

УДК: 534.8.081.7

OECD: 1.03

## Шумопоглощение магнитными нанопористыми гранулами на основе наноразмерного оксида железа

Зобов К.В.<sup>1</sup>, Бардаханов С.П.<sup>2\*</sup>, Гапоненко В.Р.<sup>3</sup>, Труфанов Д.Ю.<sup>4</sup>, Гармаев Б.З.<sup>5</sup><sup>1</sup>К.ф.-м.н., старший научный сотрудник, лаборатория 15 «Физико-математическое моделирование неоднородных течений»,<sup>2</sup>Д.ф.-м.н., профессор, ведущий научный сотрудник кафедры «Техническая механика и компьютерное моделирование», Московский политехнический университет,  
г. Москва, РФ,<sup>3</sup>К.ф.-м.н., ведущий инженер, <sup>4</sup>К.ф.-м.н., научный сотрудник,<sup>3,4</sup>Лаборатория 8 «Аэрофизических исследований дозвуковых течений»,<sup>5</sup>К.ф.-м.н., заместитель директора по научной работе, Институт физического материаловедения, г. Улан-Удэ, РФ,<sup>1,3,4</sup>Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН,  
г. Новосибирск, РФ

### Аннотация

Статья посвящена исследованию возможностей использования нанопористых керамических гранул, полученных из нанопорошка оксида железа, в качестве дополнительного сплошного насыпного слоя, как наполнителей, локализованных в полостях основного материала, и в качестве локальных областей, образованных силой магнитного притяжения на поверхности основного шумопоглощающего материала. Выявлены различия в спектрах шумопоглощения и шумопропускания для сыпучих материалов различающейся гранулометрии. Получены повышенные показатели шумопоглощения на частотах от 200 до 800 Гц для фракции гранул с размерами 0,2-0,8 мм и исходного нанопорошка до значений коэффициента поглощения 0,8 и 0,6 соответственно. Высокую эффективность шумопоглощения до значения коэффициента 0,9 на частоте 1000 Гц показала и фракция с гранулами размера менее 0,1 мм, локализованная на магнитах, размещённых в подложке. Эта фракция показала также и высокую степень сопротивления прохождению звука до 20 дБ. Фракции размера 0,2-0,8 мм и исходного нанопорошка показали значения в 7 и 5 дБ соответственно.

**Ключевые слова:** шумопоглощение, шумопропускание, звукопоглощающий материал, нанопористый материал, нанопорошок, пассивный поглотитель, низкочастотное звукопоглощение

## Noise absorption by magnetic nanoporous granules made of iron oxide nanopowder

Zobov K.V.<sup>1</sup>, Bardakhanov S.P.<sup>2\*</sup>, Gaponenko V.R.<sup>3</sup>, Trufanov D.Yu.<sup>4</sup>, Garmaev B.Z.<sup>5</sup><sup>1</sup>Ph.D., Senior Researcher, Laboratory 15 'Physico-mathematical modeling  
of inhomogeneous flows',<sup>2</sup>Ph.D., Professor, Leading researcher of the Department of Technical Mechanics  
and Computer Modeling, Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia,<sup>3</sup>Ph.D., Leading Engineer, <sup>4</sup>Ph.D., Researcher,

---

\*E-mail: bard@itam.nsc.ru (Бардаханов С.П.)

<sup>3,4</sup>Laboratory 8 of 'Aerophysical Studies of Subsonic Flows',

<sup>5</sup>Ph.D., Deputy Director for Scientific Work, Institute of Physical Materials Science,  
Ulan-Ude, Russia,

<sup>1,3,4</sup>Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS, Novosibirsk,  
Russian Federation

### Abstract

The article is devoted to the study of the possibilities of using nanoporous ceramic granules obtained from iron oxide nanopowder as an additional continuous bulk layer, as fillers localized in the cavities of the base material, and as local areas formed by the force of magnetic attraction on the surface of the main noise-absorbing material. Differences in the spectra of noise absorption and noise transmission for bulk materials of different granulometry are revealed. Increased noise absorption rates were obtained at frequencies from 200 to 800 Hz for the fraction of granules with sizes of 0.2-0.8 mm and the initial nanopowder to levels of ratio 0.8 and 0.6, respectively. A fraction with granules of less than 0.1 mm in size localized on magnets placed in the substrate also showed high noise absorption efficiency up to ratio 0.9 at a frequency of 1000 Hz. This fraction also showed a high degree of resistance to sound transmission up to 20 dB. Fractions of 0.2-0.8 mm in size and the initial nanopowder showed values of 7 and 5 dB, respectively.

**Keywords:** noise absorption, noise transmission, sound-absorbing material, nanoporous material, nanopowder, passive absorber, low-frequency sound absorption

### Введение

Впервые использование керамических гранул на базе нанопорошков было предложено в предыдущей статье [1]. В ней была выявлена возможность изменения спектра шумопоглощения за счет добавления небольшого насыпного слоя из нанопористых керамических гранул в диапазоне измерений на высоких частотах 500-6300 Гц. В последующей работе [2] были продемонстрированы шумопоглощающие свойства насыпных слоёв из керамических гранул диоксида кремния различной природы на более актуальном интервале частот 125-1600 Гц. Была продемонстрирована не только общая эффективность гранул, но и зависимость шумопоглощения от размерного диапазона гранул. Это позволяет предположить, что возможно создание оптимально сконструированного материала для условий конкретной технической задачи шумозащиты.

Шумопоглощающие материалы можно условно подразделить на 3 вида: пористые, резонаторные и мембранные работающие преимущественно в областях высоких, средних, и низких частот соответственно. Подробно это разделение описано в книге [3]. В ней также указывается, что пористые материалы имеют первый пик эффективного поглощения шума при толщине слоя порядка четверти длины волны. Это обусловлено интерференцией прямой и отраженной акустической волны. Таким образом увеличение эффективности подобного слоя в области низких частот (длинных волн) возможно через увеличение толщины слоя или через уменьшение длины волны в материале, что эквивалентно уменьшению эффективной скорости звука в данном материале. Для чистых нанопорошков существует ряд исследований, указывающих на малую величину скорости звука в нанопорошке по сравнению со скоростью звука в воздухе [4]–[7]. Указываемая величина скорости звука от 30 до 70 м/с. Таким образом, можно ожидать уменьшения длины волны и, следовательно, эффективной толщины шумопоглощающего слоя до 10 раз.

Однако работа с нанопорошком, как самостоятельным материалом, неудобна, поскольку требуется создание устройств и методик удержания насыпного слоя порошка.

В этих условиях встает вопрос сохранения свойств нанопорошкового слоя при обработке, например, при формировании нанопористых гранул отдельно или в процессе пропитки исходного материала абсорбера. Подобной обработкой (высушивания суспензии) можно получить из нанопорошка легкий пористый материал похожий на керамику. Возможность получения таких гранул и качество их пористости показаны в статье [4]. При дроблении такого материала можно получить гранулированный абсорбирующий материал различных типов. Аналогом такого материала можно назвать производные аэрогеля. Шумопоглощающие свойства гранул на основе аэрогеля достаточно подробно описываются в литературе [8], [9]. При формировании одинаковых полостей в твердом материале можно получить резонаторы Гельмгольца и сформировать резонансный абсорбирующий материал. Однако вследствие стохастичности методик работы с наночастицами полости внутри материала и размеры самих гранул будут разными и будут давать не один резонанс, а несколько. В статье [10] приведены расчёты по влиянию различных масштабов пор на диапазон частот эффективного поглощения шума.

Компаунд, созданный из нанопористых гранул, может получиться излишне плотным. При этом он лишится пористости и, соответственно, механизма пористого поглощения шума. Но при этом может наблюдаться формирование мембраны и соответственно реализация мембранного механизма поглощения шума. В этом случае его эффективность будет связана с массой мембранного слоя и жесткостью материала подложки. В данном случае эффективность взаимодействия со звуковой волной может быть достигнута в связи с малой плотностью сформированного мембранного материала.

Если взять одинаковый исходный материал и выделить из него фракции различной дисперсности, можно экспериментально определить диапазон размеров, при которых происходит изменение механизма шумоподавления. Впоследствии эти данные могут позволить подбирать шумопоглощающий материал под конкретные технические задачи.

