MATERIALS FROM METAL POWDERS FOR HEAT PIPES

LEANID P. PILINIVICH<sup>1</sup>, MIRASLAU V. TUMILOVICH<sup>1</sup>, ALIAKSANDAR G. KRAVTSOV<sup>2</sup>,  
DMITRIY M. RUMIANTSAV<sup>1</sup>, KANSTANTIN V. HRYB<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)*

<sup>2</sup>*Technical Department of Sciences of the Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus  
(Minsk, Republic of Belarus)*

*Submitted 9 September 2020*

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2021

**Abstract.** Heat pipes are designed to effectively remove heat from heating elements and reduce the temperature of various devices. Heat pipes with capillary porous structures are designed to operate under conditions of unfavorable gravity forces. Their main advantages are their high heat transfer capacity, as well as the ability to retain the coolant in a capillary-porous structure under dynamic power loads. The purpose of this work is to study the process of obtaining capillary-porous materials from metal powders for heat pipes with increased efficiency of using the vibration molding method. The article substantiates the relevance of creating heat pipes from metal powders. The information about the influence of the contact angle, surface tension and capillary pressure on the heat transfer capacity of a heat pipe is provided. It is shown that for the efficient operation of the heat pipe it is necessary to create such a capillary structure of the porous material, which could simultaneously provide a high speed of movement of the coolant and its rise to a given height. The above requirements can be satisfied by creating a capillary structure using powder metallurgy methods by optimizing the distribution of pore sizes. In this case, the most promising method seems to be the method of molding when applying a vibration to a mold with a powder. It is possible to obtain the required pore distribution in this way by choosing the correct particle size, shape and vibration parameters. This makes it possible to ensure the packing of particles in size, which affects their packing density, pore size, tortuosity and length of pore channels. The distribution of the maximum pore sizes over the thickness of the samples obtained from powders of various granulometric composition with the use of vibration has been investigated. As a result, a process was developed for obtaining capillary structures by the method of vibration molding of metal powders, depending on the size of the powder particles, the amplitude and frequency of vibration. It is shown that this method can provide a given pore distribution of the capillary structure for heat pipes, which makes it possible to increase their heat transfer capacity.

**Keywords:** heat pipe, capillary structure, heat transfer capacity, vibration molding, vibration parameters, pore sizes.

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

**For citation.** Pilinevich L.P., Tumilovich M.V., Kravtsov A.G., Rumiantsev D.M., Hryb K.V. Research of the process of obtaining capillary-porous materials from metal powders for heat pipes. *Doklady BGUIR*. 2021; 19(4): 5-12.

### Введение

Тепловые трубы предназначены для эффективного отвода тепла от нагреваемых элементов и позволяют снижать температуру различных приборов и устройств. Тепловые трубы с капиллярными пористыми структурами предназначены для работы в условиях неблагоприятного действия сил тяжести. Их основными достоинствами являются высокая теплопередающая способность, а также способность удержания теплоносителя в капиллярно-пористой структуре при динамических силовых нагрузках. Применение тепловых труб позволяет упростить отвод и передачу тепла, уменьшить габариты и улучшить технические и эргономические характеристики приборов и устройств. Тепловые трубы обладают высокой теплопроводностью, на 2-3 порядка превосходящей теплопроводность лучших металлических проводников тепла. Высокие теплотехнические характеристики тепловых труб позволяют

создавать на их основе технически совершенные конструктивные элементы для систем охлаждения различных приборов и устройств радио- и электронной аппаратуры, шкафов ЧПУ и др. Наиболее широкое применение тепловые трубы нашли в системах естественно-конвективного и принудительно-конвективного воздушного охлаждения силовых полупроводниковых приборов с токовой нагрузкой до 2000 А, например, для выравнивания рабочих температур полупроводниковых лазеров.

