

УДК

DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2024-7-??-??>

Х.А. ЩИРЖЕЦКИЙ<sup>1</sup>, канд. техн. наук (a021069@yandex.ru);  
А.В. ПЕРЕТОКИН<sup>2</sup>, инженер (ap@pistra.ru)

<sup>1</sup> Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН (127238, г. Москва, Локомотивный пр., 21)

<sup>2</sup> ООО «Проектный Институт Строительной Акустики» (115054, г. Москва, ул. Новокузнецкая, 33, стр. 2)

## К вопросу возможности аналитического расчета уровня шума на спортивных аренах

*При акустическом проектировании современных спортивно-зрелищных сооружений разработка комплекса мероприятий по обеспечению в них условий акустического комфорта базируется на последовательном расчете мероприятий по защите от шума и акустической отделке помещения. При этом расчеты средств защиты от шума направлены на выполнение требований по звукоизоляции ограждающих конструкций и борьбы с шумами от работы инженерного оборудования. Однако даже полное достижение допустимых уровней шума от всех указанных источников является необходимым, но далеко не достаточным условием полного обеспечения приемлемых условий акустического комфорта в спортивно-зрелищном сооружении в части шумовой нагрузки публики во время проведения различных мероприятий. Произведен анализ реальной шумовой обстановки на спортивно-зрелищных сооружениях различного функционального назначения, воздушного объема и вместимости. Показано, что при массовом заполнении спортивно-зрелищных сооружений зрителями, при проведении в них спортивных или концертно-развлекательных мероприятий шумовой фон определяется преимущественно так называемым «человеческим фактором», который формируется активным акустическим участием зрителей, спортсменов, артистов и персонала в процессе проведения мероприятия. На основании представлений статистической и геометрической теорий формирования звуковых полей разработаны аналитические методы расчета реальных уровней шума в закрытых, полукрытых и открытых спортивно-зрелищных сооружениях.*

**Ключевые слова:** шум, защита от шума, архитектурная акустика, индекс фанатской поддержки, спортивно-зрелищные сооружения, спортивные арены, акустический комфорт.

**Для цитирования:** Щиржецкий Х.А., Перетокин А.В. К вопросу возможности аналитического расчета уровня шума на спортивных аренах // *Жилищное строительство*. 2024. № 7. С. 00–00.

DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2024-7-00-00>

Kh.A. SHCHIRZHETSKII<sup>1</sup>, Candidate of Sciences (Engineering) (a021069@yandex.ru); A.V. PERETOKIN<sup>2</sup>, Engineer (ap@pistra.ru)

<sup>1</sup> Scientific-Research Institute of Building Physics of RAACS (21, Lokomotivnyi Driveway, Moscow, 127238, Russian Federation)

<sup>2</sup> Design Institute of Building Acoustics LLC (33, bldg. 2, Novokuznetskaya Street, Moscow, 115034, Russian Federation)

### On the Issue of the Possibility of Analytical Calculation of the Noise Level in Sports Arenas

In the acoustic design of modern sports and entertainment facilities, the development of a set of measures to ensure acoustic comfort conditions in them is based on the consistent calculation of measures to protect against noise and acoustic finishing of the room. At the same time, calculations of noise protection means are aimed at meeting the requirements for sound insulation of enclosing structures and noise control from the operation of engineering equipment. However, even the complete achievement of acceptable noise levels from all these sources is a necessary, but far from sufficient condition for fully ensuring acceptable acoustic comfort conditions in a sports and entertainment facility in terms of the noise load of the public during various events. The analysis of the real noise situation at sports and entertainment facilities of various functional purposes, air volume and capacity is carried out. It is shown that when sports and entertainment facilities are massively filled with spectators, when sports or concert and entertainment events are held in them, the noise background is mainly determined by the so-called "human factor", which is formed by the active acoustic participation of spectators, athletes, artists and staff during the event. Based on the representations of statistical and geometric theories of the formation of sound fields, analytical methods for calculating real noise levels in closed, semi-open and open sports and entertainment facilities have been developed.

