

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.075.02,
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО
УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ ИНСТИТУТА МАШИНОВЕДЕНИЯ ИМ. А.А. БЛАГОНРАВОВА
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РФ, ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЁНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА
ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК**

аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 23.12.2025 г., протокол № 25-7

О присуждении Карпову Ивану Андреевичу, гражданину РФ, учёной степени кандидата технических наук.

Диссертация «Разработка метода экспериментального определения коэффициента потерь колебательных систем на основе дискретного ARMA-моделирования» по специальности 1.1.7. Теоретическая механика, динамика машин (технические науки) принята к защите 14 октября 2025 года (протокол №25-5) Диссертационным советом 24.1.075.02, созданным на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, 119334, г. Москва, ул. Бардина д.4, приказ о создании № 1330/нк от 24.10.2022 г.

Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой решена научная задача, имеющая значение для научного направления «Механика и машиностроение» отрасли Технических наук в части создания новых методов решения проблемы снижения шума и вибраций машин и конструкций.

Целью диссертационной работы является разработка нового метода экспериментального определения коэффициента потерь, применимого к сложным инженерным системам, в частности, сильно демпфированным колебательным системам.

Соискатель Карпов Иван Андреевич, 1996 года рождения. Окончил в 2020г. Московский Государственный университет им. М.В. Ломоносова (МГУ) по направлению 03.04.02 «Физика», магистр.

С 2020г. по 2024г. учился и закончил аспирантуру в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук по направлению подготовки 09.06.01 – «Информатика и вычислительная техника» направленности (специальности) 1.2.2. – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ». Работает в должности младшего научного сотрудника в отделе теоретической и прикладной акустики в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук.

Диссертация выполнена в отделе теоретической и прикладной акустики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН. Принята к предварительному рассмотрению в диссертационный совет 24.1.075.02 – 16.09.2025 (Протокол № 25-3), принята к защите 14.10.2025 (Протокол № 25-5). Текст диссертации, представленной в диссертационный совет, идентичен тексту диссертации, размещённой на сайте ИМАШ РАН 12.08.2025.

Научный руководитель работы - **Бобровницкий Юрий Иванович**, доктор физико-математических наук, заведующий отделом Теоретической и прикладной акустики ФГБУН «Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук».

Официальные оппоненты:

Цукерников Илья Евсеевич, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории «Защита зданий от вибраций и структурного шума» ФГБУ «Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук» (НИИСФ РААСН);

Канев Николай Георгиевич, доктор физико-математических наук, научный сотрудник Теоретического отдела АО «Акустический институт им. академика Н.Н. Андреева» (АКИН).

Ведущая организация – **ФАУ «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского» (ЦАГИ)** г. Москва.

Ведущая организация и оппоненты назначены на заседании диссертационного совета 24.1.075.02 14 октября 2025 г. (Протокол № 25-5 от 14.10.2025).

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывался их широкой известностью своими достижениями в данной отрасли науки, направлениями их научных исследований, наличием публикаций по выполненным исследованиям, близким к проблеме работы соискателя, и, таким образом, способностью определить научную и практическую ценность диссертации, а также отсутствием совместных проектов, печатных работ.

Результаты выполненных исследований в полной мере отражены автором **в 15 печатных работах, в том числе в 3 статьях** в рецензируемых научных журналах, индексируемых в Web of Science, и 12 статьях и публикациях в сборниках докладов/тезисов конференций, индексируемых в РИНЦ.

1) *Карпов И.А., Бобровницкий Ю.И.* Экспериментальный метод определения потерь энергии в колебательных системах, основанный на ARMA-моделировании // Акустический журнал. – 2025. – Т. 71. – № 2. – С. 155–175.

DOI: 10.31857/S0320791925020018 URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=82356290>

2) *Бобровницкий Ю.И., Карпов И.А.* Дискретная акустика: ARMA-моделирование временных процессов, теория // Акустический журнал. – 2023. – Т. 69. – № 6. – С. 665–684. DOI: 10.31857/S0320791923600671.

URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=55850053>.

Переводная версия:

Bobrovnikskii Y.I., Karpov I.A. Discrete acoustics: ARMA-modeling of time processes, theory // Acoustical Physics. – 2023. – V. 69. – № 6. – P. 749–767. DOI: 10.1134/S106377102360095X

URL: <https://link.springer.com/article/10.1134/S106377102360095X>. [WoS, Q2].