Тепловая труба – пассивное двухфазное теплопередающее устройство, способное передавать большие количества тепла при минимальном перепаде [1]. Она представляет собой конструкцию, состоящую из трех взаимосвязанных подсистем: зоны испарения, транспортной зоны и зоны конденсации. В зоне испарения, к которой подводится тепло, теплоноситель за счет повышенной температуры испаряется. Образующийся пар за счет перепада давления между зоной испарения и зоной конденсации поступает в последнюю, где за счет фазового перехода происходит конденсация пара в жидкость, которая по расположенной на внутренней поверхности герметичного корпуса тепловой трубы капиллярной структуре под действием капиллярных сил возвращается в зону испарения [2].

Анализ информационных и патентных источников позволил установить, что для капиллярных структур тепловых труб перспективными материалами являются пористые структуры, полученные из металлических порошков. Такие пористые материалы имеют высокую испарительную способность, проницаемость и механическую прочность, широкий диапазон изменения пористости, способны к работе в обширном диапазоне температур, а также обладают высокой коррозионной стойкостью [3]. Вместе с тем используемые в настоящее время способы изготовления капиллярных структур тепловых труб, заключающиеся в предварительном прессовании металлического порошка и его спекании в капиллярную структуру в виде втулки заданных геометрических размеров, образование в ней канавок и запрессовку в герметичный корпус, имеют ряд недостатков. Они не позволяют создавать тепловые трубы с повышенной мощностью из-за технологических сложностей, связанных с трудностями при запрессовке высокопористой капиллярной структуры в виде втулки в корпус без нарушения его герметичности. Кроме того, при получении канавок на наружной поверхности структуры в виде втулки в процессе ее запрессовки внутренняя поверхность корпуса часто не полностью заполняется пористым материалом капиллярной структуры. Это приводит к преждевременному осушению капиллярной структуры за счет увеличения плотности теплового потока. В связи с вышеизложенным более перспективными представляются те способы, которые позволяют производить формование и спекание капиллярных структур прямо в корпусе тепловой трубы. В этом случае тепловой контакт обеспечивается по всей зоне между корпусом тепловой трубы и капиллярной структурой [2, 4].

### **Исследование процесса получения капиллярно-пористых материалов из металлических порошков для тепловой трубы**

Главным требованием, которому должна отвечать капиллярная структура тепловой трубы, является ее способность обеспечивать возвратно-поступательное перемещение теплоносителя, причем заполнение капилляров и их освобождение от теплоносителя должно протекать непрерывно во взаимно противоположных направлениях.

Капиллярный транспорт – это многооперационный технологический процесс, различные варианты которого основаны на многих физических явлениях и закономерностях, таких как смачивание, поверхностное натяжение, капиллярное давление, испарение, капиллярная конденсация и др. Необходимо отметить, что некоторые из данных явлений или характеристик зависят от температуры. Так, например, согласно работе [5] при увеличении температуры поверхностное натяжение  $\sigma$  уменьшается почти по линейному закону. Поверхностное натяжение также зависит от плотности жидкости и определяется следующей зависимостью:

$$\sigma = k(Q_{\text{ж}} - Q_{\text{п}})^4, \quad (1)$$

где  $k$  – постоянная величина;  $Q_{\text{ж}}$  – плотность жидкости;  $Q_{\text{п}}$  – плотность насыщенного пара.

С поверхностным натяжением связана явление смачивания, т. е. проявление

взаимодействия молекул веществ на трехфазной границе твердой, жидкой и газообразной фаз.

На смачивание ( $\cos \theta$ ) существенное влияние оказывает состояние поверхности, например, окисление поверхности материалов из металлов, микрорельеф поверхности материала. Именно смачивание и поверхностное натяжение входят в выражение для определения капиллярного давления  $P_k$ , которое является определяющим для процесса заполнения теплоносителем поровых каналов пористого тела:

$$P_k = \frac{2\sigma \cdot \cos\theta}{R}, \quad (2)$$

где  $R$  – радиус порового канала.