**Keywords:** noise, noise protection, architectural acoustics, fan support index, sports and entertainment facilities, sports arenas, acoustic comfort.

**For citation:** Shchirzhetskii Kh.A., Peretokin A.V. On the issue of the possibility of analytical calculation of the noise level in sports arenas. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2024. No. 7, pp. 00–00. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2024-7-00-00>

При акустическом проектировании современных спортивно-зрелищных сооружений (СЗС) разработка комплекса мероприятий по обеспечению в них условий акустического комфорта базируется, в соответ-

ствии с указаниями СП 415.1325800.2018. «Здания общественные. Правила акустического проектирования», на последовательном расчете мероприятий по защите от шума, акустической отделке помеще-

ния и систем озвучивания соответствующего объекта. При этом расчеты средств защиты от шума, производящиеся согласно СП 51.13330.2011. «Защита от шума» (Актуализированная версия СНиП 23-03-2000), направлены на выполнение требований по звукоизоляции ограждающих конструкций и борьбы с шумами от работы инженерного оборудования. Однако на практике даже полное достижение допустимых уровней шума от всех указанных источников является необходимым, но далеко не достаточным условием полного обеспечения в проектируемом СЗС приемлемых условий акустического комфорта в части шумовой нагрузки, создаваемой публикой во время проведения различных мероприятий.

Основной причиной такого положения является повышенный шумовой фон, источником которого является так называемый «человеческий» фактор, который фактически определяет общую шумовую обстановку при проведении спортивных или концертных программ в СЗС. Сложность этого фактора состоит в сочетании так называемых «организованных» и «неорганизованных» источников речевых сигналов, практически постоянно сопровождающих все мероприятия в СЗС. К первому из них относятся информационная речь дикторов и музыкальные фонограммы, которые сопровождают как спортивные мероприятия, так и различные концертно-развлекательные программы. Кроме того, практика последних лет показывает, что к организованным источникам речевых сигналов следует также относить и практически постоянно участвующих в формировании звукового фона проводимых мероприятий скандирования лозунгов фанатских групп (болельщиков), которые уже настолько прочно являются полноценными участниками каждого типа спортивных состязаний, что потребовалось логически обоснованное введение специального параметра его объективной оценки – индекса фанатской поддержки FSI, который по современным методикам акустического проектирования СЗС должен вводиться в акустические расчеты по достижению оптимумов известных акустических параметров (время реверберации, разборчивость речи, и др.), что нашло свое отражение в новой редакции свода правил СП 415.1325800.2023 [1], а также в работах [2–6].

В отличие от организованных источников речевых сигналов, подлежащих поддержке с помощью акустических мероприятий при проектировании СЗС, основными составляющими звукового фона, формируемого случайными речевыми сигналами, которые и составляют реальную шумовую нагрузку СЗС во время проведения различных состязаний или концертных программ, являются речевые контакты участников мероприятий и технического персонала и, главное, «свободное» общение публики на зрительских ме-

стах, тенденция к которому уже достаточно давно установилась в современных СЗС при проведении различных спортивных или общественно-концертных программ. Общение это имеет принципиально хаотичный характер, а, следовательно, может быть отнесено к квазистационарным случайным процессам.

### Расчет уровня шума в закрытых СЗС

На основании изложенного выше, в закрытых СЗС при анализе шумового фона, учитывая хаотичное распределение источников звука, может быть использована статистическая теория звуковых потоков. Расчет уровней реверберационно-шумового фона в закрытых объемах СЗС (например, дворцы спорта, физкультурные залы и др.), создаваемого массовым «неорганизованным» общением зрителей, может быть определен на основании следующей последовательности расчетных операций. Учитывая, что средняя плотность звукового поля, образуемого фоновым шумом  $\bar{\epsilon}_{ш}$ , даже при условии недостаточно однородного распределения звукопоглощения по ограждениям СЗС, вследствие множественного размещения отдельных источников звука в его объеме, может быть с достаточной степенью точности определена по среднему суммарному потоку интенсивности  $\bar{J}_{ш}$  в некоторой точке помещения [7–10]:

$$\bar{\epsilon}_{ш} = \frac{\bar{J}_{ш}}{c}, \quad (1)$$

где  $c$  – скорость звука.

