

УДК: 534.4
OECD: 01.03.AA

Акустический метод диагностирования механических систем

Мурзинов В.Л.^{1*}, Мурзинов П.В.², Мурзинов Ю.В.³, Кочерженко Д.В.⁴

¹ Профессор ^{2,3} Доцент ⁴ Аспирант

^{1,2,3,4} Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, РФ

Аннотация

Показана возможность использования акустического метода для диагностирования состояния механической системы. Предполагается, что любая механическая система в процессе функционирования издает различные звуки. Источниками этих звуков могут быть механические элементы, а также потоки жидкости и газа. Звуковые потоки, исходящие от исследуемой механической системы, воспринимает акустический датчик, после которого выполняется преобразование акустического сигнала в электрический сигнал. В основе конструктивного решения устройства акустического датчика лежит понятие аускультации. Рассмотрены различные способы и устройства аускультации. Отмечены достоинства и недостатки существующих в настоящее время устройств аускультации. Показано применение вакуумной прослойкой для эффективной защиты от влияния внешних звуковых потоков на исследуемый поток. Рассмотрены датчики без вакуумной прослойки и датчики, использующие вакуумную прослойку. Акустический датчик объединяет два понятия: аускультацию и вакуумную прослойку.

Ключевые слова: акустический датчик, метод диагностирования, механическая система, вакуумная прослойка, аускультация.

Acoustic method of diagnosing mechanical systems

Murzinov V.L.^{1}, Murzinov P.V.², Murzinov Yu.V.³, Kocherzhenko D.V.⁴*

¹ Professor ^{2,3} Associate Professor ⁴ Postgraduate student

^{1,2,3,4} Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract

The possibility of using an acoustic method to diagnose the condition of a mechanical system is shown. It is assumed that any mechanical system emits various sounds during operation. The sources of these sounds can be mechanical elements, as well as liquid and gas flows. The sound streams emanating from the mechanical system under study are perceived by an acoustic sensor, after which the acoustic signal is converted into an electrical signal. The design solution of the acoustic sensor device is based on the concept of auscultation. Various methods and devices of auscultation are considered. The advantages and disadvantages of currently existing auscultation devices are noted. The use of a vacuum interlayer for effective protection against the influence of external sound flows on the studied flow is shown. Sensors without a vacuum layer and sensors using a vacuum layer are considered. An acoustic sensor combines two concepts: auscultation and a vacuum layer.

Keywords: *acoustic sensor, diagnostic method, mechanical system, vacuum layer, auscultation.*

Введение

Современное производство насыщено различными видами оборудования, которые непрерывно функционируют, выполняя требуемые функции. Останов этого оборудования по каким-либо причинам нежелателен. Однако возникают ситуации, когда происходит неожиданно разрушение некоторых элементов по причине интенсивного износа. Происходит авария и останов большого числа единиц оборудования. Производство несет материальные и временные потери. Однако эти аварийные ситуации можно исключить, применив один из видов мониторинга или диагностирования. Это может быть плановый останов оборудования, разбор механических элементов и их дефектация с последующей заменой или восстановлением. Но если после останова анализ состояния механических элементов покажет, что они находятся в нормальном состоянии, то это приведет к дополнительным материальным затратам.

Но эту ситуацию можно улучшить, применив бесконтактный метод диагностирования. Этот метод позволяет установить состояние работающего оборудования и, в случае подтверждения его работоспособности, продолжить эксплуатацию. Этим методом, как показывает практика, является акустический метод. Например, для контроля характеристик в процессе эксплуатации силовых трансформаторных подстанций применяют акустический метод [1, 2], при котором трансформаторные подстанции в процессе диагностирования продолжают обеспечивать подачу силового напряжения.

Существует проблема – это появление микротрещин в металле. При этом внешне металл выглядит нормально, но небольшая нагрузка приводит к мгновенному разрушению целостности металла. Как показывает практика, в процесс образования микротрещин они издадут очень слабый звук, который можно уловить преобразователем [3, 4] в процессе акустического мониторинга, и таким образом предотвратить аварию.

Акустический метод позволяет оценить качество сварных соединений. Использование акустической структуроскопии для сварных соединений паропроводов и барабанов котлов длительно работающего металла оборудования тепловых электростанций показано в работе [5].