Гидродинамика теплоносителя при его движении в поровых каналах определяется системой дифференциальных уравнений Навье – Стокса, которая приводит к следующему уравнению Пуазеля для средней скорости течения жидкости или газа, например, в цилиндрическом канале:

$$V_{CP} = \frac{\Delta P}{l} \cdot \frac{R^2}{8\mu}, \quad (3)$$

где  $\Delta P$  – перепад давления на длине поры  $l$ ,  $\mu$  – сдвиговая вязкость жидкости (теплоносителя) при заданной температуре.

Вышеуказанная зависимость (3) показывает, что наибольшее влияние на гидродинамику теплоносителя оказывают размеры и длина поровых каналов капиллярной структуры тепловой трубы. В связи с тем, что тепловые трубы часто эксплуатируются в поле силы тяжести при расположении испарителя выше конденсатора, капиллярная структура должна обеспечивать подъем теплоносителя на высоту, равную максимальному расстоянию превышения испарителя над конденсатором. Кроме того, поровая структура должна обеспечивать необходимое капиллярное давление, т. е. иметь небольшие размеры пор, а также обеспечивать необходимый расход теплоносителя, который определяется также размером пор, причем поры должны быть больших размеров. Таким образом, для эффективной работы тепловой трубы необходимо создать такую поровую структуру пористого материала, которая одновременно могла бы обеспечить высокую скорость движения теплоносителя и его подъем на заданную высоту. Удовлетворить вышеуказанные требования возможно созданием капиллярной структуры методами порошковой металлургии путем оптимизации распределения размеров пор.

Среди разнообразных технологических способов и приемов получения пористых материалов с заданным распределением пор можно выделить метод виброформования, заключающийся в наложении вибрационных колебаний на форму с порошком [6]. Получить необходимое распределение пор таким методом можно при грамотном выборе размеров частиц, их формы, а также параметров вибрационных колебаний. Это позволит достичь необходимой укладки частиц по размерам (плотности укладки), размера пор, извилистости и длины поровых каналов. Исследования влияния вибрационных колебаний на распределение размеров пор по толщине образца проводились с применением вибрационного стенда ВЭДС 10-А, представленного на рис. 1 [7].



Рис. 1. Вибрационный стенд ВЭДС-10А  
Fig. 1. Vibration stand VEDS-10A

Стенд содержит вибростол, усилитель и пульт управления. В основу работы вибратора положена электродинамическая приводная система, состоящая из электромагнита с кольцевым воздушным зазором и подвижной системы, подвешенной на двух упругих мембранах. От блока подмагничивания по катушке подмагничивания пропускается постоянный ток. Переменный ток, частота и величина которого определяется параметрами испытаний и задается пультом управления, течет от вибратора через подвижную катушку и усилитель. Ток подвижной катушки взаимодействует с постоянным полем электромагнита и создает толкающую силу, которая приводит в действие вибростол с испытуемым образцом. Основные технические характеристики вибрационного стенда: максимальное виброускорение –  $160 \text{ м/с}^2$ ; рабочий диапазон частот –  $5\text{--}5000 \text{ Гц}$  [6, 7].

Для уяснения процесса формирования заданного распределения размеров пор по толщине капиллярной структуры, которая определяется размерами частиц порошкового материала путем их разделения по размерам при вибрационном формировании капиллярной структуры, авторами проведены эксперименты по определению параметров вибрации, при которых происходит разделение частиц по размерам. Эксперименты показали, что сегрегация частиц по размерам наблюдается в определенном диапазоне значений параметров частоты и ускорения колебаний, а также их сочетаний. Так, на рис. 2 показаны три области состояния порошковой смеси в зависимости от параметров вибрации. В области I разделение частиц по размерам не наблюдается, а происходит только уплотнение порошков. В области II происходит разделение частиц по размерам, причем границы области не зависят от соотношения размеров мелких и крупных частиц. В области III происходит перемешивание смеси порошков различных размеров. Естественно, для технологии получения капиллярных структур с заданным распределением размеров пор по толщине наибольший интерес представляет область II, в которой наблюдается классификация частиц по размерам.

