

УДК: 534.6

OECD: 01.03.AA

Аппроксимация промышленного предприятия с множественными источниками как плоского источника шума

Васильев А.П.^{1*}, Буторина М.В.², Васильева А.В.³¹Старший преподаватель, ²Д.т.н., доцент, профессор кафедры, ³К.т.н., доцент кафедры^{1,2,3}Кафедра «Техносферная безопасность и вычислительная механика»,

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ»

им. Д.Ф. Устинова, г. Санкт-Петербург, РФ

Аннотация

В статье рассматривается проблема повышения точности акустического моделирования промышленных объектов. Авторы указывают на ключевое ограничение действующей расчетной методики (ГОСТ 31295.2), которая оперирует лишь точечными источниками шума, что приводит к значительным погрешностям при расчете распределенных источников и необходимостью работать с сложными цифровыми моделями. В качестве решения предлагается принципиально новая методика, рассматривающая все предприятие или его технологическую площадку как единый плоский источник шума или несколько плоских источников. Разработанный подход позволяет устранить необходимость физически неадекватной дискретизации, снижает вычислительную нагрузку и демонстрирует лучшую сходимость с результатами натурных измерений по сравнению с традиционными методами. Теоретической основой метода служат положения СП 51.13330 и ГОСТ 31297. Статья включает описание методики сбора и предварительной обработки исходных данных, методологию отбора значимых источников шума и результаты апробации методики на реальном промышленном объекте.

Ключевые слова: промышленный шум, плоский источник шума, звуковая волна, звуковая мощность, внешний шум

Approximation of an Industrial Plant with Multiple Sources as a Planar Noise Source

Vasilev A.P.^{1*}, Butorina M.V.², Vasileva A.V.³¹Senior lecturer, ²D.Sc., Associate Professor, Professor of the Department,³Ph.D. Associate Professor of the Department^{1,2,3}Department of Environmental Engineering and Computational Mechanics,
Baltic State Technical University 'VOENMEH', St. Petersburg, Russia

Abstract

This article addresses the challenge of enhancing the accuracy of acoustic modeling for industrial facilities. The authors identify a key limitation of the current standardized calculation method (GOST 31295.2), which only utilizes point sound sources. This approach leads to significant inaccuracies when modeling distributed noise sources and necessitates the use of complex digital models. As a solution, a fundamentally new methodology is proposed, which conceptualizes an entire industrial plant or its key technological areas as a single flat sound source or multiple flat sources. The developed approach eliminates the

*E-mail: vasilev_ap@voenmeh.ru (Васильев А.П.)

need for physically inadequate discretization, reduces computational load, and demonstrates better agreement with field measurement results compared to traditional methods. The theoretical foundation of the method is based on the provisions of SP 51.13330 and GOST 31297. The article includes a description of the methodology for collecting and pre-processing initial data, the procedure for selecting significant noise sources, and the results of testing the method on a real industrial site.

Keywords: industrial noise, flat noise source, sound wave, sound power, external noise

Введение

Акустическое воздействие промышленных объектов представляет собой глобальную экологическую проблему. Согласно руководству по вопросам шума в окружающей среде Всемирной организации здравоохранения европейского региона [1], длительное воздействие повышенных уровней шума, в том числе промышленного, является вторым по значимости экологическим риск-фактором для здоровья населения после загрязнения воздуха. Это приводит к строгому ужесточению международных и национальных нормативов, что, в свою очередь, увеличивает риски для предприятий, включая финансовую ответственность и приостановку эксплуатации.

Ключевым инструментом для прогнозирования и снижения акустического воздействия является математическое моделирование процессов распространения шума на местности с последующей разработкой шумозащитных мероприятий. В Российской Федерации методика расчета распространения шума на местности регламентирована ГОСТ 31295.2 [2]. Фундаментальное ограничение этой методологии заключается в том, что она оперирует исключительно точечными источниками звука.