Отсюда можно получить следующее выражение по среднему суммарному потоку интенсивности [11]:

$$\bar{J}_{ш} = \bar{\epsilon}_{ш} \cdot c \frac{4\bar{n}\bar{P}_{A1}}{A}, \quad (2)$$

где  $\bar{n}$  – среднее количество зрителей в СЗС во время проведения мероприятий (обычно принимается по нормативным указаниям по расчету времени реверберации, т. е. 70% общей численности [1, 2]);  $\bar{P}_{A1}$  – средняя акустическая мощность излучения одного зрителя;  $A$  – общий фонд звукопоглощения СЗС.

Если в соответствии с экспериментальными данными по средней акустической мощности «активной» речи  $\bar{P}_{A1} \approx 2 \cdot 10^{-3}$  Вт (Июфе В.К. Справочник по акустике. М.: Связь, 1979) перейти от абсолютных значений средней интенсивности звуковых потоков к уровням звукового давления шумового фона публики, то можно получить следующее выражение:

$$\begin{aligned} \bar{L}_{ш} &= 10 \lg \left\{ \frac{\bar{J}_{ш}}{J_{\text{порог}}} \right\} = 10 \lg \left\{ \frac{4\bar{n}\bar{P}_{A1}}{A J_{\text{порог}}} \right\} = \\ &= 10 \lg \bar{n} - 10 \lg A + 99 \text{ дБ}, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $J_{\text{порог}} = 10^{-12}$  Вт/м<sup>2</sup> – пороговое значение интенсивности звуковых потоков.

## Расчет уровня шума в полуоткрытых и открытых СЗС

В отличие от закрытых объемов, распределение звуковых потоков в полуоткрытых и открытых СЗС (стадионы, летние арены и т. п.) должно происходить в приближениях геометрической акустики как хаотичное сочетание в некоторой точке звукового поля различных прямых звуков от множества отдельных источников (зрителей), равномерно распределенных по площади зрительских мест. При этом, учитывая плотность рассадки зрителей при массовых мероприятиях, для проведения прикладных расчетов уровней шумового фона в открытых СЗС, были приняты следующие, с достаточной степенью точности приближенные к реальной акустической обстановке в таких условиях, допущения:

– в расчетах принято, также, как и для закрытых СЗС, «свободное» звуковое общение и высокая плотность рассадки зрителей по всем трибунам;

– исходя из этих условий, было принято, с учетом диаграммы направленности человеческих голосов [8, 10], и значительного поглощения площади трибун со зрителями, считать показательным определение уровня звука на трибунах как восприятие рассеянных прямых звуков и их первых отражений от всей площади.

Таким образом, в каждой  $i$ -й точке приема звукового фона на трибунах средняя интенсивность звуковых потоков  $\bar{J}_i$  определяется следующим образом:

$$\bar{J}_i = \bar{J}_{\text{пр}} + \bar{J}_{\text{пр}} (1 - \bar{\alpha}) = \bar{J}_{\text{пр}} (2 - \bar{\alpha}), \quad (4)$$

где  $\bar{J}_i$  – средняя интенсивность прямого звука;  $\bar{J}_{\text{пр}} (1 - \bar{\alpha})$  – средняя интенсивность рассеянного звука после первого отражения ( $\bar{\alpha}$  – средний коэффициент звукопоглощения СЗС).

В свою очередь, средняя интенсивность прямого звука рассеянного звукового поля, в соответствии с геометрическими представлениями, должна определяться по формуле, например [7]:

$$\bar{J}_{\text{пр}} = \frac{P_{\Lambda\Sigma}}{4\pi\bar{l}^2}, \quad (5)$$

где  $P_{\Lambda\Sigma} = \bar{n}\bar{P}_{\Lambda 1}$  – средняя мощность рассеянного звукового поля;  $\bar{l}$  – средний свободный пробег прямого звука между трибунами, который определяется по чертежам СЗС из расчета  $\bar{l} = (l_{\text{max}} + l_{\text{min}})/2$ .