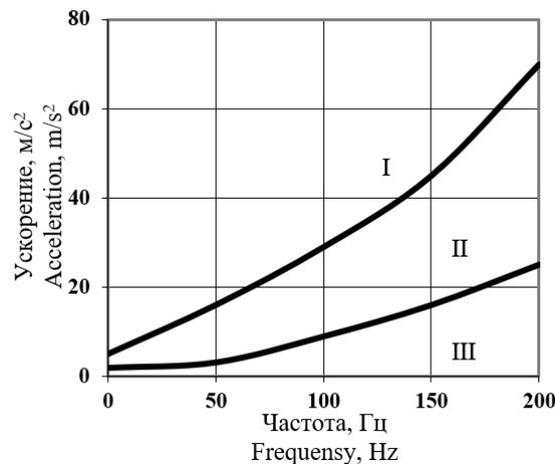


Рис. 2. Состояние частиц порошка в зависимости от параметров вибрации: I – уплотнение частиц; II – разделение частиц по размерам; III – перемешивание частиц

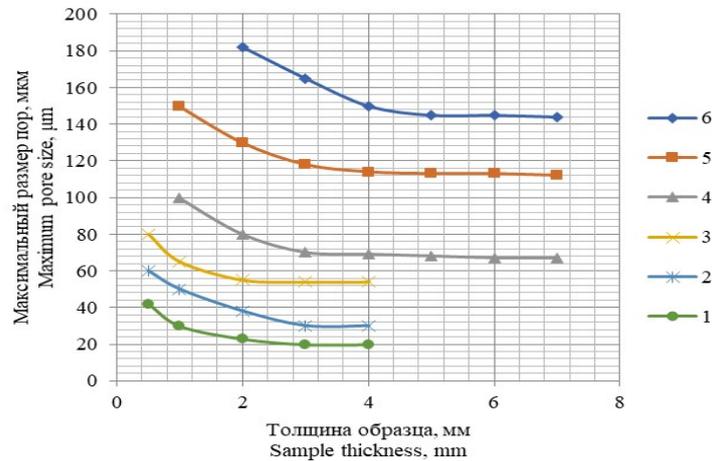
Fig. 2. State of powder particles depending on vibration parameters: I – compaction of particles; II – separation of particles by size; III – mixing of particles

Математической обработкой кривых, представленных на рис. 2, получены следующие регрессионные зависимости диапазона параметров колебаний, при которых происходит разделение частиц по размерам:

$$3,96 \cdot \exp 0,01f \leq a \leq 8,78 \cdot \exp 0,012f, \quad (4)$$

где  $a$  – ускорение вибрации,  $\text{м/с}^2$ ;  $f$  – частота вибрации, Гц.

Для определения распределения размеров пор по толщине пористого образца, изготовленного методом формования с помощью вибраций, изготовлены образцы из металлического медного порошка различного гранулометрического состава. Распределение размеров пор по толщине образцов  $h$ , полученных из медного порошка различного гранулометрического состава с применением вибрации, соответствующей области II, представлено на рис. 3.



**Рис. 3.** Распределение максимальных размеров пор по толщине образцов, полученных из порошков различного гранулометрического состава с применением вибрации (размер частиц: 1 – (–0,063 ... +0,04); 2 – (–0,1 ... +0,063); 3 – (–0,16 ... +0,1); 4 – (–0,2 ... +0,16); 5 – (–0,315 ... +0,2); 6 – (–0,4 ... +0,315) мм)

**Fig. 3.** Distribution of maximum pore sizes over the thickness of samples obtained from powders of various granulometric composition using vibration (particle size: 1 – (–0.063 ... + 0.04); 2 – (–0.1 ... + 0.063); 3 – (–0.16 ... + 0.1); 4 – (–0.2 ... + 0.16); 5 – (–0.315 ... + 0.2); 6 – (–0.4 ... + 0.315) mm)

