

УДК

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2024-825-6-??-??>

А.В. ПЕРЕТОКИН^{1,2}, инженер, (anton.peretokin@pistra.ru);
Х.А. ЩИРЖЕЦКИЙ¹, канд. техн. наук (a021069@yandex.ru)

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

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

Новый Свод правил 415.1325800.2023 по акустическому проектированию спортивно-зрелищных сооружений

Свод правил 415.1325800.2018 «Здания общественные. Правила акустического проектирования», который был выпущен в 2018 г., содержит методы акустического проектирования крытых спортивно-зрелищных сооружений вместимостью до 25 тыс. человек, воздушный объем которых ограничен значением 50 тыс. м³. Однако за последние десять лет в России началось массовое строительство крупных спортивных арен вместимостью более 50 тыс. человек воздушным объемом более 500 тыс. м³. Кроме того, все современные спортивные объекты проектируются и строятся как multifunctional площадки, на которых, помимо спортивных соревнований, могут проводиться и концертно-развлекательные мероприятия. Таким образом, подходы и методы акустического проектирования, изложенные в Своде правил 2018 г., в настоящее время не отвечают особенностям современных спортивных арен большой вместимости и большого воздушного объема, в которых важно обеспечить высокий уровень акустического комфорта. В представленной статье рассмотрен новый Свод правил 415.1325800.2023 «Здания общественные. Правила акустического проектирования», в котором предложены современные подходы к определению оптимального времени реверберации в зависимости от воздушного объема помещения. Рассмотрен дополнительный параметр нормирования акустического комфорта – индекс фанатской поддержки FSI. Актуализированы данные по звукопоглощающим характеристикам современных материалов, применяемых в отделке арен. Предложены простые аналитические алгоритмы оценки времени реверберации на аренах открытого, полуоткрытого и закрытого типов.

Ключевые слова: свод правил, архитектурная акустика, акустика спортивно-зрелищных сооружений, время реверберации, индекс фанатской поддержки.

Для цитирования: Перетокин А.В., Щиржецкий Х.А. Новый Свод правил 415.1325800.2023 по акустическому проектированию спортивно-зрелищных сооружений // *Строительные материалы*. 2024. № 6. С. 00–00.

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2024-825-6-00-00>

A.V. PERETOKIN^{1,2}, Engineer (anton.peretokin@pistra.ru); H.A. SHCHIRZHETSKIY¹, Candidate of Sciences (Engineering) (a021069@yandex.ru)

¹ Research Institute of Building Physics of RAACS (21, Lokomotivnyy proezd, Moscow, 127238, Russian Federation)

² LLC "Design Institute of Building Acoustics" (33, str.2, Novokuznetskaya Street, Moscow, 115054, Russian Federation)

New Set of Rules 415.1325800.2023 on Acoustic Design of Sports and Entertainment Facilities

Code of Rules 415.1325800.2018 "Public buildings. The Rules of Acoustic design", which was released in 2018, contains methods of acoustic design of indoor sports and entertainment facilities with a capacity of up to 25 thousand people, the air volume of which is limited to 50 thousand m³. However, over the past 10 years, massive construction of large sports arenas with a capacity of more than 50 thousand people and an air volume of more than 500 thousand m³ has begun in Russia. In addition, all modern sports facilities are designed and built as multifunctional playgrounds, where, in addition to sports competitions, concert and entertainment events can also be held. Thus, the approaches and methods of acoustic design outlined in the 2018 Set of Rules currently do not meet the features of modern sports arenas with large capacity and large air volume, in which it is important to ensure a high level of acoustic comfort. The article presents a new Set of rules 415.1325800.2023 "Public buildings. Rules of acoustic design", which proposes modern approaches to determining the optimal reverberation time depending on the air volume of the room. An additional parameter for the normalization of acoustic comfort is considered – the FSI fan support index. The data on the sound-absorbing characteristics of modern materials used in the decoration of arenas are updated. Simple analytical algorithms for estimating reverberation time in open, semi-open and closed arenas are proposed.

Keywords: set of rules, architectural acoustics, acoustics of sports and entertainment facilities, reverberation time, fan support index.