Так же применяют акустические методы в голографическом преобразователе, позволяющем в условиях наличия шумов и помех применять устройство акустической эмиссии для контроля [6].

Находит применение акустический метод, построенный на основе метода аускультации, который применяется в медицине для диагностирования человека [7, 8]. Принимая очень тихие звуки от функционирующих органов человека, дается заключение о состоянии этих органов.

Метод аускультации впервые был применен французским ученым Рене Лаэннеком (1781-1826), который был талантливым клиницистом, патологоанатомом и преподавателем в медицинской школе в Париже.

В Воронежском государственном техническом университете проводились научно-исследовательские работы по созданию акустического датчика для проведения неразрушающего способа мониторинга работающего оборудования атомных станций [9]. В основе акустического датчика лежит конструктивное решение уплотнителя звукового потока, используемого аппарате аускультации [10]. Эффективность уплотнителя звукового потока заключается в том, что уплотнение происходит с помощью параболических отражательных поверхностей, которые были построены с помощью методики предложенной в работе [11]. Построенная конструкция из параболических отражателей исключает наличие областей с сингулярностью в звуковом потоке. Поэтому

получаемая акустическая информация обладает высоким качеством.

Однако конструкция акустического датчика [9], применяемая для оборудования атомных станций, имеет некоторые недоработки. Сам датчик находится снаружи исследуемого оборудования и подвергается воздействию внешнего акустического поля. Звуки внешнего акустического поля попадают через стенки датчика в его внутреннюю полость, смешиваются со звуковым потоком, исходящим от механических элементов оборудования. Таким образом, внешнее акустическое поле создает помехи. Полученная звуковая гамма попадает в анализатор и далее в компьютер, где регистрируется полученная звуковую информацию и выдается решение. Решение может быть не верным, и принимаемые действия могут быть ошибочными. Если внешнее акустическое поле обладает более высоким уровнем звука, тогда эффективность датчика заметно снижается, а иногда может вообще перестать выдавать правильный результат. Внешнее акустическое поле иногда выдает резкие высокоуровневые звуки, которые система контроля может принять за исследуемые звуки механических элементов оборудования и определить их как наличие в них дефекта в процессе работы оборудования. При этом дается команда на останов оборудования и выполняется его разборка. Но оказывается, что элемент исправен. Получается ошибка диагностирования. В связи этим появляется проблема по защите датчика от внешнего акустического поля.

1. Постановка задачи

Разработанный авторами уплотнитель звукового потока [10], является основанием для создания акустического датчика. Положительный результат конструкции уплотнителя звукового потока заключается в том, что получаемая информация о звуковом потоке является качественной. Поэтому акустический датчик [9] будет обрабатывать звуковой поток, находящийся в своей внутренней полости, качественно. Но наличие помех со стороны внешнего акустического поля создаст ложную информацию об исследуемом объекте. Следовательно, эффективность акустического датчика снижается. Поэтому для получения эффективной работы акустического датчика необходимо решить проблему по защите акустического датчика от звуковых потоков, исходящих от внешнего акустического поля. В качестве защиты можно применить вакуумную прослойку, которая является непреодолимым препятствием для звуковых волн.

2. Описание основных конструктивных решений

Общий вид промышленного оборудования и установленного на нем акустического датчика представлен на рисунке 1. Акустический датчик 2 крепится на поверхности действующего оборудования 1 и воспринимает звуковые потоки от механических элементов.

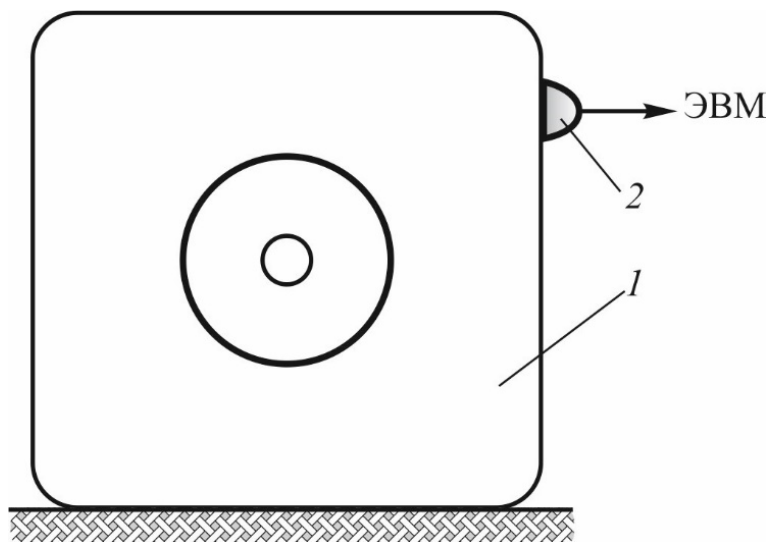


Рис. 1. Общий вид оборудования с акустическим датчиком. 1 – промышленное оборудование; 2 – акустический датчик