Анализ полученных результатов показывает, что с помощью вибрации, путем подбора металлического порошка определенного гранулометрического состава можно получать капиллярные структуры тепловых труб с заданным распределением пор в направлении нормали к поверхности стенки тепловой трубы. Пример изготовления капиллярной структуры тепловой трубы для работы при угле наклона  $90^\circ$  к горизонту с размерами: длина 300 мм, длина зоны испарения 90 мм, внешний диаметр корпуса 16 мм, толщина стенки корпуса 1 мм. Для изготовления капиллярной структуры выбран медный порошок марки ПМС-Н с размерами частиц 0,063–0,315 мм, который засыпался в емкость и в течение двух минут подвергался воздействию вибрации с частотой 50 Гц и величиной ускорения  $10 \text{ м/с}^2$ . Затем в сформованный порошок вертикально вводили корпус тепловой трубы с закрепленным в нем формующим элементом. Для обеспечения погружения корпуса тепловой трубы с формующим элементом в сформованный слой порошка и заполнения его свободного объема, корпус подвергался воздействиям вибрации с частотой 20 Гц и величиной ускорения  $3 \text{ м/с}^2$ . Вибрационное формирование капиллярной структуры тепловой трубы позволяет повысить ее теплопередающие характеристики. Это обеспечивается тем, что размер пор изменяется монотонно по длине тепловой трубы, т. е. капилляр или пору можно рассматривать как конус, большое основание которого находится в зоне конденсации, а меньшее – в зоне испарения тепловой трубы, тем самым повышается проницаемость капиллярной структуры при высоком капиллярном давлении, которое обеспечивают мелкие поры в зоне испарения. Результаты испытаний тепловой трубы, изготовленной по вышеуказанной технологии, показали, что ее теплопередающая способность составляет 405 Вт. На рис. 4 показана фотография шлифа капиллярной структуры тепловой трубы, полученной методом вибрационного формования.



**Рис. 4.** Фотография шлифа капиллярной структуры тепловой трубы, полученной методом вибрационного формования

**Fig. 4.** Photo of a thin section of the capillary structure of a heat pipe obtained by vibration molding

### Заклучение

Обоснована актуальность создания тепловых труб из металлических порошков, приведены сведения о влиянии краевого угла смачивания, поверхностного натяжения и капиллярного давления на теплопередающую способность тепловой трубы. Показано, что для эффективной работы тепловой трубы необходимо создать такую капиллярную структуру пористого материала, которая одновременно могла бы обеспечить высокую скорость движения теплоносителя и его подъем на заданную высоту. Исследовано распределение максимальных размеров пор по толщине образцов, полученных из порошков различного гранулометрического состава с применением вибрации. В результате разработан процесс получения капиллярных структур методом вибрационного формования металлических порошков в зависимости от размеров частиц порошка, амплитуды и частоты вибрации. Показано, что данным методом можно обеспечить заданное порораспределение капиллярной структуры для тепловых труб, что позволяет повысить их теплопередающую способность.

### Список литературы

1. Peterson G.P. *An introduction to heat pipes – Modelling, testing and application*. New-York: John Wiley and Sons;1994.
2. Агеенко А.В., Витязь П.А., Мазюк В.В. Способ получения порошковых капиллярных структур контурных тепловых труб с перевернутым мениском. *Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-технических наук*. 2011;2:5-9.
3. Мазюк В.В., Анчевский П.С., Автух А.А. Алиофобные капиллярно-пористые порошковые материалы для интенсификации процесса конденсации в тепловых трубах. *Пористые проницаемые материалы и изделия на их основе: материалы 5-го Международного симпозиума, Минск, 30-31 окт. 2014 г.* Минск: Беларуская навука; 2014: 283-290.
4. Мазюк В.В., Анчевский П.С. Композиционные порошковые капиллярные структуры на основе титана для контурных тепловых труб с перевернутым мениском. *Порошковая металлургия: инженерия поверхности, новые порошковые композиционные материалы. Сварка. Сборник докладов 11-го Международного симпозиума*. Минск: Белорусская наука; 2019: 549-556.
5. Бретштайдер С.Т. *Свойства газов и жидкостей*. Москва – Ленинград: Химия; 1966.
6. Пилиневич Л.П., Мазюк В.В., Савич В.В., Тумилович М.В. *Пористые порошковые материалы с анизотропной структурой: методы получения*. Минск: Тонпик; 2006.
7. Пилиневич Л.П. Исследование процесса разделения твердых частиц по размерам, форме, массе под воздействием вибрации. *Доклады БГУИР*. 2015;6(92):84-89.