For citation: 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. 00–00. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2024-825-6-00-00>

За последнее десятилетие в России началось массовое строительство крупных крытых спортивно-зрелищных сооружений (СЗС) [1, 2] вместимостью более 50 тыс. человек воздушным объемом более 500 тыс. м³. К таким объектам можно отнести, например, футбольные стадионы, построенные к чемпионату Мира по футболу 2018 г. (с открытым проемом над полем или с наличием трансформируемой кровли) [3, 4], Дворец гимнастики им. И.А. Винери Международный центр самбо и бокса в Лужниках, Волейбольная арена Динамо в г. Москве, Ледовые арены G-Drive в Омске и СКА в Санкт-Петербурге, и многие другие. Кроме того, все современные спортивные объекты проекти-

руются и строятся как multifunctional площадки, на которых, помимо спортивных соревнований, могут проводиться и концертно-развлекательные мероприятия. Таким образом, подходы и методы акустического проектирования, изложенные в Своде правил 2018 г., в настоящее время не отвечают характеристикам и особенностям современных СЗС большой вместимости и большого воздушного объема, в которых крайне важно обеспечить высокий уровень акустического комфорта. Кроме того, для расширенной оценки акустического комфорта на СЗС становится не достаточным использовать только общепринятые параметры – время реверберации и индекс ре-

чевой разборчивости STI, например, СП 415.1325800.2018 «Здания общественные. Правила акустического проектирования»; СП 51.13330.2011 «Защита от шума. Актуализированная версия СНиП 23-03–2003» или FIFA World Cup Handbooks Stadium Requirements Handbook (Stadium Infrastructure & Stadium Operations).

Так, на основании работ [3, 5], дополнительный интерес представляет, например, введение понятия индекса фанатской поддержки FSI, который определяет, как объемно-планировочное решение СЗС влияет на громкость возгласов болельщиков на трибунах.

Важным аспектом является актуализация данных по звукопоглощающим характеристикам современных материалов, применяемых в отделке СЗС, что позволило бы пользователю нового СП включать эту информацию в свой акустический расчет. За последние несколько лет появились новые эффективные звукопоглощающие материалы и конструкции, кроме того серьезно изменились регламенты к противопожарным характеристикам материалов, что сделало невозможным применять ряд привычных звукопоглощающих материалов на проектируемых и строящихся СЗС.

На основании результатов исследований [6–8], в новый СП добавлены простые аналитические формулы, по которым можно выполнять предварительную оценку времени реверберации на СЗС открытого, полуоткрытого и закрытого типов на этапе выбора объемно-планировочного решения, не прибегая к сложным компьютерным и математическим расчетам, требующим наличия высокой квалификации у специалиста.

Таким образом, разработка нового свода правил 2023 г. по акустическому проектированию СЗС стала актуальной и логически обоснованной задачей, которая потребовала взвешенного профессионального подхода и наличия коллектива высококвалифицированных специалистов, имеющих большой теоретический и практический опыт в вопросах акустического комфорта СЗС различного функционального назначения, типа, воздушного объема и вместимости.

Время реверберации

В СП 415.1325800.2018 предложена зависимость оптимальных значений времени реверберации от воздушного объема СЗС. Однако, как показал практический опыт и анализ измеренных значений времени реверберации на действующих СЗС, например, работы [6–9], возникают две проблемы, затрудняющие достижение оптимальных значений времени реверберации:

– по мере увеличения воздушного объема СЗС растет и время реверберации на СЗС, что логично требует увеличения фонда звукопоглощения;

– в крупных СЗС, опираясь на современные стандарты и архитектурно-функциональные подходы к проектированию, наблюдается тенденция к существенному снижению доступных для применения акустической отделки площадей. Особенно наглядно эта тенденция проявляется на ледовых аренах и фут-

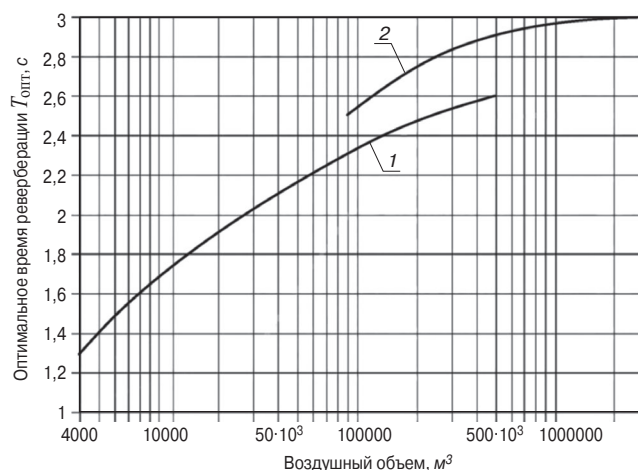


График оптимального времени реверберации $T_{опт}$ на средних частотах (500–1000 Гц) при условии заполнения трибун зрителями на 70%: 1 – для крытых спортивных залов и арен; 2 – для трансформируемых спортивных арен большого воздушного объема – футбольных стадионов
Graph of the optimal reverberation time $T_{опт}$ at medium frequencies (500–1000 Hz) provided that the stands are filled by 70% with spectators: 1 – for indoor sports halls and arenas; 2 – for transformable sports arenas with large air volume – football stadiums

Таблица 1
Table 1

Градации зависимости $T_{опт}(V)$ от коэффициента Π_a
Gradations of the dependence of $T_{опт}(V)$ on the Π_a coefficient

Значение коэффициента Π_a	Поправка к $T_{опт}(V)$
$>0,5$	В соотв. с графиком $T_{опт}(V)$
$0,3-0,5$	$T_{опт}(V) + 10\%$
$<0,3$	$T_{опт}(V) + 20\%$

больных стадионах (ограниченная площадь кровли, форма трибун и т. п.).