3) *Карпов И.А., Гребенников А.С., Ким. А.А.* Применение параметрического моделирования случайных процессов для определения потерь в линейных колебательных системах. // Известия РАН. Серия физическая. – 2021. – Т. 85. – № 6. – С. 889–894.

DOI: 10.31857/S0367676521060120. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=45795001>

Перевод:

Karpov I.A., Grebennikov A.S., Kim A.A. Application of autoregressive moving average modeling of random processes to identify the loss factor of linear oscillatory systems // Acoustical Physics. – 2021. – V. 67. – № 6. – P. 694–699.

DOI: 10.1134/S1063771021330034

URL: <https://link.springer.com/article/10.1134/S1063771021330034>. [WoS, Q2]

4) Бобровницкий Ю.И., Томилина Т.М., Бахтин Б.Н., Гребенников А.С., Асфандияров Ш.А., Карпов И.А., Ким А.А. Лабораторная установка для исследования звукопоглощающих покрытий из метаматериалов при скользящем распространении звука и влияние типа источника на их эффективность // Акустический журнал. – 2020. – Т. 66. – № 3. – С. 332–341. DOI: 10.31857/S0320791920030016 URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42636195>

Перевод:

Bobrovnikskii Y.I., Tomilina T.M., Bakhtin, B.N., Grebennikov A.S., Asfandiyarov S.A., Karpov I.A., Kim A.A. Laboratory experimental facility for studying metamaterial sound-absorbing duct linings with grazing sound propagation and how the type of source influences their efficiency // Acoustical Physics. – 2020. – V. 66. – № 3. – P. 324–332.

DOI: 10.1134/S106377102003001X. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=43285180>

На диссертацию и автореферат поступили следующие отзывы:

Отзыв Ведущей организации – ФАУ «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского» (ЦАГИ), г. Москва. В своем положительном отзыве, составленном начальником НИЦ аэроакустики проф., д.ф.-м.н. Копьевым Виктором Фелексовичем, старшим научным сотрудником, доцентом к.ф.-м.н. Демьяновым Матвеем Александровичем, начальником отдела д.т.н. Голубевым Алексеем Юрьевичем и ведущим научным сотрудником, д. ф.-м. н. Зверевым Александром Яковлевичем, а также утверждённом директором, член-корр. РАН К.И. Сыпало, указано, что исследование выполнено на высоком научно-техническом уровне, решает актуальные задачи механики и акустики. Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, соответствующей специальности 1.1.7. Теоретическая механика, динамика машин (технические науки). Автором разработан метод экспериментального определения коэффициентов потерь в механических колебательных системах. Научные

результаты, представленные к защите, являются новыми. Они достаточно полно опубликованы в научной литературе и представлены на ведущих научно-технических конференциях. Автореферат корректно отражает содержание диссертации.

Диссертационная работа «Разработка метода экспериментального определения коэффициента потерь колебательных систем на основе дискретного ARMA-моделирования» полностью удовлетворяет требованиям ВАК РФ, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук, а её автор, Карпов Иван Андреевич, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.1.7. Теоретическая механика, динамика машин (технические науки).

К диссертационной работе имеется несколько замечаний:

1) Глава 2 пункт 2.2 страница 35 в тексте перед формулой 2.18b опечатка: "или после подстановки значений (1.9a)". Должно быть так: или после подстановки значений (2.9a).

2) Глава 2 пункт 2.3.2 страница 45. Финальная фраза:

"Проверено, что, исключив из векторов состояния x и y вторую компоненту (скорость), из этих уравнений можно получить все соотношения, приведенные в п.2.2.1." Опечатка. Следуя тексту, имеется в виду в п. 2.3.1., в данном разделе рассматриваются сложные системы (со многими частотами).

3) Опечатка в результатах главы 2 на странице 51: "взаимно обозначенное соответствие". Должно быть: взаимно однозначное соответствие.

4) Глава 3 пункт 3.2. в последнем абзаце не ясен смысл предложения: "На рис. 3.16 также хорошо видно, что теоретическое значение порядка (3.3) не является наилучшим, т.к. $ES(6, 6) = 0.107$." Не ясно является ли обозначение (3.3) ссылкой на формулу или порядком применяемой модели.

5) Глава 3 пункт 3.3 страница 59 после фразы "Минимизируя квадратичную невязку системы (3.7), равную" в формуле, не имеющей обозначения, лишний символ транспонирования.

6) Глава 4, пункт 4.2. страница 66. Фраза: "(см. рис. 3, где эти кривые практически неразличимы)". В диссертации отсутствует рисунок 3.