На практике это означает, что сложные распределенные источники шума (ИШ), характерные для промышленных предприятий (кровли цехов, площадки с оборудованием, протяженные системы вентиляции), должны быть дискретизированы – представлены в виде множества точечных эквивалентов. Даже современное специализированное ПО, позволяющее пользователю графически задавать линейные и плоские объекты, в основе своих алгоритмов проводит именно такую аппроксимацию. Данная процедура не является физически адекватной, что служит источником систематических погрешностей, особенно для крупногабаритных плоских излучателей, где ошибки в расчете интерференционных и дифракционных эффектов могут быть значительными [3].

В качестве альтернативы предлагается гипотеза о целесообразности моделирования всего промышленного предприятия или его ключевых технологических площадок в качестве единого протяженного источника шума (линейного или плоского). Теоретической базой для данного подхода служат действующие нормативные документы СП 51.13330 [4], который регламентирует определение суммарной шумовой характеристики предприятия на границе его территории как единого показателя и ГОСТ 31297 [5], устанавливающий методику измерения эквивалентного уровня звуковой мощности предприятия как целостного объекта.

На основе этой гипотезы опираясь на подходы, рассмотренные в [6] была разработана методика, которая позволяет рассматривать производственное предприятие с множественными источниками шума в качестве плоского источника и выполнять расчет распространения шума от такого источника с большей сходимостью с результатами измерений по сравнению с действующими методиками расчета. Таким образом, разрабатываемый метод направлен на создание физически более корректной и менее требовательной к вычислительным ресурсам модели, устраняющей необходимость в

искусственной дискретизации и позволяющей проводить как точное моделирование в программном обеспечении, так и упрощенные инженерные оценки.

Одной из сложностей при реализации поставленной задачи в случаях, когда отсутствует возможность провести измерения уровней звуковой мощности предприятия по действующей методике ГОСТ 31297 [5], например, на этапе проектирования нового производственного объекта, является разработка методики по определению звуковой мощности предприятия.

1 Разработка расчетного метода по определению уровня звуковой мощности предприятия с множественными источниками шума

Выполнение расчета уровня звуковой мощности плоского источника можно разделить на 4 последовательных задачи:

- 1) инвентаризация источников шума на предприятии, их систематизация и определение номенклатуры источников, которые целесообразно учитывать при выполнении дальнейших расчетов;
- 2) определение линейных параметров плоского источника и его суммарной площади;
- 3) оценка влияния эффектов экранирования шума от источников строениями и конструкциями, расположенными на территории предприятия;
- 4) оценка влияния высоты источников, в том числе высоты площадок, на которых расположены источники шума, кровли зданий, фасады с вентиляционными установками и т.д.

Протяженные линейные источники, расположенные не на площадке плоского источника, должны учитываться отдельно от плоского источника и соответственно должен выполняться отдельный расчет распространения шума от данных линейных источников с последующим суммированием звуковой энергии в расчетной точке.

Наиболее удобным методом по определению уровня звуковой мощности плоского источника, который представлен набором точечных источников, располагающихся на ограниченной площади, является метод энергетического суммирования уровней звуковой мощности данных точечных источников. В качестве исходных данных по акустическим характеристикам оборудования необходимо принимать измеренные уровни звуковой мощности в октавных полосах со среднегеометрическими частотами в диапазоне от 31,5 до 8000 Гц или акустические характеристики, представленные в паспортах и эксплуатационной документации на оборудование [6].

Определение линейных размеров плоского источника шума базируется на принципе подбора наименьшей площадки правильной формы (прямоугольник или многоугольник простой формы), которая будет включать в себя все плоскости и естественные площадки, с расположенными на них значимыми источниками шума, наиболее часто это кровли всех строений, на которых располагаются значимые источники звука (вентиляционные системы, выпуски технологического оборудования, градирни) [5].

Учет всех источников шума при выполнении расчетов нецелесообразен, так как вклад многих источников в формирование звукового поля даже на малом удалении от предприятия пренебрежимо мал и приведет только к усложнению расчетной модели. К источникам шума, которые целесообразно включать в расчет уровня звуковой мощности предприятия, относятся источники с наибольшими уровнями звуковой мощности.