В настоящей работе исследование было сфокусировано на шумопоглощающих свойствах высушенных гранул нанопорошка магнетита различной дисперсности и сравнении этих свойств с исходным наномagnetитом. Этот материал подобен материалу, созданному на основе диоксида кремния, который был объектом исследования предыдущей работы [2]. Однако исходный порошок магнетита ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) имеет совершенно другие физико-химические свойства, в частности, кристаллографические, более высокие физическую и насыпную плотности. Для целей настоящей работы также было важно, что он обладает ферромагнитными свойствами. Можно предположить, что колебания магнитного материала могут приводить к электромагнитным колебаниям. Это может создавать отдельный механизм рассеяния энергии звуковых колебаний. Кроме этого, магнитные свойства значительно расширяют перечень возможностей оптимизации материалов с точки зрения создания достаточно сложных конфигураций. Например, в отличие от случая порошка диоксида кремния (аморфного, легкого, немагнитного вещества), можно фиксировать функциональный материал в определенных рабочих конфигурациях с помощью постоянных или электромагнитов. Расположение может быть разнообразным, неоднородным, и управляемым в самом широком смысле слова. Такой подход имеет огромные перспективы применения. Во-первых, подобное управление позволяет размещать сыпучий материал даже на вертикальных поверхностях. Во-вторых, перераспределение гранул в толще сыпучего слоя с использованием магнитного взаимодействия может изменять диссипативные свойства насыпки. Поэтому, кроме свойств сплошного слоя, который можно получить из подобных сыпучих материалов, исследовалось также влияние магнитов на акустические свойства различных конфигураций через создание заданных поверхностных распределений гранул. Для сравнения локализация достигалась как за счет фиксации материала на неодимовых

магнитах, размещённых в материале подложки, так и в объёме полостей в материале подложки.

Целью исследования было изучение эффективности шумопоглощения насыпных слоёв гранулированной керамики на основе нанопорошка магнетита и анализ влияния дисперсности и локализации засыпки на спектр и амплитуду шумопоглощения и уровень шумопропускания. Измерения акустических характеристик проводились на волноводной установке.

## 1 Экспериментальные методы и материалы

### 1.1 Измерительная установка

Измерения проводились на волноводной установке, подробно описанной в работах [11,12], ее схема приведена на рисунке 1. Одной из нестандартных особенностей реализации, предложенной авторами, было размещение волновода не горизонтально, а вертикально, таким образом можно было проводить измерения на сыпучем слое (на засыпке), не привлекая процедуры для удержания и равномерного распределения слоя засыпки.

1 – возбудитель колебаний, 2 – микрофоны, «Образец» - места установки образцов и их типичные конфигурации

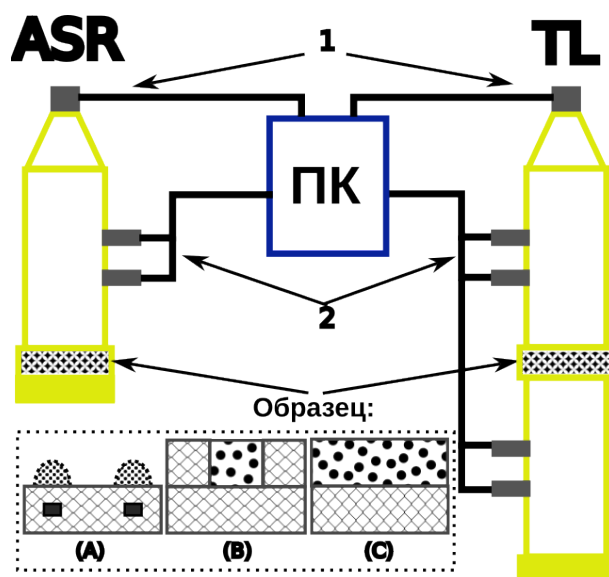


Рисунок 1 – Схемы конфигураций измерительной установки (акустических труб-волноводов), для измерения шумопоглощения «ASR» и шумопропускание «TL»

Через возбудитель акустических колебаний 1 в рабочий объем (волновод установки с диаметром 100 мм) направлялся белый шум, генерируемый программным обеспечением. В рабочей области (Образец) (на рисунке заштрихована) помещался исследуемый образец.

Образцы представляли собой комбинации материалов, следующих трех типов:

(А) области гранулированного материала, локализованные в областях повышенного магнитного поля над магнитами, размещёнными в толще полимерного вспененного материала;

(Б) составной образец с гранулированным материалом, локализованным в специальных полостях во вспененном пористом материале;

(С) слой гранулированного материала, размещённый на подложке из полимерного вспененного пористого материала.

В конфигурации ASR (Absorption Ratio) (левая часть рисунка 1) при использовании приемников – измерительных микрофонов 2 – определялся октавный частотный профиль величины шумопоглощения ASR, а в конфигурации TL (Transmission Loss) (правая часть рисунка 1) посредством микрофонов 2 измерялось шумопропускание TL. Управление измерениями и обработка данных проводились на компьютере (ПК). В целом измерительные процедуры соответствовали международным стандартам ISO 10534-2 и ASTM E1050-10 [13,14].

## 1.2 Параметры сыпучих материалов

Основа исследованных шумопоглощающих материалов – нанопорошок магнетита, полученного газофазным методом испарения исходного материала лазерным лучом при атмосферном давлении (методика схожа с описанной в статье [15], но для нагрева использован лазер). Такой порошок обладает высокой удельной поверхностью порядка  $90 \text{ м}^2/\text{г}$ . Этот порошок под маркировкой «напо» был объектом исследования в данной работе.

Остальные сыпучие материалы были созданы через приготовление водной суспензии, её высушивание, дробление и рассев по фракциям. Как было показано в статьях [4], [16] у материалов, полученных через высушивание коллоидного раствора наночастиц, сохраняется величина удельной поверхности, и пористость является открытой.

Параметры выбранных для исследования образцов приведены в таблице 1. Маркировка образцов основана на максимальном значении размера гранул.

Таблица 1 – Характеристики образцов сыпучих материалов

| Маркировка                                    | напо     | F1       | F8         | F12        | F16        |
|-----------------------------------------------|----------|----------|------------|------------|------------|
| Дисперсность                                  | 20-40 нм | 0-0,1 мм | 0,2-0,8 мм | 0,8-1,2 мм | 1,2-1,6 мм |
| Насыпная плотность, г/л                       | 170      | 1750     | 1250       | 1340       | 1315       |
| Плотность материала частиц, г/см <sup>3</sup> | 5,2      | 3,8      | 3,8        | 3,8        | 3,8        |

Можно заметить, что помимо размеров частиц, образцы насыпок значительно отличаются насыпной плотностью. Самый лёгкий образец по данному параметру это нанопорошок, а самый тяжелый это фракция менее 100 мкм (F1). Более крупные фракции имеют почти в полтора раза меньшую насыпную плотность, но всё равно почти на порядок большую, чем нанопорошок. Это означает, что насыпки, имеющие одинаковую толщину слоя, то есть эквивалентные объёмы, будут иметь значительно отличающуюся массу. По этой причине для исследований фиксировался объём исследуемого сыпучего материала. Он составлял 90 мл, что создавало на подложке диаметром 100 мм слой толщиной 11 мм.

Чтобы дать лучшее представление об используемых сыпучих материалах, их характерные фотографии приведены на рисунке 2.

Можно видеть, что нанопорошок не является гомогенным, а представлен хлопьями разных масштабов. Однако все эти хлопья непрочные, состоят из слипшихся частиц, и легко разминаются. Кроме того, образцы крупной фракции более однородны и имеют узкое распределение частиц по размерам. В то же время частицы диапазона от 200 до 800 мкм (F8) имеют достаточно широкий диапазон размеров частиц. Частицы менее 100 мкм (F1) можно рассмотреть только под оптическим микроскопом.