### References

1. Peterson G.P. *An introduction to heat pipes – Modelling, testing and application*. New-York: John Wiley and Sons;1994.
2. Ageenko A.V., Vityaz P.A., Mazyuk V.V. [A method of obtaining powder capillary structures of contour heat pipes with an inverted meniscus]. *Izvestiya Natsional'noy akademii nauk Belarusi. Seriya fiziko-tekhnicheskikh nauk*. 2011;2:5-9. (In Russ.)
3. Mazyuk V.V., Anchevsky PS, Avtukh A.A. [Aliophobic capillary-porous powder materials for intensifying the condensation process in heat pipes]. *Poristyye pronitsayemye materialy i izdeliya na ikh osnove: materialy 5 Mezhdunarodnogo simpoziuma*, Minsk, October 30-31, 2014. Minsk: Belarusian Navuka; 2014. (In Russ.)
4. Mazyuk V.V., Anchevsky P.S. [Composite powder capillary structures based on titanium for contour heat pipes with an inverted meniscus]. *Poroshkovaya metallurgiya: inzheneriya poverkhnosti, novyye poroshkovyye kompozitsionnyye materialy. Svarka. Sbornik dokladov 11 Mezhdunarodnogo simpoziuma*. Minsk: Belarusian Science; 2019: 549-556. (In Russ.)
5. Bretshneider S.T. [*Properties of gases and liquids*]. Moscow – Leningrad: Chemistry; 1966. (In Russ.)
6. Pilinevich L.P., Mazyuk V.V., Savich V.V., Tumilovich M.V. [*Porous powder materials with anisotropic structure: production methods*]. Minsk: Tonpik; 2006. (In Russ.)
7. Pilinevich L.P. [Investigation of the process of separating solid particles by size, shape, mass under the influence of vibration]. *Doklady BGUIR = Doklady BGUIR*. 2015;6(92):84-89. (In Russ.)

### Вклад авторов

Пилиневич Л.П. провел теоретический анализ исследуемой проблемы.

Тумилович М.В. сформулировал цель и задачи исследований, экспериментально исследовал распределение максимальных размеров пор по толщине образцов, полученных из порошков различного гранулометрического состава.

Кравцов А.Г. написал введение, заключение, выполнил анализ полученных результатов.

Румянцев Д.М. и Гриб К.В. провели экспериментальные исследования влияния параметров вибрации на состояние частиц порошка, выполнили обработку полученных данных.

### Authors' contribution

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

Tumilovich M.V. formulated the goal and objectives of research, experimentally investigated the effect of powder particle size on pore size and permeability coefficient.

Kravtsov A.G., wrote an introduction, a conclusion, analyzed the results.

Rumiantsev D.M. and Hryb K.V. conducted experimental studies of the effect of the particle size of the powder and the thickness of the PPM on the level of noise suppression, carried out the processing of the data obtained.

### 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.

Кравцов А.Г., д.т.н., профессор, заместитель академика-секретаря Отделения физико-технических наук Президиума НАН Беларуси.

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.

### Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,  
г. Минск, ул. П. Бровки, 4, к. 422,  
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., D.Sc., Professor, Professor at the Department of Engineering Psychology and Ergonomics of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Tumilovich M.V., D.Sc., Associate Professor, Head of the Department for the Training of Scientific Personnel of the Highest Qualification of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Kravtsov A.G., D.Sc., Professor, Deputy Academician-Secretary of the Physical and Technical Department of Sciences of the Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus.

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

Hryb K.V., Postgraduate student 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 str., 4, room 422,  
Belarusian State University  
of Informatics and Radioelectronics;  
tel. +375-17-293-88-83;  
e-mail: tumilovich@bsuir.by,  
Tumilovich Miraslau Viktaravich