Путем простых вычислений можно определить, что при рассмотрении выборки источников шума для ситуации, когда уровень звуковой мощности (УЗМ) 99 % источников меньше чем у источника с наибольшими УЗМ на 30 дБ, то вклад этих

источников при энергетическом суммировании УЗМ всех источников будет составлять 0,4 дБ, а если предположить, что доля таких источников составляет 98 %, а оставшиеся 2 % имеют равные уровни звуковой мощности, то вклад этих 98 % источников сократится до 0,2 дБ, при доле источников с УЗМ на 30 дБ больше чем у остальных в размере 3-5 % от общего числа, вклад оставшихся 97-95 % источников при наихудшей ситуации сократится до 0,1 дБ, а при большем количестве источников с высокими УЗМ величина вклада будет составлять менее 0,1 дБ. Результаты анализа приведены на рисунке 1.

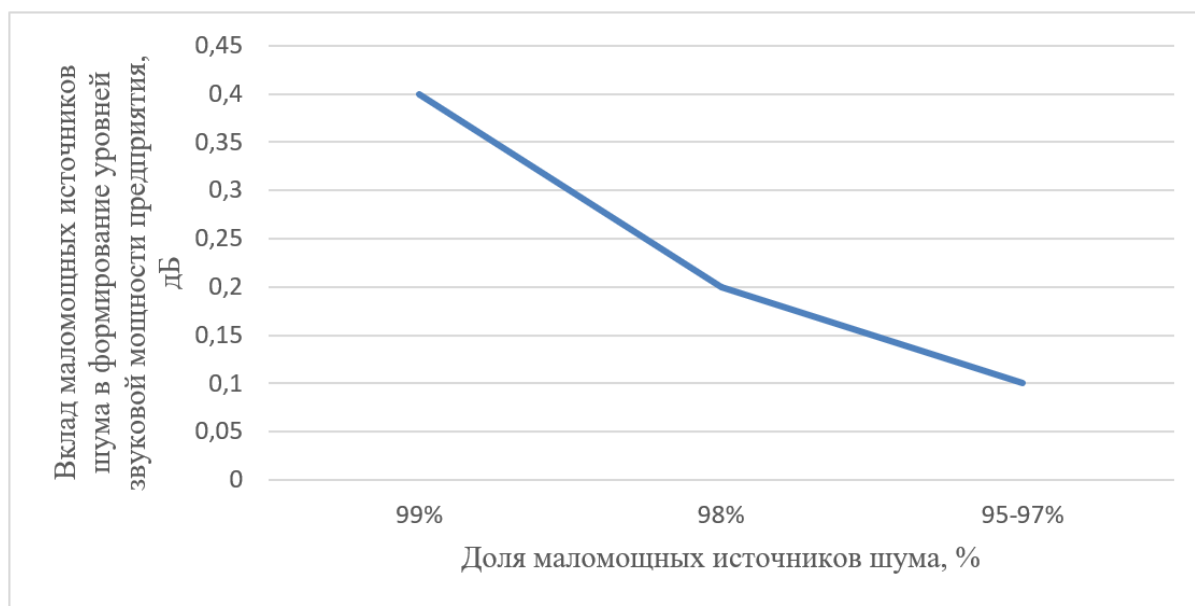


Рисунок 1 – График изменения вклада (при энергетическом суммировании УЗМ) источников шума, УЗМ которых на 30 дБ меньше, чем уровни наиболее мощного источника шума

При рассмотрении аналогичной выборки, где разница по УЗМ между источником с наибольшими УЗМ и остальными сокращается до 20 дБ, при доле источников с УЗМ с наибольшими уровнями в 1 %, вклад оставшихся 99 % источников составит 3 дБ, т.е. половину звуковой энергии, при доле источников с наибольшими УЗМ в 10 %, вклад остальных 90 % составляет 0,4 дБ, а с ростом доли источников с наибольшими УЗМ до 50 % вклад остальных источников снижается до менее 0,1 дБ. Результаты анализа приведены на рисунке 2.