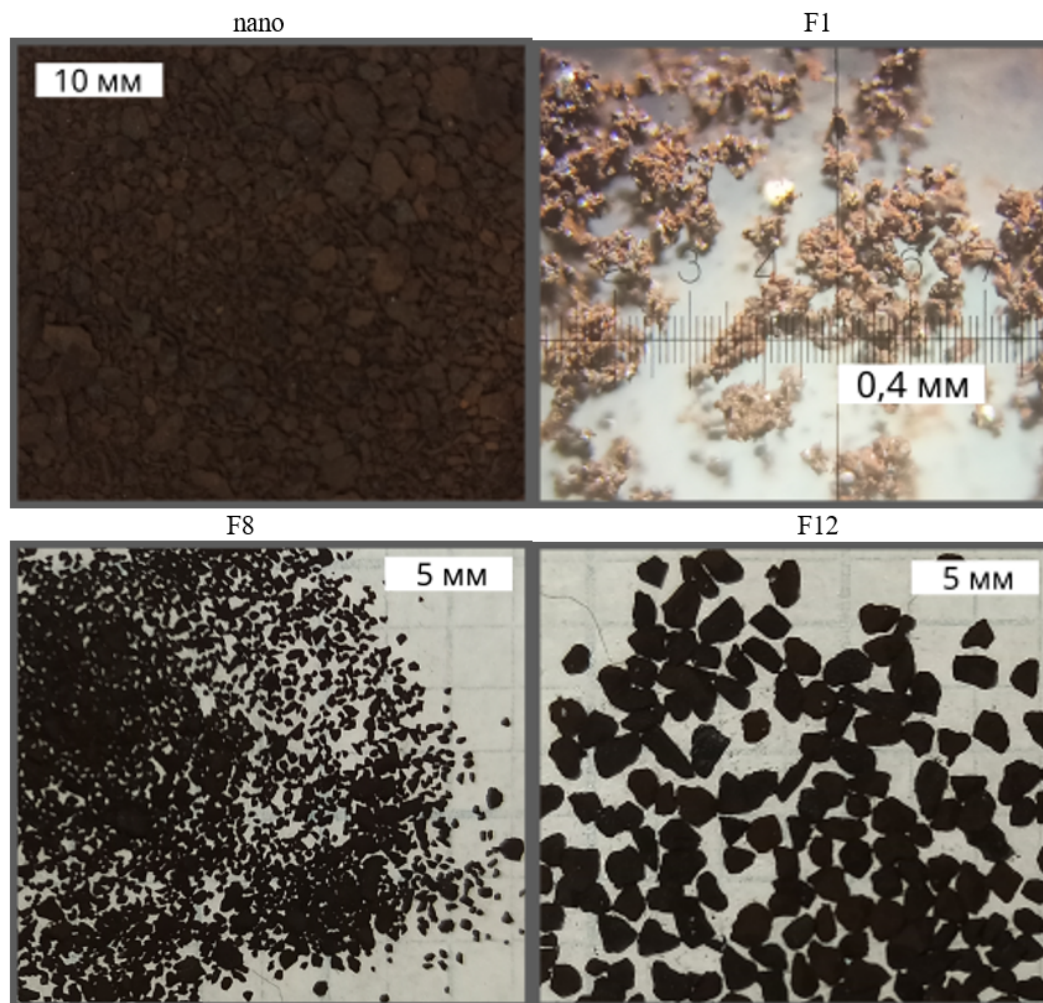


Рисунок 2 – Фотографии сыпучих материалов разных фракций

### 1.3 Способы локализации сыпучих материалов

Исследование сплошного слоя насыпки является фундаментальной задачей для характеристики материала самого по себе, однако его использование в таком виде в реальных технических решениях неудобно. Поэтому важным вопросом является сохранение эффективности в более технологичных системах.

Для исследования были выбраны две таких системы. Первая – локализация насыпки в полости в толще базового вспененного материала. Вторая – локализация материала за счет «подвешивания» магнитных частиц в области локализации на поверхности магнитного поля магнитов, размещенных в толще базового вспененного материала. Рассмотрим их по очереди.

#### 1.3.1 Локализация в полости

Для исследования была использована простая модель: на сплошном слое поролона толщиной 20 мм, размещался ещё один слой поролона с толщиной 20 мм с вырезанными в нем отверстиями. На рисунке 3 приведены варианты слоёв с отверстиями. Для технологического использования такой модели следовало добавить ещё один слой для закрывания полости. Однако такой слой будет скрывать эффекты, связанные с насыпкой, смещая долю толщины шумоподавителя в сторону базового поролона, поэтому результаты этих измерений не показательны. Полость заполнялась полностью (в край) исследуемым сыпучим материалом.

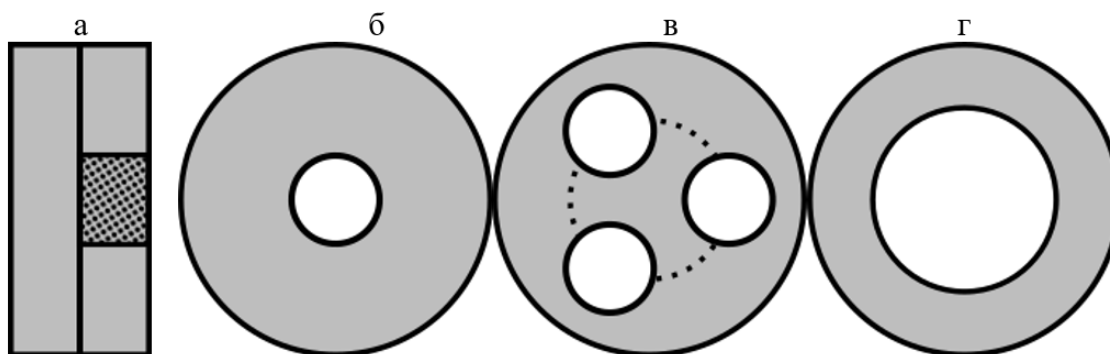


Рисунок 3 – Схемы конфигураций: (а) – заполнение полости насыпкой, (б), (в), (г) – варианты слоёв с полостями

Доля площади, перекрытая сыпучим материалом 9%, 27% и 36% для вариантов, представленных на рисунке 3 (б), (в), (г) соответственно. Масса сыпучего материала, помещённая в полости слоя порядка 14 г, 40 г и 60 г соответственно. Эта масса для самой крупной фракции F16, значения для остальных меняются соответственно с насыпной плотностью.

### 1.3.2 Локализация в магнитном поле

Благодаря магнитным свойствам используемых сыпучих материалов была реализована модель локализации с помощью магнитного поля, создаваемого неодимовыми магнитами, расположенными в толще вспененного материала подложки. Для экспериментов использовалось несколько вариантов расположения магнитов, приведенных на рисунке 4 (б), (в).

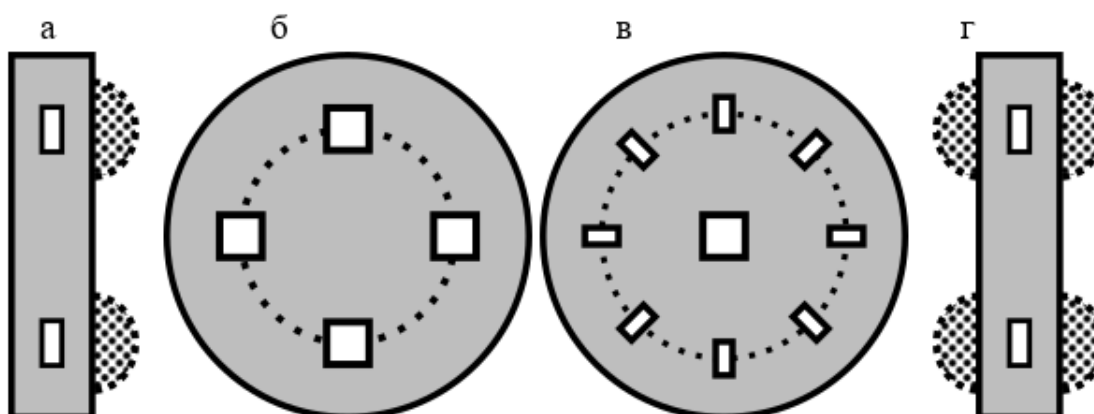


Рисунок 4 – Схемы конфигураций: (а) сыпучий материал фиксируется на магнитах, размещённых в подложке, (б) и (в) варианты расположения магнитов по площади подложки, (г) вариант фиксации материала магнитами с двух сторон

Кроме этого, для измерения шумопроницаемости локальные области формировались как с одной стороны базового поролона, так и с обеих сторон, как показано на рисунке 4 (а) и (г) соответственно. То, как сыпучий материал локализуется на подложке с разной конфигурацией магнитов, легче всего рассмотреть на фотографиях, представленных на рисунке 5.