7) Заключение к главе 5 оформлено нестандартно, отличается от предыдущих глав (называется Выводы, а не Заключение к главе 5).

8) Стоит отметить, что список литературы составлен не в алфавитном порядке. В частности, из-за этого появились две ссылки [24], [95] на одну книгу (Скучик Е. Простые и сложные колебательные системы), причем указано разное количество страниц (558, 552).

9) В качестве преимущества разработанного метода для сильно затенпфированных конструкций автором представлено сравнение результатов расчетов, полученных по предложенной модели с результатами, полученными методом полуширины резонансного пика. Однако существуют другие методы определения коэффициента потерь - по диаграмме Найквиста, метод Шредера и др., нацеленные на изучение сильно затенпфированных конструкций. Сравнение выполненных автором расчетов с результатами, определенными такими методами, являлось бы обоснованием необходимости разработки новой модели.

В отзыве отмечено, что приведенные замечания не влияют на высокую оценку диссертации в целом, а носят рекомендательный характер

Отзыв официального оппонента Цукерникова Ильи Евсеевича, д.т.н., проф., главного научного сотрудника лаборатории «Защита зданий от вибраций и структурного шума» ФГБУ «Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук» (НИИСФ РААСН)
В своем **положительном отзыве** на диссертацию он сделал следующие замечания:

1. Целью диссертационной работы является разработка метода измерения коэффициента потерь, применимого к сильно демпфированным системам. Но при очень сильном демпфировании собственные частоты системы становятся мнимыми, и привычное понятие колебательной моды теряет смысл. Однако в работе об этом не сказано ничего. Осталось неясным, будет ли работать в этом случае предложенный метод. Если будет, то, что он будет измерять?

2. Одним из основных результатов работы является предложенный в ней ЕС критерий адекватности ARMA-моделей. Насколько мне известно, из теории идентификации систем, существует целый ряд аналогичных критериев адекватности.

Чем ЕС критерий отличается от известных критериев? Почему они не устраивают автора?

3. При использовании аббревиатуры от английского наименования термина, как, в энергетическом ЕС критерии, следует приводить английский термин перед или сразу после аббревиатуры при первом ее применении.

4. В тексте диссертации и автореферата имеются опечатки, неточности и нечеткие формулировки. Они не требуют специальных пояснений, поэтому были оформлены отдельным списком и переданы автору диссертации.

Перечисленные замечания, однако, носят лишь рекомендательный характер и не умаляют отмеченных выше достоинств, научной и практической значимости выполненной работы.

Отзыв официального оппонента Канева Николая Георгиевича д.ф.-м.н., научного сотрудника Теоретического отдела АО «Акустический институт им. академика Н.Н. Андреева» (АКИН). В своем **положительном** отзыве на диссертацию сделаны следующие замечания:

1. В разделе 1.2 сила введена как скалярная величина, хотя это вектор. Необходимы пояснения, как выбирается направление приложения силы.
2. На рис. 3.1 по горизонтальным осям отложены величины AR и MA , однако количественно в тексте они не определены, а используются как аббревиатуры.
3. Из текста следует, что рис. 3.1 относится к расчету линейной системы с тремя степенями свободы. Однако неясно, этот результат справедлив для некоторой конкретной системы или является универсальным.
4. В заключительном абзаце раздела 5.1 неплохо было бы привести сравнительные оценки длительности сигнала, необходимого для реализации предложенного метода и альтернативных методов, для некоторых примеров.
5. В работе отдельно не выделен случай кратных мод. Как в этом случае работает метод? Можно ли дополнительно к собственной частоте выяснить порядок кратной моды?
6. С ростом частоты плотность мод колебательных систем, как правило, возрастает и иногда довольно стремительно. Наверняка у метода есть ограничения, связанные с плотностью мод – при некотором ее значении разрешающая способность метода должна падать. Но в диссертации анализ этого вопроса отсутствует.

Имеющиеся замечания не влияют на положительную оценку диссертационной работы и не снижают ее новизну, степень обоснованности и достоверности научных положений, теоретическую и практическую значимость.

На автореферат поступили **5** отзывов:

- **положительный отзыв от профессора кафедры экологии и промышленной безопасности МГТУ им. Н.Э. Баумана д.т.н. Комкина Александра Ивановича со следующими замечаниями:**

1. На представленных на рис. 2 графиках не даны пояснения к обозначениям осей.

2. На рис. 2 и 3 отмечены оптимальное значение параметров модели, но остается не ясным какой критерий оптимальности при этом используется.