Таким образом правила выбора источников шума на территории предприятия, которыми допускается пренебречь при расчёте уровней звуковой мощности предприятия описываются следующим образом:

точечные источники, уровни звуковой мощности которых как минимум на 30 дБ ниже уровней звуковой мощности наиболее мощного источника на рассматриваемой площадке,

точечные источники, уровни звуковой мощности которых как минимум на 20 дБ ниже уровней звуковой мощности группы наиболее мощных источников, при условии, что доля наиболее мощных источников (с превышением УЗМ > 20 дБ над остальными источниками шума) составляет 10 % и более от общего количества ИШ.

В качестве высоты расположения плоского источника шума в предложенном методе принимается характеристическая высота всех значимых источников шума на предприятии, которая определяется в соответствии с [5] по формуле:

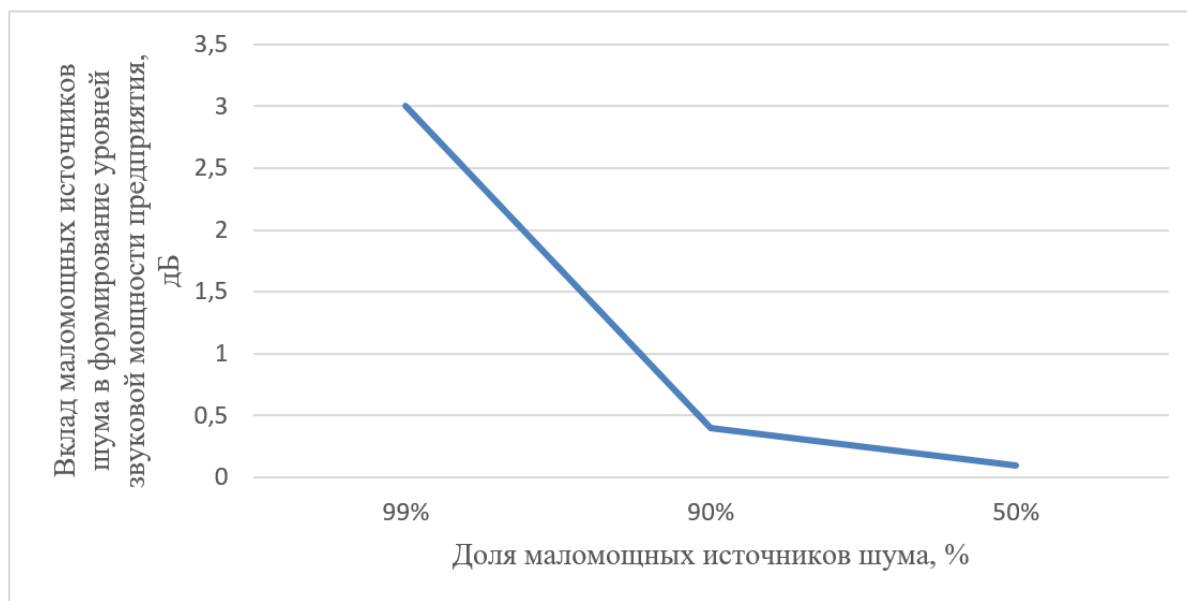


Рисунок 2 – График изменения вклада (при энергетическом суммировании УЗМ) источников шума, уровни звуковой мощности которых на 20 дБ меньше, чем уровни группы наиболее мощных источников

$$H = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n h_{k, \text{м}}, \quad (1)$$

где n – количество источников шума, h_k – высота акустического центра k -го источника шума, м. Если положение акустического центра неизвестно, то в качестве него принимают среднюю точку источника шума.

Если на предприятии имеются высокие источники шума, т.е. высота данных источников значительно отличается от характеристической высоты предприятия (в 2 и более раз) и если вследствие экранирования и/или характеристик направленности этих источников нет возможности корректно учесть их влияние на результирующий уровень звуковой мощности предприятия, то целесообразно оценить распространение шума от этих источников отдельно с выполнением операции энергетического суммирования в расчетной точке.