На рисунке 2 более подробно показан акустический датчик, который укреплен на поверхности 1 работающего промышленного оборудования. К основным элементам конструктивной схемы относятся такие построения, как параболический отражатель 2, уменьшенный параболический отражатель 3, опора 4. При этом в параболическом отражателе 2 выполнено центральное отверстие 5. Фокусы параболических отражателей совпадают между собой и находятся в точке 6. Центральное отверстие 5 соединено с виброакустическим датчиком 7. Схематично изображены звуковые потоки W_c , исходящие от конструктивных элементов работающего технологического оборудования и звуковые потоки W_q , исходящие от внешнего акустического поля.

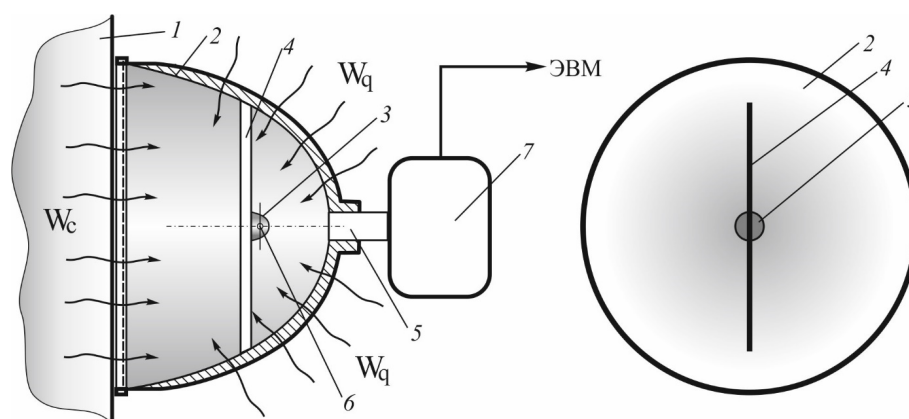


Рис. 2. Общий вид акустического датчика. 1 – стенка промышленного оборудования; 2 – параболический отражатель; 3 – уменьшенный параболический отражатель; 4 – опора; 5 – центральное отверстие; 6 – фокус параболических отражателей; 7 – виброакустический датчик. W_c – исследуемый звуковой поток; W_q – внешний звуковой поток (помеха)

В работе [9] показан механизм функционирования параболических отражателей, направленный на формирование уплотненного звукового потока. Плоский звуковой поток от стенки 1 промышленного оборудования направляется на параболический отражатель 2, который отражает его в соответствии с законом лучевой теории и направляет в

точку фокуса 6. В этой точке располагается фокус уменьшенного параболического отражателя 3, на который попадет звуковой поток от параболического отражателя 2. Отражаясь от поверхности уменьшенного параболического отражателя 3, звуковой поток формируется в уплотненный плоский звуковой поток в соответствии законами лучевой теории и направляется в центральное отверстие 5. Через это отверстие 5 акустический сигнал попадает в виброакустический датчик 7 и далее в ЭВМ. Но в виброакустический датчик 7 попадает так же информация от внешнего акустического поля. Здесь потоки W_c и W_q смешиваются во внутренней полости акустического датчика и поступают на виброакустический датчик 7. Следовательно, суммарный звуковой поток ($W_c + W_q$) содержит кроме полезной информации о техническом состоянии оборудования, содержит поток звуков, содержащих информацию о наличии ошибок от внешнего акустического поля. Таким образом, внешнее акустическое поле вносит большую погрешность в результаты диагностирования, поэтому может быть выдано ошибочное заключение о наличии дефекта в техническом устройстве.