Таким образом, используя для расчета те же исходные данные, как и при расчете формулы (3), после ряда выкладок можно получить следующее выражение для среднего уровня шумового фона публики в полуоткрытом и открытом СЗС:

$$\bar{L}_{\text{ш}} = 10 \lg \bar{n} - 20 \lg \bar{l} + 10 \lg (2 - \bar{\alpha}) + 82 \text{ дБ}, \quad (6)$$

где  $\bar{\alpha}$  – средний коэффициент звукопоглощения СЗС во время проведения мероприятий.

При этом, расчеты производятся из условий  $l_{\text{min}} \geq 1$  м, а для определения среднего коэффициента звукопоглощения должна быть использована формула:

$$\bar{\alpha} = (\bar{n}A_1 + \alpha_{\text{п}}S_{\text{п}})/S_{\text{общ}}, \quad (7)$$

где  $A_1$  – эквивалентное звукопоглощение на одного зрителя, сидящего на трибунах;  $\alpha_{\text{п}}$  и  $S_{\text{п}}$  – соответственно коэффициент звукопоглощения и площадь пола проектируемого СЗС.

Необходимо отметить, что, например, при трансформации кровли спортивной арены (стадиона) в режим закрытия верхнего проема, т. е. с закрытой крышей, для расчета среднего свободного пробега можно использовать известную формулу из [7]:

$$\bar{l} = \frac{4V}{S_{\text{общ}}}, \quad (8)$$

где  $V$  – общий воздушный объем закрытого СЗС;  $S_{\text{общ}}$  – общая площадь его ограждений.

## Выводы

Произведен анализ шумового воздействия, создаваемого зрителями, которое сопровождается различными программами эксплуатации СЗС. Шумовое воздействие следует разделять на организованное речевое сопровождение (например, скандирование лозунгов болельщиками), которое, по последней редакции СП 415.1325800.2023, следует относить к полезным сигналам, и неорганизованное, вызванное живым людским общением на трибунах, которое, как показывает практика, характерно для большинства современных спортивных или концертных программ.

В отношении последнего разработана методика аналитических расчетов реальных уровней шумового фона, создаваемого публикой в закрытых по формуле (3), полуоткрытых и открытых по формуле (6) объемов СЗС. Необходимо отметить, что, несмотря на относительную простоту проведенных расчетных операций, использование этих формул может быть весьма полезным при акустическом проектировании СЗС для предварительного анализа реального шумового воздействия.

Для достоверного использования предложенных расчетных формул следует, прежде всего, учесть, что при их выводах было принято допущение о практически полном заполнении публикой соответствующего СЗС (по крайней мере, не менее чем 70%), а для полного внедрения их в акустическое проектирование представляется правильным провести дополнительные исследования: в лабораторных условиях получить точную информацию о звукопоглощающих свойствах используемых в настоящее время в СЗС кресельных зон (различных типов) со зрителями и без зрителей; провести натурные измерения уровней шума в ряде СЗС со зрителями, в режиме спортивного и концертного мероприятия, для сравнения полученных результатов с предложенными выражениями аналитических расчетов шумового воздействия.