Эффект от магнитного поля может присутствовать и в сплошном насыпном слое, что было проверено экспериментально. Однако, больший технический интерес

представляет конфигурация, при которой на материале подложки остаются лишь области с удерживаемым магнитами сыпучим материалом. При этом на 4-х магнитах остается порядка 10 г материала, то есть по 2,5 г на каждом магните. Для 9-ти магнитов удерживаемая масса составляет порядка 13 г. Расчёт количества, приходящегося на один магнит, даёт 1,4 г, однако, если учитывать, что размеры магнитов отличаются, то можно предположить, что на центральном магните локализовано 2,5 г, а на периферийных малых магнитах по 1,3 г.

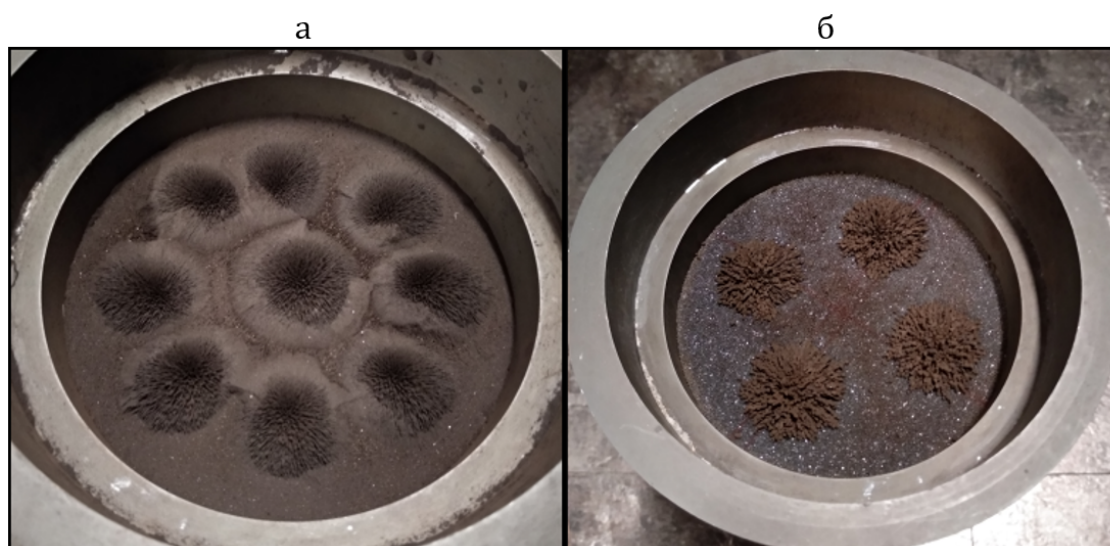


Рисунок 5 – Фотография примеров фиксации сыпучего материала на магнитах, размещённых в подложке: (а) Материала F1 на конфигурации с 9-ю магнитами, (б) материала F12 на конфигурации с 4-мя магнитами

Можно заметить, что суммарная масса, удерживаемая лишь магнитами слегка меньше массы, заключенной в самой малой вырезанной полости. Но, в отличие от полости, она распределена по поверхности и представлена игольчатыми холмообразными структурами.

## 2 Результаты экспериментов

### 2.1 Сравнение шумоподавляющих свойств сплошного слоя различных типов насыпки

В качестве базовых были проведены измерения для равномерного насыпного слоя толщины 10 мм, размещенного на слое подложки, параметров шумопоглощения ASR и шумопроницаемости (ослабления при прохождении звука) TL. Результаты измерений приведены на рисунке 6 (а) и (б) соответственно.

Свойства материала подложки здесь и далее приведены на графике серым пунктиром и двумя интенсивностями заливки. Тёмная заливка соответствует толщине подложки 20 мм, светлая соответствует толщине материала подложки 30 мм, моделирующей ситуацию, при которой 10 мм сыпучего слоя заменены на дополнительные 10 мм материала подложки.

Как можно видеть нанопористые гранулы больших размеров имеют максимальную и достаточно высокую шумопоглощающую способность на высоких частотах более 600 Гц. При этом они обладают, как и базовый материал высокой шумопроницаемостью.

Если же рассмотреть насыпку с дисперсностью менее 100 мкм (F1), то можно увидеть, что эффективность шумопоглощения падает, и остаётся лишь невысокий пик

на низких частотах. Если сопоставить это с очень низким коэффициентом пропускания, можно заключить, что гранулы размерами менее 100 мкм (F1) образуют достаточно плотный слой и не пропускают колебания в глубину поглотителя. Поэтому они обладают меньшей амплитудой величины шумопоглощения, а её спектральный максимум приходится на более низкие частоты, что соответствует характеристикам мембранного поглотителя.

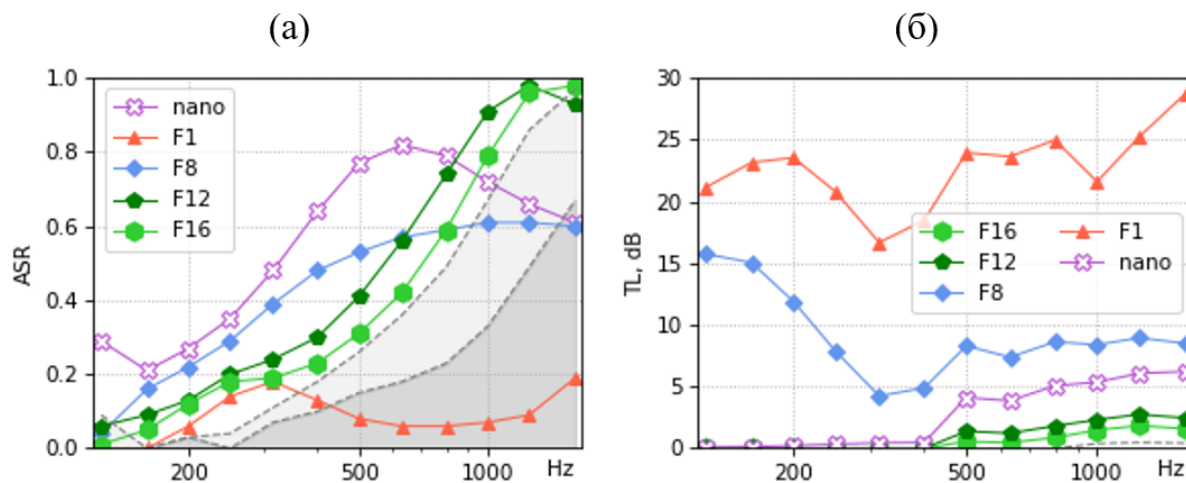


Рисунок 6 – Измерение ASR (а) и TL (б) на фоне подложки из поролонa 20 мм и образца поролонa 30 мм для насыпных слоёв материалов разной дисперсности и одинаковой толщины 10 мм

Гранулы с размерами от 200 до 800 мкм (F8) дают достаточно высокие значения величины шумопоглощения на всём исследуемом диапазоне частот. Однако на частотах менее 500 Гц наблюдается постепенный спад эффективности. С точки зрения шумопроницаемости, этот материал показывает, хоть и не максимальную, но значительную величину ослабления проходящего шума.

Насыпной слой, состоящий из исходного нанопорошка, показывает пик шумоподавления в области 600 Гц. Его величина 0,8 является лидером на данной частоте среди остальных, однако уступает максимальным значениям на высоких частотах для крупнодисперсных гранул. Интересной является эффективность препятствования прохождению звука, она имеет значительную ступеньку от почти полного пропускания частот ниже 500 Гц до значительного ослабления на 5 дБ в области более высоких частот.

## 2.2 Эффективность заполнения полости

Для проверки эффективности заполнения полостей сыпучим материалом были проведены измерения для разных типов наполнителя. Результаты измерений шумоподавления представлены на рисунке 7.