2 Натурные измерения и реализация предложенной методики определения уровня звуковой мощности предприятия

Для проверки предложенной методики определения уровней звуковой мощности предприятия были проведены натурные измерения уровней звукового давления и уровней звука источников шума на территории промышленного предприятия.

Эксперимент включает в себя три основных этапа:

проведение инвентаризации источников шума на территории предприятия;

измерение уровней звукового давления и уровней звука всех источников шума, расположенных на территории предприятия, а также определение их уровней звуковой мощности;

анализ шумовых характеристик источников шума, расположения источников шума по отношению друг к другу и к расчетным точкам, отбор значимых источников и расчет итоговой звуковой мощности промышленного предприятия по предложенной методике.

Инвентаризация источников шума на предприятии выявила 129 источников шума, представленных преимущественно технологическим оборудованием (элементы вентиляционных систем, приводные элементы норий, конвейерное оборудование), а также передвижными источниками шума: авто- и железнодорожным транспортом (маневровый локомотив) и выполнения технологических операций погрузки и разгрузки.

Измерения производились с помощью поверенной измерительной системы 1 класса точности на базе шумомера-виброметра, анализатора спектра «ЭКОФИЗИКА-110А» с предусилителем Р200 и микрофоном ВМК-205. До и после проведения измерений была выполнена проверка калибровки измерительного тракта с применением акустического калибратора АК-1000.

Измерения шумовых характеристик оборудования производились по методике измерений, разработанной на основе МИ ПКФ 12-006 [7], с учетом отдельных рекомендаций методик измерений, изложенных в ГОСТ Р ИСО 3744 и ГОСТ Р ИСО 3746 [8]-[9]. В каждой точке измерений производилось не менее 3 измерений, продолжительность каждого измерения подбиралась исходя из анализа режимов работы оборудования, но при этом была не менее 20 с [8].

Измеряемыми параметрами были уровни звукового давления в октавных полосах со среднегеометрическими частотами в диапазоне от 31,5 до 8000 Гц, а также для оперативной оценки и сравнения источников шума между собой эквивалентный и максимальный уровни звука. Затем руководствуясь подходом, реализованным в [8]-[9], выполнялось определение уровней звуковой мощности отдельных источников шума.

При наличии технических и организационных возможностей в наиболее репрезентативных точках измерений вблизи каждой из единиц оборудования производились измерения фоновых уровней шума и выполнялась коррекция измеренных уровней звукового давления на фоновый шум. Однако, ввиду особенностей технологического процесса и непрерывного режима работы оборудования на предприятии, измерения фонового шума были возможны только при измерениях шума от систем транспортировки сыпучих материалов на предприятии (конвейерное оборудование и нории), а также автомобильного и железнодорожного транспорта [10]-[11]. Также, ввиду отсутствия возможности отключения источников шума на территории предприятия, не выполнялась оценка свойств испытательного пространства и соответственно не выполнялась корректировка результатов измерений на свойства испытательного пространства при определении уровней звуковой мощности источников шума.

По результатам анализа измеренных и рассчитанных параметров было выявлено, что эквивалентные скорректированные по А уровни звуковой мощности источников шума, расположенных на территории предприятия лежат в диапазоне от 63 до 114 дБА. При реализации предложенной методики учета значимых источников шума из дальнейшей обработки был исключен 121 источник шума, из них 97 – источники, УЗМ которых были на 30 дБ меньше, чем у источника с наибольшей звуковой мощностью, и 24 источника шума с УЗМ на 20 дБ ниже, чем у группы наиболее мощных источников.

Все значимые источники шума данного предприятия располагаются на кровлях строений, а характеристическая высота источников шума предприятия составила 25 метров.

Влияния эффектов экранирования источников шума при воздействии предприятия на прилегающие территории не выявлено.

Также методом энергетического суммирования оставшихся значимых источников шума был рассчитан итоговый уровень звуковой мощности плоского источника звука [12], аппроксимированного из точечных источников на территории предприятия, определяемый по формуле:

$$L_{w, \text{ИШ}} = 10 \lg \sum_{i=1}^n 10^{0,1 \cdot L_{w,i}}, \text{ дБ}, \quad (2)$$

где $L_{w,i}$ – уровень звуковой мощности i -го точечного ИШ, дБ.