3. На стр. 14 автореферата приведены частотные характеристики колебательной системы при силовом и кинематическом возбуждении, но при этом не указано отношения каких величин определяют эти частотные характеристики.

4. На стр. 21 приведена схема лабораторной установки, содержащей волновод динамик, как источник звука, и измерительные микрофоны. При этом входной сигнал мог регистрироваться либо ближайшим к динамику микрофоном, либо установленном на динамике акселерометром. Непонятно утверждение автора, что первый случай соответствует силовому возбуждению системы, а второй случай – кинематическому. Отмеченные замечания не уменьшают значимости представленной работы.

- **положительный отзыв от Пономарчук Екатерины Максимовны, кандидата физико-математических наук, младшего научного сотрудника кафедры медицинской физики физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова. Отмечены некоторые замечания к работе:**

- в качестве одной из задач, решаемых в работе, указан поиск «простого» метода построения ARMA-модели, что является недостаточно точной формулировкой для постановки одной из задач диссертационной работы.

- Формулировка методологии исследования могла бы выиграть от более подробного перечисления «стандартной акустической аппаратуры и стандартных методов обработки данных»;

- было бы также полезным указать ссылки на литературные источники при упоминании «известных» и «общепризнанных» фактов в разделе «Содержание диссертации»;

- стоит отметить не совсем корректное использование в автореферате понятия «критерий» для обозначения величины ЕС: критерием адекватности модели скорее можно было бы назвать условие достижения минимума величины ЕС;

- из текста автореферата остался неосвещенным вопрос выбора рабочего диапазона частот, упоминаемого на стр. 13;

- в качестве общего комментария стоит отметить недостаточную формальность стиля написания текста автореферата, некоторую непоследовательность в использовании терминов и сокращений (например, MATLAB и Matlab, PSD и СПМ, и др.), а также наличие опечаток и орфографических и пунктуационных ошибок. Перечисленные замечания, однако, носят лишь уточняющий характер и не умаляют достоинств и научной значимости выполненной работы.

- положительный отзыв от Митронова Михаила Арсеньевича, к. ф.-м. н., доцента, начальника теоретического отдела АО «Акустический институт имени акад. Н.Н. Андреева» содержит ряд вопросов, касающихся экспериментов с импедансной:

- Рис.11, стр. 22 - Непонятно, почему на микрофоне 1 отсутствуют резонансные пики. Казалось бы, микрофон 1 должен также давать резонансные пики. Какой акустический импеданс динамика? От него зависит, какого типа резонатор этот волновод – четвертьволновой или полуволновой. Судя по картинке 11б) – это полуволновой резонатор. По оценкам это именно так. Нижняя резонансная частота 221.7 Гц, половина длины волны равна 0.767 м, а длина волновода 0.7 м. С учетом концевых поправок получается хорошее совпадение.

-Почему коэффициент потерь не увеличивается с увеличением частоты? Потери вызваны излучением из открытого конца волновода. По известным формулам добротность обратно пропорциональна номеру продольного резонанса. При этом на рисунке автореферата добротность примерно постоянна на всех частотах.

-Почему в модели импедансной трубы не проявляется существенный элемент конструкции – излучающий динамик?

- положительный отзыв на автореферат от Ерофеева Владимира Ивановича, д. ф.-м. н, профессора, директора Института проблем машиностроения РАН. Отзыв без замечаний.

- положительный отзыв от Директора Института космических исследований РАН, академика РАН, д.ф.-м.н. А. А. Петруковича и Научного руководителя эксперимента «БТН-Нейтрон», заведующего отделом №63 ИКИ РАН д.ф.-м.н. И.Г. Митрофанова. К незначительному критическому замечанию к диссертационной работе можно отнести использование в ее названии термина «ARMA- моделирование». Этот термин имеет очень широкое применение в разных областях математики и инженерной науки и не является однозначно определенным. Уверен, что научный руководитель соискателя вполне мог бы предложить отечественный аналог этого термина с однозначным значением.

Соискателем выполнены:

1. Разработка (т.е. научное обоснование, выявление основных свойств и особенностей, а также экспериментальная проверка) нового экспериментального метода определения коэффициента потерь произвольных линейных механических и акустических колебательных систем.

2. Сформулирован критерий эквивалентности дискретной и непрерывной моделей колебательной системы: они должны иметь одинаковые решения во все дискретные моменты времени. На основе этого критерия для нескольких непрерывных моделей системы (модели в пространстве состояний, модели черного ящика) построены соответственные дискретно-временные модели, конечно-разностные уравнения и их решения.