Результаты показывают, что все насыпки дают схожий результат и этот результат ненамного выше результата для слоя исходного вспененного материала толщины 40мм. К этому результату стремятся и результаты для конфигураций с пустыми полостями. Это в очередной раз подтверждает, что исследуемые сыпучие материалы по своим шумоподавающим свойствам близки к вспененным материалам, особенно для крупных фракций. Для самой мелкой фракции F1 результаты максимально отстают от остальных. Наблюдается снижение шумопоглощения на высоких частотах при сохранении его на средних частотах. При этом интенсивность наблюдаемых эффектов коррелирует с объёмом гранулята, присутствующего в разных конфигурациях.

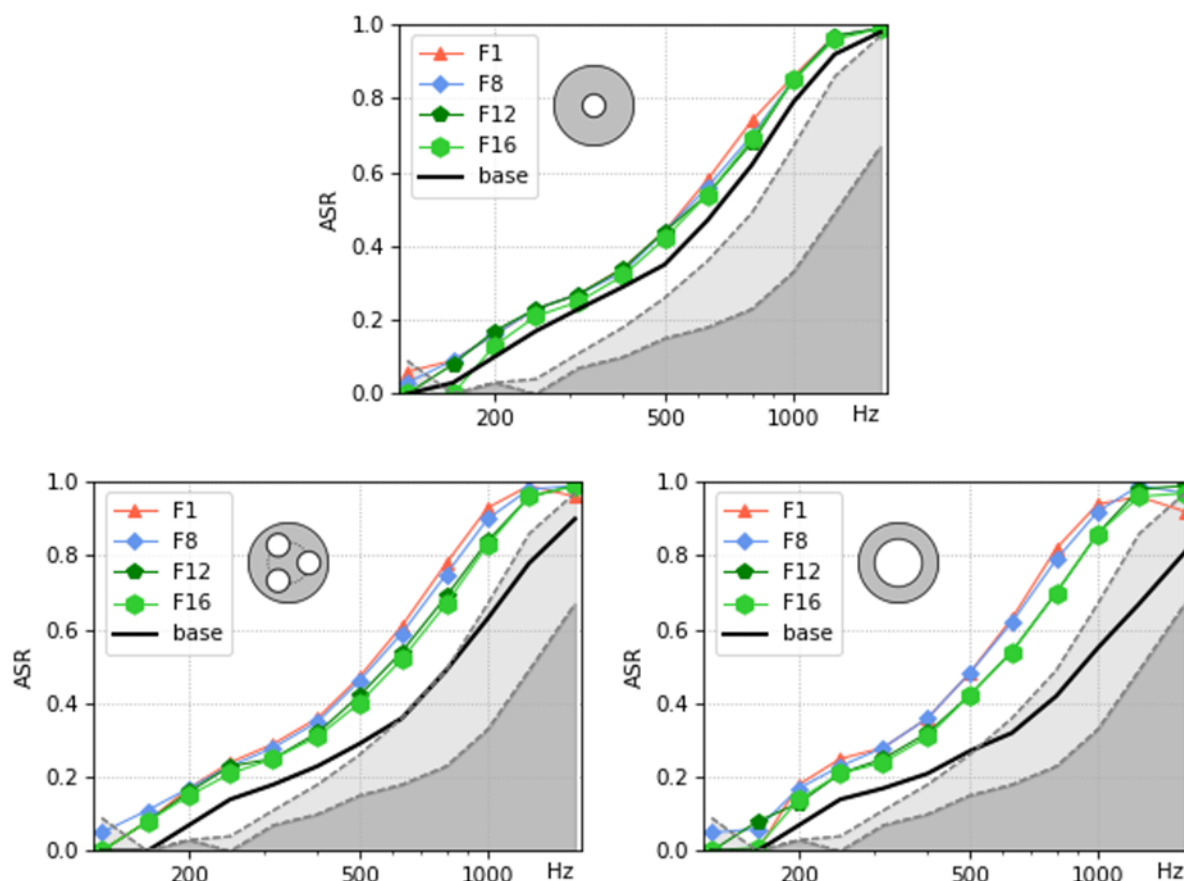


Рисунок 7 – Результаты измерения коэффициента шумопоглощения ASR для различных конфигураций полостей в слое вспененного материала заполненных разными насыпками, на фоне подложки из поролона 20 мм и образца поролона 30 мм (серые области) и образцов полостей без наполнения (base)

### 2.3 Магнитное удержание насыпки

Используя магнитные свойства исследуемых гранул, стало возможным применить расположенные внутри базового поролона магниты для формирования на его поверхности областей с подвешенными гранулами. Вначале было измерено, насколько значимо влияет магнитное поле на полный насыпной слой, исследованный в пункте 2.1.

Как можно видеть на рисунке 8, влияние четырёх магнитов слабое и без явной тенденции. Для девяти магнитов можно видеть сближение показателей шумопроницаемости насыпного слоя гранул дисперсности 200-800 мкм (F8) и исходного наноматериала.

Для измерений свойств локализованных областей насыпки ссыпалось всё, что не удерживается магнитами. Данные измерений коэффициента шумопоглощения представлены на рисунке 9.

Можно видеть, что остаточные области дают слабые добавочные значения шумопоглощения в большинстве случаев. Однако материал самой мелкой фракции F1 напротив, даёт максимальные добавочные значения. Опираясь на низкую шумопроницаемость слоя этой фракции, можно связать повышенное шумопоглощение либо с формированием мембранных областей, либо с запиранием в материале подложки отраженной звуковой волны.

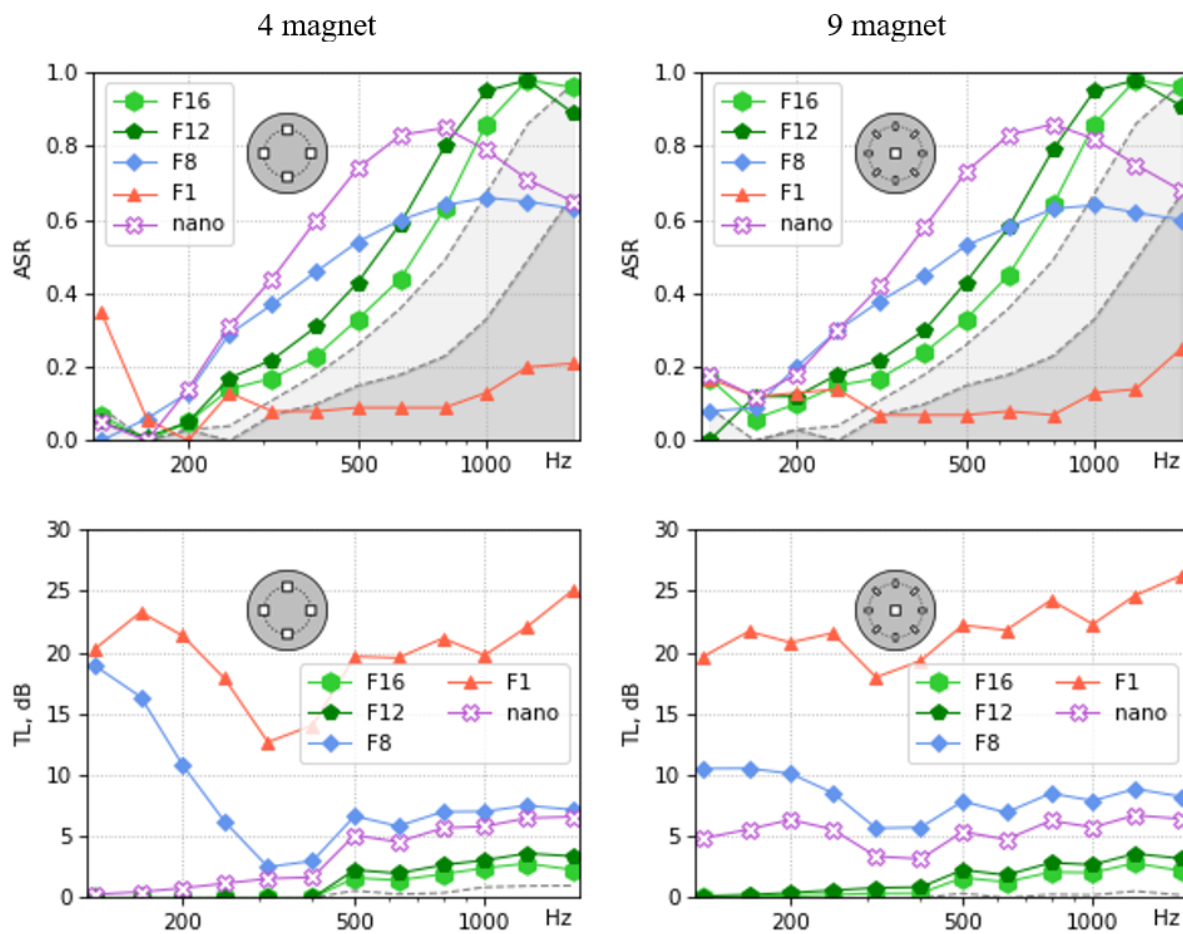


Рисунок 8 – Результаты измерений параметров ASR и TL для различных сыпучих слоёв толщины 10 мм на различных конфигурациях магнитов в слое вспененного материала, на фоне подложки из поролона 20 мм и образца поролона 30 мм (серые области)