## Список литературы

1. Перетокин А.В., Щиржецкий Х.А. Новый Свод правил 415.1325800.2023 по акустическому проектированию спортивно-зрелищных сооружений // *Строительные материалы*. 2024. № 6. С. 30–34. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2024-825-6-30-34>
2. Щиржецкий Х.А., Перетокин А.В. Расчет индекса фанатской поддержки при акустическом проектировании крупных спортивных сооружений // *Строительные материалы*. 2022. № 6. С. 35–40. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-803-6-35-40>
3. Peretokin A., Livshits A., Orlov A., Shirgina N. Acoustics features of sports facilities on the example of FIFA 2018 football stadiums In Russia. *Proceedings of the 23rd International Congress on Acoustics*. 9 to 13 September 2019 in Aachen, Germany.
4. Перетокин А.В., Лившиц А.Я., Орлов А.В., Ширгина Н.В. Особенности акустики спортивных объектов на примере футбольных стадионов FIFA. *XXXII Сессия РАО*. М., 2019.
5. Перетокин А.В., Щиржецкий Х.А. Влияние трансформации на акустику крупных спортивных сооружений на примере футбольного стадиона «Газпром Арена» в Санкт-Петербурге. *Сборник трудов XXXIV сессии Российского акустического общества*. Москва. 14–18 февраля 2022. С. 500–510. DOI: <https://doi.org/10.34756/GEOS.2021.17.38058>
6. Перетокин А.В., Щиржецкий Х.А. Проблемы оптимизации времени реверберации в крупных спортивно-зрелищных сооружениях и практические возможности их решения // *БСТ*. 2023. № 6. С. 38–43.
7. Фурдуй В.В. Акустические основы вещания. М.: Связьиздат, 1960. 326 с.
8. Макриненко Л.И. Акустика помещений общественных зданий. М.: Стройиздат, 1989. 187 с.
9. Kuttruff H. Nachhall und Effective absorption in Räumen mit diffusen wandreflexion // *Acustica*. 1976. No. 35, pp. 141–153.
10. Анерт В., Штеффен Ф. Техника звукоусиления. Теория и практика. М.: ПКФ «Леруша», 2003. 416 с.
11. Щиржецкий Х.А., Сухов В.Н. Расчет звукопоглощения при проектировании шумозащиты помещений с повышенным шумовым фоном и распределенными источниками шума // *Жилищное строительство*. 2023. № 7. С. 17–20. DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2023-7-17-20>

## References

1. Peretokin A.V., Shchirzhetskiy H.A. New Set of Rules 415.1325800.2023 on acoustic design of sports and entertainment facilities. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2024. No. 6, pp. 30–34. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2024-825-6-30-34>
2. Shchirzhetskii Kh.A., Peretokin A.V. Calculation of the fan support index in the acoustic design of large sports facilities. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2022. No. 6, pp. 35–40. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-803-6-35-40>
3. Peretokin A., Livshits A., Orlov A., Shirgina N. Acoustics features of sports facilities on the example of FIFA 2018 football stadiums In Russia. *Proceedings of the 23rd International Congress on Acoustics*. 9 to 13 September 2019 in Aachen, Germany.
4. Peretokin A.V., Livshits A.Ya., Orlov A.V., Shirgina N.V. Features of the acoustics of sports facilities using the example of FIFA football stadiums. *XXXII Session of RAO*. Moscow. 2019.
5. Peretokin A.V., Shchirzhetskiy Kh.A. The influence of transformation on the acoustics of large sports facilities using the example of the Gazprom Arena football stadium in St. Petersburg. *Collection of proceedings of the XXXIV session of the Russian Acoustical Society*. Moscow. February 14–18, 2022, pp. 500–510. DOI: <https://doi.org/10.34756/GEOS.2021.17.38058>
6. Peretokin A.V., Shchirzhetskiy Kh.A. Problems of optimization of reverberation time in large sports and entertainment facilities and practical possibilities for their solution. *BST*. 2023. No. 6, pp. 38–43. (In Russian).
7. Furduyev V.V. *Akusticheskie osnovy veshchaniya* [Acoustic basics of broadcast]. Moscow: Svyazizdat. 1960. 326 p.
8. Makrinenko L.I. *Akustika pomeshchenii obshchestvennykh zdaniy* [Acoustics of public buildings]. Moscow: Stroyizdat. 1989. 187 p.
9. Kuttruff H. Nachhall und Effective absorption in Räumen mit diffusen wandreflexion. *Acustica*. 1976. No. 35, pp. 141–153.
10. Anert V., Shteffen F. *Tekhnika zvukousileniya. Teoriya i praktika* [Sound amplification technique. Theory and practice]. Moscow: PKF Lerusha. 2003. 416 p.
11. Shchirzhetskiy Kh.A., Soukhov V.N. Calculation of sound absorption in the design of noise protection of rooms with high background noise and distributed noise sources. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2023. No. 7, pp. 17–20. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2023-7-17-20>