3. Защита от внешнего акустического поля

Защита от внешнего акустического поля может быть реализована за счет применения вакуумной прослойки. Идея использовать вакуум для защиты от звука была предложена Эрвином Майером [12] еще 1937 году. Однако вакуумированные конструкции широкого распространения не получили из-за низкой эффективности. Причиной этому были акустические мостики между плоскими стенками конструкции, между которыми создавался вакуум. Акустические мостики всегда присутствуют в вакуумированных конструкциях в виде контактных зон между стенками.

Однако задача устранения акустических мостиков между стенками вакуумированной конструкции была решена. Была разработана конструкция противошумных наушников [13], в которой реализован принцип магнитного отталкивания параллельных стенок. Отталкивание стенок происходит за счет постоянных магнитов, укрепленных на стенках. Между стенками создается вакуум. Атмосферное давление стремится прижать стенки конструкции друг к другу, но этому препятствуют постоянные магниты, схема расположения которых на параллельных стенках одинаковая [14]. В результате этого конструктивного решения контактных зон между стенками нет.

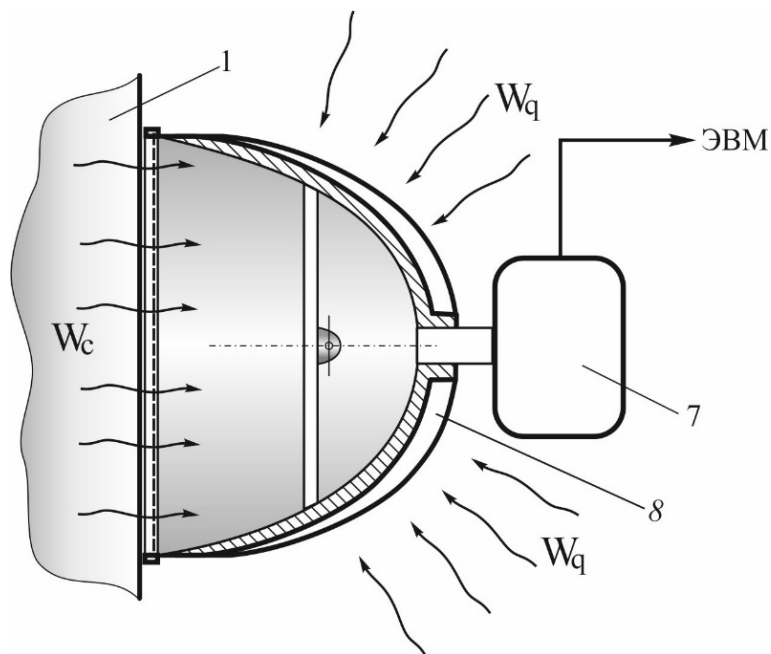


Рис. 3. Схема конструкции акустического датчика с вакуумной прослойкой. 1– стенка промышленного оборудования; 7 – виброакустический датчик; 8 – вакуумная прослойка

Благодаря такому конструктивному решению над акустическим датчиком устанавливается вакуумная прослойка 8, что показано на рис. 3. Вакуумная прослойка 8 преграждает движение звуковому потоку W_q , исходящему от внешнего акустического поля и не позволяет ему попасть во внутренний объем акустического датчика. Поэтому виброакустический датчик 7 воспримет информацию только звукового потока W_c , поступающего от стенки 1 промышленного оборудования и содержащего качественную информацию о техническом состоянии этого оборудования.

Виброакустический датчик 7 является составной частью электронной схемы, показанной на рис. 4. Эта электронная схема реализует метод акустического диагностирования и работает следующим образом. Плоский звуковой поток, исходящий от работающего промышленного оборудования попадает в акустический датчик 1, в котором формируется уплотненный акустический поток, представляющий собой акустический сигнал. Этот сигнал подается в виброакустический датчик 2, где происходит преобразование акустического сигнала в электрический. Более конкретно, виброакустическим датчиком 2 могут быть следующие устройства ICP (IEPE), DeltaTron, ISOTRON. Эти устройства могут сформировать электрический сигнал для реализации на анализаторе 3 (прибор А19-У2). С этим прибором можно проводить измерение акустических характеристик при непрерывной диагностике работающего оборудования. Прибор А19-У2 выдает спектр, обработкой которого занимается программный комплекс «Бесконтактная диагностика технологического оборудования». Программный комплекс включает нейросетевой процессор 5, который обрабатывает полученный спектр и формирует результат для автоматизированной рабочей станции 6. Таким образом, выполняется анализ только звукового потока, исходящего от механизмов промышленного оборудования. Влияние внешнего акустического поля отсутствует.