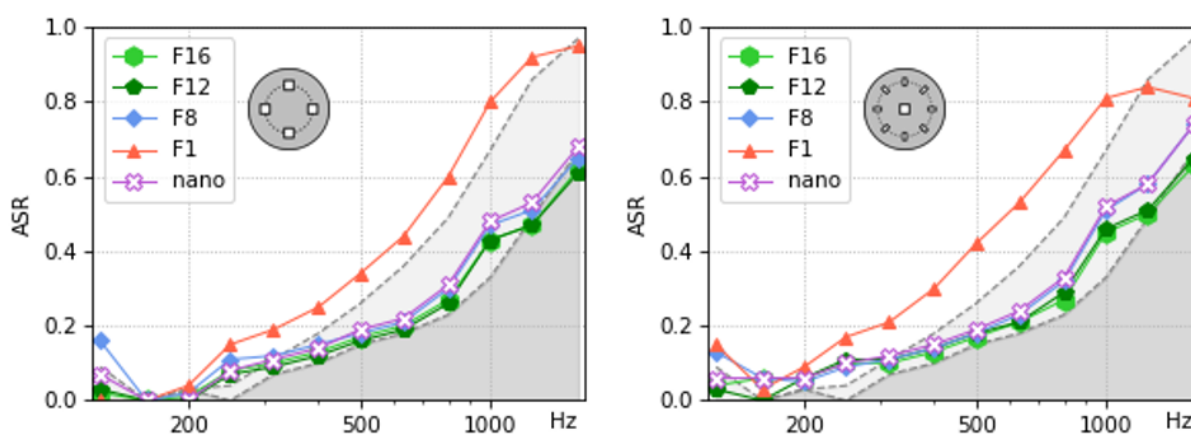


Рисунок 9 – Результаты измерений параметров ASR различных сыпучих материалов локализованных на магнитах в двух конфигурациях, на фоне подложки из поролона 20 мм и образца поролона 30 мм (серые области)

Интерес в такой конфигурации представляет также величина шумопроницаемости, так как лучший результат по шумопоглощению дала насыпка из самой малой фракции, которая в конфигурации сплошного слоя даёт, наоборот, низкие параметры шумопоглощения и сильно препятствует прохождению шума. Для сравнения были также

измерены параметры шумопроницаемости для двухстороннего удержания гранул на базе подложки с 9-ю магнитами. Результаты представлены на рисунке 10 для сыпучих материалов, показавших в сплошном слое максимальные значения TL – насыпки дисперсности 0-100 мкм (F1) и 200-800 мкм (F8), а также насыпки исходного нанопорошка.

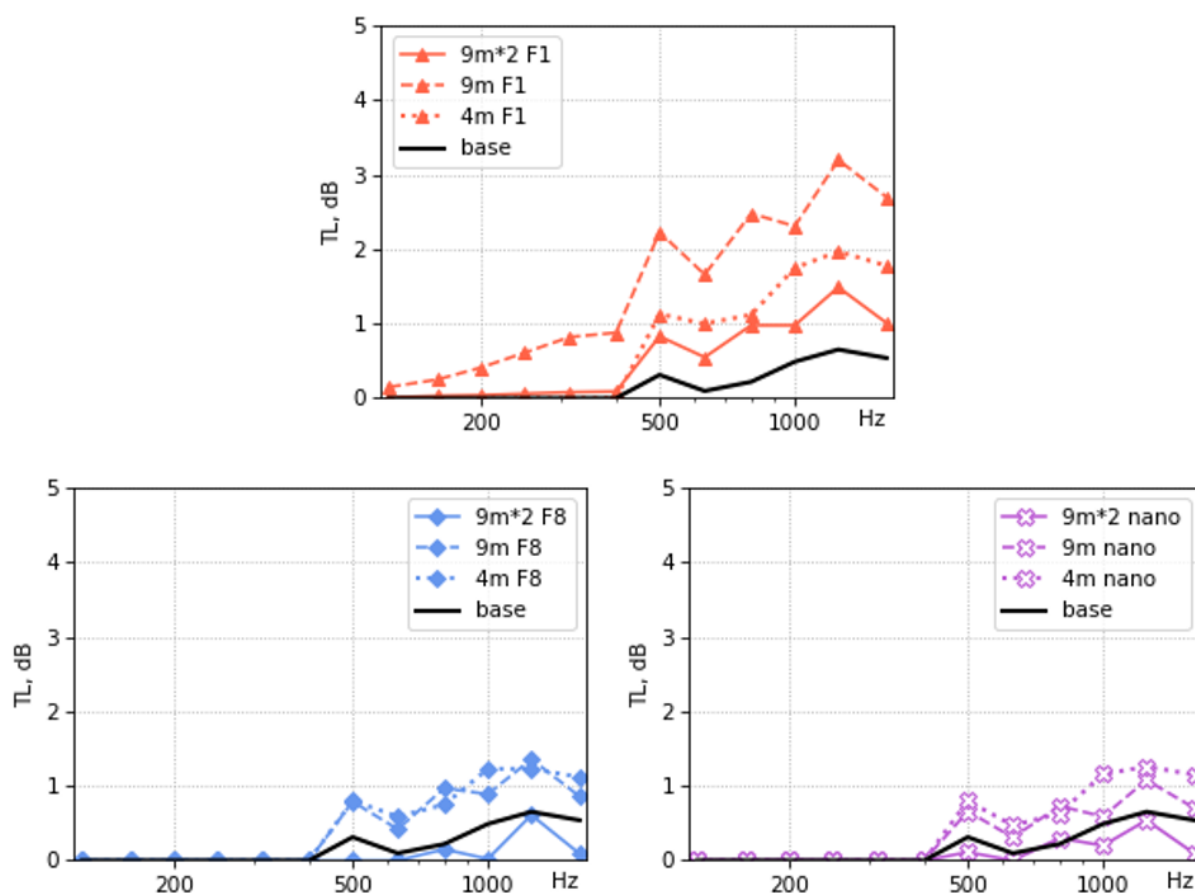


Рисунок 10 – Результаты измерений параметров TL разных сыпучих материалов, локализованных на магнитах в двух конфигурациях, а также для случая двухсторонней локализации, в сравнении с параметрами материала подложки

При такой конфигурации оставалась открытой значительная часть поролона, являющегося плохим шумоизолятором, также объем остаточного материала мал, поэтому для всех насыпок эффект снижения шумопроницаемости был мал. Тем не менее для гранул размерами менее 100 мкм (F1) наблюдается больший эффект, чем для других материалов, который растёт с увеличением числа магнитов, то есть объёма остаточного материала. Вероятнее всего, это объясняется формированием достаточно плотного слоя порошка, работающего как мембрана.

Интересный эффект наблюдается в шумопроницаемости двухстороннего образца. Можно предположить, что для образца фракции менее 100 мкм объем удерживаемого материала возрастёт, и шумопроницаемость уменьшится ещё сильнее, чем в одностороннем случае. Однако эффект оказался обратным для всех типов насыпки. Возможно, это связано с переотражением звуковых волн от второго слоя. Однако, то, что шумопроницаемость здесь выше, чем у базового поролонa, говорит о возможном формировании дополнительного механизма передачи звуковой волны сквозь базовый слой.