3. Получены аналитические соотношения между коэффициентами дифференциальных уравнений непрерывных моделей и коэффициентами соответственных конечно-разностных уравнений дискретных моделей; эти соотношения позволяют однозначно строить дискретно-временную модель системы по известной непрерывной модели и, наоборот, непрерывную модель по дискретной.

4. Теоретически показано, что дискретная ARMA-модель системы с N степенями свободы, совершающей вынужденные колебания под действием

кинематического возбуждения, имеет порядок $(2N, 2N)$, а под действием силового возбуждения – порядок $(2N, 2N - 1)$.

5. Сформулирован энергетический критерий адекватности ARMA-моделей. Без этого критерия предложенный метод не мог бы считаться законченным и надежным, т. к. с его помощью определяется оптимальный порядок ARMA-модели и оценивается точность моделирования.

6. С помощью компьютерных и трех лабораторных экспериментов установлены основные свойства предложенного метода – универсальность, широкая область применимости, максимально возможный динамический диапазон измерения, высокая точность, простота, экономичность.

7. Создан комплекс Matlab программ, необходимых для проведения численных и лабораторных экспериментов предложенным методом.

Практическая значимость работы:

1. Измерение коэффициента потерь сложных инженерных конструкций позволяет проводить уточненные расчеты их шума и вибраций, прочности и долговечности, прогнозировать ресурс.

2. Измерение точных значений коэффициента потерь метаматериальных поглотителей используется для проектирования новых эффективных методов борьбы с шумом и вибрацией в изделиях ракетно-космической техники и самолетостроения.

Личный вклад соискателя:

Все изложенные в диссертации оригинальные результаты получены лично автором либо при его участии. Полученные результаты обсуждались совместно с научным руководителем. Автором лично продумывались и планировались описанные в работе численные и лабораторные эксперименты, выполняемые далее либо самостоятельно автором, либо совместно с сотрудниками лаборатории. Автором разработан комплекс программ для проведения численных и лабораторных экспериментов, а также для обработки полученных результатов. Автор принимал участие в написании оригинального текста публикаций по представленным в данной диссертации результатам.

Диссертационный совет отмечает, что в ходе защиты диссертации не было высказано критических замечаний, которые ставили бы под сомнение

обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, их достоверность и новизну.

В диссертации все заимствованные материалы представлены со ссылкой на автора и (или) источник заимствования, и не обнаружены результаты работ, выполненных соискателем в соавторстве, без ссылок на соавторов.

Диссертация представляет собой законченную научно – квалификационную работу, которая содержит новые ценные научные результаты, свидетельствующие о большом личном вкладе соискателя в науку. Автором диссертации выполнены требования п. 14 Положения о присуждении учёных степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года №842 (ред. 16 октября 2024 г.).

Тема и содержание диссертации Карпова Ивана Андреевича соответствуют паспорту научной специальности 1.1.7 «Теоретическая механика, динамика машин (технические науки)» по следующим пунктам направлений исследований:

п.3. «Теория колебаний механических систем»;

п.5. «Управление движением, наблюдаемость и идентификация механических систем»;

п.13. «Динамика систем, состоящих из абсолютно твердых и деформируемых тел, в том числе машин, приборов и конструкций»;

п.14. «Математическое и компьютерное моделирование кинематики и динамики механических систем, в том числе машин, приборов и их элементов при динамических, статических, тепловых и других видах воздействий»;

п.15. «Экспериментальное исследование динамики систем тел, в том числе летательных аппаратов, машин, приборов и конструкций (только технические науки)».

На заседании присутствовало 15 членов Диссертационного совета из 18 человек, входящих в его состав. Дополнительно введенных в состав 0 человек. При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 14 человек, из них 13 докторов наук, 1 кандидат наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, проголосовали «за» 14 человек, «против» 0 человек, недействительных бюллетеней 0.

Диссертационный совет 24.1.075.02 на заседании 23.12.2025 принял решение присудить **Карпову Ивану Андреевичу** ученую степень кандидата технических наук за разработку нового метода экспериментального определения коэффициента потерь, применимого к сложным инженерным системам, в частности, сильно демпфированным колебательным системам. (Единогласно).

Заместитель председателя диссертационного совета
член-корреспондент РАН, д.т.н., профессор



Л.Е. Украинский

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат технических наук
«23» декабря 2025 г.



Г.Н. Гранова