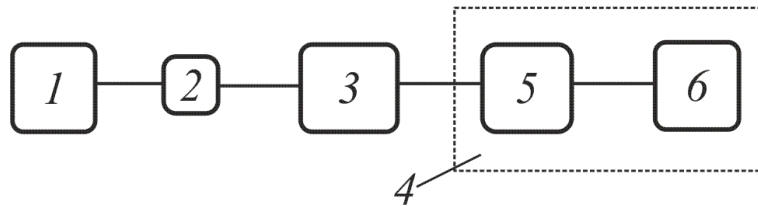


Рис. 4. Электронная схема анализатора звукового потока, исходящего от акустического датчика. 1 – акустический датчик; 2 – виброакустический датчик (ICP (IEPE), DeltaTron, ISOTRON); 3 – анализатор звукового потока (A19-U2); 4 – программный комплекс «Бесконтактная диагностика технологического оборудования»; 5 – нейросетевой процессор обработки звукового сигнала; 6 – автоматизированная рабочая станция

Заключение

Таким образом, предложен один из вариантов защиты звукового потока от внешних источников звука, исходящего от элементов работающего диагностируемого оборудования, посредством вакуумной прослойки на корпусе акустического датчика, что может способствовать оптимизации контроля и подготовке методик информативного диагностирования.

Список литературы

1. Еркебаев А.Ж. Контроль технического состояния силовых трансформаторов методом акустического диагностирования // Мир транспорта. 2022. Т. 20. № 1 (98). С. 13-22.
2. Хлебцов, А. П. Анализ состояния износа электрооборудования подстанций и методы диагностирования аварийных режимов / А. П. Хлебцов, Л. Х. Зайнутдинова // Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. – 2019. – № 2(27). – С. 17-20. – EDN YXXOEF.
3. Пискарев В.Д. Неразрушающий контроль остаточного ресурса металлических деталей и узлов для объектов машиностроения // Технология легких сплавов. 2011. № 1. С. 81-85.
4. Неразрушающий контроль качества металла паровых турбин. Современное состояние и перспективы / Н. В. Быкова, Н. В. Абабков, А. Н. Смирнов, И. С. Быков // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2015. – № 4(110). – С. 45-53. – EDN UCUGMT.
5. Критерии оценки технического состояния длительно работающего металла оборудования ТЭС на основе акустической структуроскопии / А. Н. Смирнов, Н. В. Абабков, В. В. Муравьев, С. В. Фольмер // Дефектоскопия. – 2015. – № 2. – С. 44-51. – EDN TZKEEH.
6. Кравчина, М. В. Голографический преобразователь сложных акустических сигналов / М. В. Кравчина, А. В. Окопная, Н. М. Пчелинцев // Modern Science. – 2021. – № 9-2. – С. 210-213. – EDN HXMNMU.
7. Патент № 206389 РФ. Устройство для дистанционной аускультации пациентов / Э. Э. Абдурозиков. – Оpubл. 08.09.2021 – EDN UWTVLI.
8. Патент № 2685813 РФ. Устройство для широкодиапазонной аускультации / Р. Копт, Б. Д. Iii, С. Р. Дж Iii – Оpubл. 23.04.2019. – EDN DSONZO.

9. Мурзинов В.Л. Бесконтактное диагностирование работающего автоматизированного технологического оборудования / В. Л. Мурзинов, Ю. В. Мурзинов, П. В. Мурзинов, Д. В. Кочерженко // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2023. – Т. 19, № 3. – С. 23-27. – DOI 10.36622/VSTU.2023.19.3.004. – EDN KVVVKA.
10. Патент 192449 РФ. 17.09.2019. Устройство уплотнителя звукового потока для аускультации / Мурзинов В.Л., Мурзинов П.В., Мурзинов Ю.В. и др. – Оpubл. – Бюл. № 26.
11. Мурзинов, В. Л. Моделирование формы звукоотражающей поверхности для получения заданного звукового поля / В. Л. Мурзинов, С. В. Попов, Ю. В. Татарина // Noise Theory and Practice. – 2019. – Т. 5, № 2(16). – С. 14-19. – EDN RUTE0Z.
12. Meyer E. Versuche uber Körperschalleitung (Schallbrücken), Akustische Zeitschrift, № 2, 1937.
13. Патент 194893 Российская Федерация, МПК А61F 11/06. Противошумные наушники [Текст] / Мурзинов В.Л., Мурзинов П.В., Мурзинов Ю.В., Попов С.В., Татарина Ю.В. Заявка – № 2019133021; опубл. 26.12.2019 Бюл. № 36.
14. Мурзинов В.Л. Защита от шума на путях его распространения с использованием вакуумной прослойки / Мурзинов В.Л., Мурзинов П.В., Мурзинов Ю.В. // Безопасность жизнедеятельности. 2021. № 08 (248). С. 13-15.