## 2.4 Измерения конфигураций базового материала

Для полноты картины, можно рассмотреть более пристально параметры материала подложки и влияния на них магнитов. Данные представлены на рисунке 11.

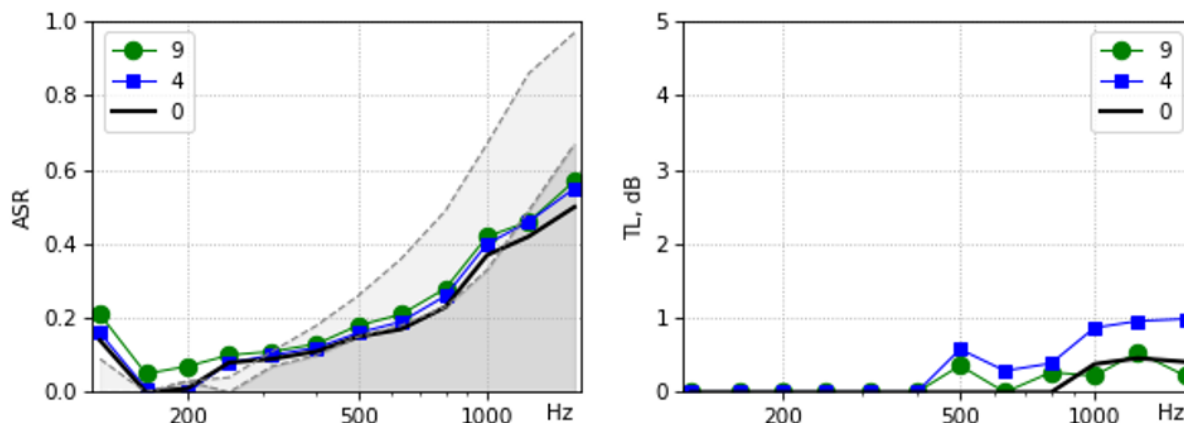


Рисунок 11 – Результаты измерений параметров ASR и TL подложек из вспененного материала толщины 20 мм с размещёнными в них магнитами

Можно видеть, что влияние магнитов на ASR крайне мало и скорее связано с неоднородностью вспененного материала и неодинаковостью изготовленных образцов. Это же можно сказать и об отличии значений от серой области, соответствующей значениям для поролонa толщины 20 мм. Величины TL также слабо отличаются, хотя видно, что пропускание шума у образцов с магнитами хуже, чем у пустого образца. Однако численные значения скорее отличаются не из-за магнитов, а из-за случайных различий конкретных изготовленных образцов поролонa.

## 3 Обсуждение результатов

Измерения показали, что насыпные слои гранул, полученных из нанопорошка магнетита, как и аналогичные слои из гранул на основе диоксида кремния, поглощают в разных диапазонах частот в зависимости от размеров. Описать этот эффект можно преобладанием эффектов разных типов абсорбера.

Фракция сыпучего материала с размерами более 800 мкм (F12 и F16) по характеристикам близка к вспененному материалу, поэтому можно считать, что такая насыпка действует как пористый материал и имеет эффективность при частотах более 600 Гц. Для такого материала важной является толщина слоя. В литературе указано, что толщина его для эффективного шумопоглощения должна быть более четверти длины звуковой волны. В данной конфигурации измерений и согласно схожести свойств, к толщине слоя сыпучего материала следует добавлять толщину слоя подложки. Итоговая суммарная толщина поглотителя около 30 мм.

Насыпной слой из гранул размерами от 200 до 800 мкм (F8), даёт эффективное шумопоглощение на гораздо меньших частотах (от 300 Гц) и, как следствие, при больших длинах волн. Это можно объяснить тем, что в таком слое длина звуковой волны эффективно меньше. Простое сложение толщин в данном случае не применимо.

Насыпной слой исходного нанопорошка обладает как высокой эффективностью на частотах начиная с 300 Гц, так и обладает более ярко выраженным пиком шумопоглощения на частоте порядка 600 Гц. Используя уже указанную оценку эффективной толщины слоя, равной четверти длины звуковой волны, и реальную толщину слоя нанопорошка в эксперименте 10 мм, можно заключить, что длина звуковой

волны при частоте 600 Гц должна быть 40 мм. Это соотношение соответствует скорости звука 30 м/с. В ряде экспериментальных работ указывается, что скорость звука в нанопорошке значительно (более чем в 6 раз) меньше, чем в воздухе. Таким образом, значение 30 м/с возможно для нанопорошков и может объяснить эффективность их шумопоглощения в средней области частот при малых толщинах рабочего слоя.

Гранулы с размером менее 100 мкм (F1) создают очень плотный насыпной слой и крайне плохо пропускают воздух. При создании насыпного слоя на вспененном материале образуется аналог мембраны. По насыпной плотности гранулята можно определить его погонную массу, а также определить параметры подложки мембраны. Однако, экспериментальные результаты не дают точного значения частоты пика. Во-первых, присутствует рост значения в диапазоне высоких частот. Во-вторых, при добавлении магнитов пик в области низких частот разрушается. Возможно, присутствуют эффекты расслоения, эффекты силы тяжести и эффекты от магнитного поля. Поэтому численный анализ мембранной эффективности мелкой фракции требует отдельного исследования.

Локальное расположение насыпного материала не даёт значимого увеличения эффективности для всех исследованных сыпучих материалов кроме фракции до 100 мкм (F1). Эффективность снижалась пропорционально уменьшению количества материала поглотителя. Однако, использование механизма магнитного удержания для локализации фракции менее 100 мкм (F1) только в отдельных областях, а не в сплошном слое, дало значимый эффект. По сути, 15 г гранул малой этой фракции, локализованные таким способом, дают эффективность шумопоглощения как 100 г более крупной фракции, размещенных сплошным слоем. Причины такого увеличения эффективности, по-видимому, связаны с многократным отражением звуковых волн, обошедших локализованные мембраны, сформированные плотным слоем мелкого гранулята.

Наблюдения эффекта увеличения шумопропускания образцов с двухсторонней локализацией материала за счёт областей магнитного поля указывает на возможную механическую связность гранул с разных сторон за счёт магнитного поля. Можно наблюдать, что частицы микронных фракций не ложатся плотным слоем, а выстраиваются в столбчатые структуры, как будто нанизанные на силовые линии поля, как показано на рисунке 12.

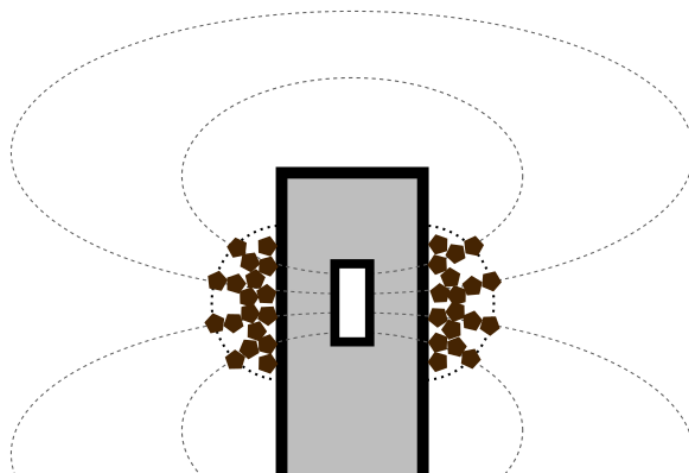


Рисунок 12 – Схема связи насыпных слоёв на разных сторонах через магнитное поле

При этом колебания ферромагнитных частиц, вызванные акустической волной, будут искажать магнитное поле как единое целое и на обратной стороне образца. Такое искажение может приводить к колебаниям частиц на обратной стороне, которые, в свою

очередь, будут создавать акустические волны с обратной стороны образца. Возможность использования этого эффекта требует отдельного исследования, так как потенциально он может стать основой для создания механизмов активного шумоподавления за счёт модуляции магнитного поля, или увеличение эффективности шумопоглощения за счёт использования гранул и слоёв разной дисперсности, связанных через магнитное поле.