Рассчитанные уровни звуковой мощности для рассматриваемого предприятия представлены в таблице 1.

Таблица 1 – уровни звуковой мощности плоского источника звука

Уровни звуковой мощности L_W , дБ в октавных полосах со среднегеометрическими частотами частот, Гц									Эквивалентный корректированный уровень звуковой мощности L_{WA} , дБА
31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
113,8	115,0	116,5	113,2	113,9	110,3	104,7	99,4	94,6	118,5

Заключение

В ходе исследования были выполнены экспериментальные исследования шумовых характеристик источников шума.

Разработана методика аппроксимации промышленного предприятия с множественными источниками шума как плоского источника шума.

Проведен расчет уровня звуковой мощности плоского источника шума по предложенной методике. Результаты расчета подтвердили возможность применения, предложенного в [3] метода для расчета распространения шума на местности.

Список использованных источников

1. Руководство по вопросам шума в окружающей среде Всемирной организации здравоохранения европейского региона: региональное отделение ВОЗ для Европы, штаб-квартира ООН, Мармореж 51, 2100 Копенгаген, Дания. – 2018.
2. ГОСТ 31295.2-2005 (ИСО 9613-2:1996) Шум. Затухание звука при распространении на местности. Часть 2. Общий метод расчёта - М.: Стандартинформ, 2006. - 23 с.
3. Буторина М.В., Васильев А.П., Васильева А.В. Расчет распространения внешнего шума промышленного предприятия // Noise Theory and Practice. – 2025. – Т. 11, № 3. – С. 32-42.
4. Свод правил СП 51.13330.2011 «Защита от шума» Актуализированная редакция СНиП 23-03-2003 // Техэксперт : [Электронный ресурс]. - URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200084097> (дата обращения 29.07.2025).
5. ГОСТ 31297-2005 (ИСО 8297:1994) Шум. Технический метод определения уровней звуковой мощности промышленных предприятий с множественными источниками шума для оценки уровней звукового давления в окружающей среде - М.: Стандартинформ, 2006. - 18 с.
6. Буторина М.В. Картирование шума транспорта на территории городской застройки - Санкт-Петербург : БГТУ, 2020. - 224 с. - ISBN 978-5-907324-15-2.
7. МИ ПКФ-12-006 Однократные прямые измерения уровней звука, звукового давления и вибрации приборами серий Октава и Экофизика. Методика измерений.

Приложение к руководствам по эксплуатации ПКДУ.411000.03РЭ, ПКДУ.411000.005РЭ, ПКДУ.411000.010РЭ, ПКДУ.411000.003РЭ, ПКДУ.411000.001РЭ (АВНР.411171.007РЭ), ПКДУ.411000.001.02РЭ, ПКДУ.411000.001.03РЭ, ПКДУ.411000.002.01РЭ, РЭ 4381-003-76596538-06, РЭ 4381-002-76596538-05, РЭ 4277-002-76596538-05. Редакция 17 (Издание 2024 года) // Техэксперт : [Электронный ресурс]. - URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200130437> (дата обращения 20.10.2025).

8. ГОСТ Р ИСО 3744-2013 Акустика. Определение уровней звуковой мощности и звуковой энергии источников шума по звуковому давлению. Технический метод в существенно свободном звуковом поле над звукоотражающей плоскостью // Техэксперт : [Электронный ресурс]. - URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200108155> (дата обращения 20.10.2025).

9. ГОСТ Р ИСО 3746-2013 Акустика. Определение уровней звуковой мощности и звуковой энергии источников шума по звуковому давлению. Ориентировочный метод с использованием измерительной поверхности над звукоотражающей плоскостью // Техэксперт : [Электронный ресурс]. - URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200107816> (дата обращения 20.10.2025).

10. Кузнецова Е.Б., Булавина И.Д. О необходимости учета фонового шума при определении границ санитарно-защитной зоны // Здоровье - основа человеческого потенциала: проблемы и пути их решения. – 2020. – Т. 15, № 1. – С. 365-372.