References

1. Yerkebaev A.J. Control of the technical condition of power transformers by acoustic diagnostics // The world of transport. 2022. Vol. 20. No. 1 (98). pp. 13-22.
2. Khlebtsov, A. P. Analysis of the state of wear of substation electrical equipment and methods of diagnosing emergency modes / A. P. Khlebtsov, L. H. Zainutdinova // Energy and resource conservation: industry and transport. – 2019. – № 2(27). – Pp. 17-20. – EDN YXXOEF.
3. Piskarev V.D. Non-destructive testing of the residual life of metal parts and assemblies for mechanical engineering facilities // Technology of light alloys. 2011. No. 1. pp. 81-85.
4. Non-destructive quality control of steam turbine metal. The current state and prospects / N. V. Bykova, N. V. Ababkov, A. N. Smirnov, I. S. Bykov // Bulletin of the Kuzbass State Technical University. – 2015. – № 4(110). – Pp. 45-53. – EDN UCUGMT.
5. Criteria for assessing the technical condition of long-term working metal of TPP equipment based on acoustic structroscopy / A. N. Smirnov, N. V. Ababkov, V. V. Muravyov, S. V. Vollmer // Flaw detection. - 2015. – No. 2. – pp. 44-51. – EDN TZKEH.
6. Kravchenko, M. V. Holographic converter of complex acoustic signals / M. V. Kravchenko, A.V. Okopnaya, N. M. Pchelintsev // Modern Science. – 2021. – No. 9-2. – pp. 210-213. – EDN HXMNMU.
7. Patent No. 206389 of the Russian Federation. A device for remote auscultation of patients / E. E. Abdurozikov. – Published 08.09.2021 – EDN UWTVLI.
8. Patent No. 2685813 of the Russian Federation. Device for wide-range auscultation / R. Кopt, B. D. Iii, S. R. J. Iii - Publ. 04/23/2019. – EDN DSONZO.
9. Murzinov V.L. Contactless diagnostics of working automated technological equipment / V. L. Murzinov, Yu. V. Murzinov, P. V. Murzinov, D. V. Kocherzhenko // Bulletin of the Voronezh State Technical University. – 2023. – Vol. 19, No. 3. – pp. 23-27. – DOI 10.36622/VSTU.2023.19.3.004. – EDN KVVVKA.

10. Patent 192449 of the Russian Federation. 17.09.2019. The device of the sound flow sealer for auscultation / Murzinov V.L., Murzinov P.V., Murzinov Yu.V. et al. – Publ. – Byul. No. 26.

11. Murzinov, V. L. Modeling the shape of a reflective surface to obtain a given sound field / V. L. Murzinov, S. V. Popov, Yu. V. Tatarinova // Noise Theory and Practice. – 2019. – Vol. 5, No. 2(16). – pp. 14-19. – EDN RUTEOZ.

12. Meyer E. Versuche uber Korperschalleitung (Schallbrucken), Akustische Zeitschrift, № 2, 1937.

13. Patent 194893 Russian Federation, IPC A61F 11/06. Anti-noise headphones [Text] / Murzinov V.L., Murzinov P.V., Murzinov Yu.V., Popov S.V., Tatarinova Yu.V. Application - No. 2019133021; publ. 12/26/2019 Issue No. 36.

14. Murzinov V.L. Protection from noise on the ways of its propagation using a vacuum layer / Murzinov V.L., Murzinov P.V., Murzinov Yu.V. // Life safety. 2021. No. 08 (248). pp. 13-15.