### Заключение

В работе проведено сравнительное исследование шумопоглощающих свойств ряда специфических сыпучих материалов на основе нанопористой керамической крошки на базе нанопорошка магнетита. Выявлены различия в спектрах шумопоглощения и шумопропускания для сыпучих материалов различной гранулометрии. Чем больше размер керамической крошки, тем выше частота наилучшего шумопоглощения. На толщине насыпного слоя порядка 10 мм на 20 мм подложки из вспененного материала был получен значительный прирост величины шумопоглощения.

Для фракции более 0,8 мм шумопоглощение имеет пик более 0,9 на частотах выше 1000 Гц. Для фракции размера 0,2-0,8 мм и исходного нанопорошка показатели шумопоглощения на частотах от 200 до 800 Гц доходят до 0,8 и 0,6 соответственно. Локализация насыпного слоя не имеет основополагающей роли, но создание примагнитченного слоя из мелких керамических гранул позволяет увеличить эффективность шумопоглощения. По-видимому, это происходит вследствие многократного прохождения звуковых волн в материале подложки. Так, фракция менее 100 мкм, локализованная на магнитах, размещённых в подложке, показала высокую эффективность шумопоглощения до 0,9 на частоте 1000 Гц. Эта фракция также показала высокую степень сопротивления прохождению звука до 20 дБ. Фракции размера 0,2-0,8 мкм и исходного нанопорошка показали значения в 7 и 5 дБ соответственно. Более крупные фракции, как и материал подложки, слабо препятствуют прохождению шума, и их коэффициент ослабления не превышает 1 дБ.

Эксперименты с двухсторонней локализацией сыпучего материала на магнитах показали возможность использования передачи энергии звуковой волны через магнитное поле, однако этот механизм требует отдельных исследований.

Исследования по получению нанопорошков проводятся в рамках Госзадания ИТПМ СО РАН (124021400038-1), часть работ по получению композиционных материалов выполнена в рамках Госзадания ИФМ СО РАН (FWSF-2024-0013) исследования новых шумопоглощающих композиционных материалов выполнены в рамках проекта РНФ №23-19-00258 (Московский Политех).

### Список использованных источников

1. Bardakhanov S.P. [et al.] Hybrid sound-absorbing foam materials with nanostructured grit-impregnated pores // Applied Acoustics. 2018. Т. 139. Р. 69–74.
2. Зобов К.В. и др. Шумопоглощающие свойства нанопористых керамических гранул диоксида кремния // Акустический журнал. 2025. Т. 71, № 5.
3. Jacobsen F. [et al.] Fundamentals of acoustics and noise control. 2008.
4. Bardakhanov S.P., Trufanov D.Yu., Zavjalov A.P. New Type of Medium – Gases with High Concentration of Nanoparticles // SJPhys. 2017. Т. 12, № 2. Р. 100–110.
5. Bardakhanov S.P., Joo S.W. Hot-Wire Anemometry for Velocity Measurements in Nanopowder Flows // Journal of Fluids Engineering. American Society of Mechanical Engineers, 2009. Т. 131, № 3. Р. 034501.

6. Zobov K.V. [et al.] Study of the sound diffusion in the nanopowder thick layer. Novosibirsk, Russia, 2023. P. 030084.
7. Bardakhanov S.P. [et al.] Investigation of acoustic waves propagation and flow in nanodispersed medium // Thermophysics and Aeromechanics. 2011. T. 18, № 1. P. 25–30.
8. Mazrouei-Sebdani Z. [et al.] A review on silica aerogel-based materials for acoustic applications // Journal of Non-Crystalline Solids. 2021. T. 562. P. 120770.
9. Budtova T. [et al.] Acoustic Properties of Aerogels: Current Status and Prospects // Adv Eng Mater. 2023. T. 25, № 6. P. 2201137.
10. Begum H. [et al.] The acoustical properties of tetraethyl orthosilicate based granular silica aerogels // The Journal of the Acoustical Society of America. 2021. T. 149, № 6. P. 4149–4158.
11. Lee C.-M., Wang Y.S. A prediction method of the acoustical properties of multilayered noise control materials in standing wave-duct systems // Journal of Sound and Vibration. Academic Press, 2006. T. 298, № 1–2. P. 350–365.
12. Lee C.-M., Xu Y. A modified transfer matrix method for prediction of transmission loss of multilayer acoustic materials // Journal of Sound and Vibration. 2009. T. 326, № 1–2. P. 290–301.
13. ISO 10534: 1998, Acoustics – Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes – Part 2: Transfer-function method.
14. ASTM E1050 – 10: 2010, Standard test method for impedance and absorption of acoustical materials using a tube, two microphones and a digital frequency analysis system.
15. Bardakhanov S.P. [et al.] Nanopowder production based on technology of solid raw substances evaporation by electron beam accelerator // Materials Science and Engineering: B. 2006. T. 132, № 1–2. P. 204–208.
16. Gaponenko V.R., Bardakhanov S.P., Trufanov D.Yu. Influence of temperature on the properties of free loaded inorganic oxide nano powders // Steklo i Keramika. - т. 96, №10 (2023) - P. 10-20

## References

1. Bardakhanov S.P. [et al.] Hybrid sound-absorbing foam materials with nanostructured grit-impregnated pores // Applied Acoustics. - 2018. - Vol. 139. - P. 69–74.
2. Zobov K.V. and others. Noise-absorbing properties of nanoporous ceramic granules of silicon dioxide // Acoustical Physics. - 2025. - Vol. 71, N 5.
3. Jacobsen F. [et al.] Fundamentals of acoustics and noise control. 2008.
4. Bardakhanov S.P., Trufanov D.Yu., Zavjalov A.P. New Type of Medium – Gases with High Concentration of Nanoparticles // SJPhys. - 2017. - Vol. 12, N 2. - P. 100–110.
5. Bardakhanov S.P., Joo S.W. Hot-Wire Anemometry for Velocity Measurements in Nanopowder Flows // Journal of Fluids Engineering. American Society of Mechanical Engineers. - 2009. - Vol. 131, N 3. - P. 034501.
6. Zobov K.V. [et al.] Study of the sound diffusion in the nanopowder thick layer. Novosibirsk, Russia, 2023. - P. 030084.
7. Bardakhanov S.P. [et al.] Investigation of acoustic waves propagation and flow in nanodispersed medium // Thermophysics and Aeromechanics. - 2011. - Vol. 18, N 1. - P. 25–30.
8. Mazrouei-Sebdani Z. [et al.] A review on silica aerogel-based materials for acoustic applications // Journal of Non-Crystalline Solids. - 2021. - Vol. 562. - P. 120770.
9. Budtova T. [et al.] Acoustic Properties of Aerogels: Current Status and Prospects // Adv Eng Mater. - 2023. - Vol. 25, N 6. - P. 2201137.

- 
10. Begum H. [et al.] The acoustical properties of tetraethyl orthosilicate based granular silica aerogels // The Journal of the Acoustical Society of America. - 2021. - Vol. 149, N 6. - P. 4149–4158.
  11. Lee C.-M., Wang Y.S. A prediction method of the acoustical properties of multilayered noise control materials in standing wave-duct systems // Journal of Sound and Vibration. Academic Press, - 2006. - Vol. 298, N 1–2. - P. 350–365.
  12. Lee C.-M., Xu Y. A modified transfer matrix method for prediction of transmission loss of multilayer acoustic materials // Journal of Sound and Vibration. - 2009. - Vol. 326, N 1–2. - P. 290–301.
  13. ISO 10534: 1998, Acoustics – Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes – Part 2: Transfer-function method.
  14. ASTM E1050 – 10: 2010, Standard test method for impedance and absorption of acoustical materials using a tube, two microphones and a digital frequency analysis system.
  15. Bardakhanov S.P. [et al.] Nanopowder production based on technology of solid raw substances evaporation by electron beam accelerator // Materials Science and Engineering: B. - 2006. - Vol. 132, N 1–2. - P. 204–208.
  16. Gaponenko V.R., Bardakhanov S.P., Trufanov D.Yu. Influence of temperature on the properties of free loaded inorganic oxide nano powders // Steklo i Keramika. - Vol. 96, N 10 (2023) - P. 10-20