11. Пономарев А.Л., Уланова Т.С., Молок О.А., Одегов А.А. Метод измерения шума и оценка вклада крупного промышленного предприятия в шумовую обстановку селитебной территории // Здоровье населения и среда обитания - ЗНиСО. – 2022. – Т. 30, № 12. – С. 59-65. – DOI 10.35627/2219-5238/2022-30-12-59-65.

12. Иванов Н.И. Инженерная акустика. Теория и практика борьбы с шумом: учебник для вузов - Изд. 4-е, перераб. и доп. - М. : Логос, 2015. - 431 с. - ISBN 978-5-98704-659-3.

References

1. Environmental noise guidelines for the European Region: WHO Regional Office for Europe, UN City, Marmorvej 51, DK-2100 Copenhagen, Denmark. – 2018.

2. GOST 31295.2-2005 (ISO 9613-2:1996) Noise. Attenuation of sound during propagation outdoors. Part 2. General method of calculation - М.: Standartinform, 2006. – 23 p.

3. Butorina M.V., Vasilev A.P., Vasileva A.V. Prediction of external noise propagation from an industrial plant // Noise Theory and Practice. – 2025. – D. N. 11, № 3. - P. 32-42.

4. Code of rules SP 51.13330.2011 'Noise protection' Updated version of SNiP 23-03-2003 // Techexpert : [Electronic resource]. - URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200084097> (date of reference 29.07.2025).

5. GOST 31297-2005 (ISO 8297:1994) Noise. Engineering method of determination of sound power levels of multisource industrial plants for evaluation of sound pressure levels in the environment - М.: Standartinform, 2006. – 18 p.

6. Butorina M.V. Mapping of transport noise in urban areas - St. Petersburg : BSTU, 2020. - 224 p. - ISBN 978-5-907324-15-2.

7. MI PKF-12-006 Single direct measurements of sound levels, sound pressure and vibration using Octava and Ekofizika series instruments. Measurement Procedure. Appendix to the Operational Manuals ПКДУ.411000.03РЭ, ПКДУ.411000.005РЭ, ПКДУ.411000.010РЭ, ПКДУ.411000.003РЭ, ПКДУ.411000.001РЭ (АВНР.411171.007РЭ),

ПКДУ.411000.001.02РЭ, ПКДУ.411000.001.03РЭ, ПКДУ.411000.002.01РЭ, РЭ 4381-003-76596538-06, РЭ 4381-002-76596538-05, РЭ 4277-002-76596538-05. Revision 17 (2024 Edition) // TechExpert: [Electronic resource]. - URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200130437> (accessed 20.10.2025).

8. GOST R ISO 3744-2013 Acoustics. Determination of sound power levels and sound energy levels of noise sources using sound pressure. Engineering methods for an essentially free field over a reflecting plane // TechExpert: [Electronic resource]. - URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200108155> (accessed 20.10.2025).

9. GOST R ISO 3746-2013 Acoustics. Determination of sound power levels and sound energy levels of noise sources using sound pressure. Survey method using an enveloping measurement surface over a reflecting plane // TechExpert: [Electronic resource]. - URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200107816> (accessed 20.10.2025).

10. Kuznetsova E.B., Bulavina I.D. On the need to account for background noise when determining the boundaries of a sanitary protection zone // Health - the basis of human potential: problems and solutions. – 2020. – D. N. 15, № 1. – P. 365-372.

11. Ponomarev A.L., Ulanova T.S., Molok O.A., Odegov A.A. A method for measuring noise and assessing the contribution of a large industrial enterprise to the noise environment of a residential area // Population health and habitat - ZNiSO. – 2022. – Vol. 30, No. 12. – P. 59-65. – DOI 10.35627/2219-5238/2022-30-12-59-65.

12. Ivanov N.I. Engineering acoustics. Theory and practice of noise abatement: textbook for Universities - 4th Ed., revised. and add. - M. : Logos, 2015. - 431 p. - ISBN 978-5-98704-659-3.