Дополнительного внимания требует оценка температурно-влажностного режима, существенно влияющего на звукопоглощение на частотах выше 2000 Гц, особенно на футбольных стадионах с трансформируемой кровлей [10] или хоккейных аренах с ледовым полем.

Исходя из изложенного, в вопросе определения оптимального времени реверберации в зависимости от воздушного объема $T_{опт}(V)$ требуется четкое разделение СЗС на две основные группы:

1. Крытые спортивные залы и арены различного воздушного объема, функционального назначения и вместимости, которые обладают достаточными возможными площадями поверхностей для размещения на них звукопоглощающей отделки, в целях достижения оптимальных значений $T_{опт}(V)$;

2. Спортивные арены большого воздушного объема (преимущественно футбольные стадионы с открытой или закрытой крышей), которые имеют ограниченные возможности по доступным площадям для применения звукопоглощающей отделки, а, следовательно, и дополнительные сложности в достижении оптимальных значений $T_{опт}(V)$.

В силу указанных обстоятельств и на основании анализа большой базы данных по натурной и теоретической оценке времени реверберации на различных СЗС в новом своде правил предложен иной,

Таблица 2
Table 2

Коэффициенты звукопоглощения некоторых современных отделочных звукопоглощающих материалов
Sound absorption coefficients of some modern finishing sound-absorbing materials

Материалы и конструкции	Коэффициенты звукопоглощения в октавных полосах частот, Гц					
	125	250	500	1000	2000	4000
Напыляемое звукопоглощающее покрытие на основе хлопьев целлюлозы: на металлическом профилированном листе, толщина напыления 20 мм; на плоском бетонном основании, толщина напыления 20 мм; на плоском бетонном основании, толщина напыления 25 мм	0,28 0,06 0,1	0,52 0,14 0,21	0,72 0,4 0,56	0,94 0,62 0,82	0,99 0,76 0,82	0,85 0,72 0,74
Декоративная панель толщиной 20–25 мм из древесного волокна на цементном или магнезитовом связующем, смонтированная на каркасе 50 мм с заполнением внутреннего пространства каркаса базальтовой плитой толщиной 50 мм и плотностью 35–60 кг/м ³ : диаметр волокна панели 1 мм; диаметр волокна панели 2 мм	0,37 0,44	0,91 0,99	1 0,83	0,79 0,6	0,8 0,73	0,85 0,78
Панели на основе стекломгнезитового листа (СМЛ) толщиной 8 мм с блочной перфорацией (коэффициент перфорации 18%), отверстия круглой формы диаметром 8 мм с межосевым расстоянием 16 мм, смонтированные на каркасе: толщина каркаса 50 мм с заполнением внутреннего пространства каркаса базальтовой плитой толщиной 50 мм и плотностью 35–60 кг/м ³ ; толщина каркаса 100 мм с заполнением внутреннего пространства каркаса базальтовой плитой толщиной 100 мм и плотностью 35–60 кг/м ³	0,15 0,7	0,65 1	1 1	0,95 1	0,8 0,8	0,45 0,5

близкий к реальности подход к графической зависимости $T_{\text{опт}}(V)$, см. рисунок.

При условии невозможности применения достаточной площади звукопоглощающих материалов в отделке для обеспечения значений $T_{\text{опт}}(V)$ в соответствии с графиком вводится коэффициент Π_a , который допускает поправку к графику и определяется следующим соотношением:

$$\Pi_a = \frac{S_{\text{ак.отд}}}{S_{\text{общ}}}, \quad (1)$$

где $S_{\text{ак.отд}}$ — возможная площадь для применения звукопоглощающего отделочного материала в СЗС или на арене; $S_{\text{общ}}$ — общая площадь поверхностей СЗС. Градации зависимости $T_{\text{опт}}(V)$ от коэффициента Π_a приведены в табл. 1.

Индекс фанатской поддержки FSI

Болельщики являются неотъемлемой частью эмоциональной и субъективной составляющей атмосферы и настроений зрителей на трибунах при проведении спортивных мероприятий на СЗС. Каждое СЗС дает свой уникальный отклик на акустику помещения при скандировании фанатских лозунгов, в зависимости от воздушного объема, габаритов, формы и свойств отделочных материалов ограждающих конструкций помещения. Для оценки этой зависимости введено понятие индекса фанатской поддержки FSI, подробно описанного и исследованного в работах [3, 5].

Оценка индекса фанатской поддержки FSI (параметр «Индекс фанатской поддержки») производится по формуле:

$$FSI_i = 10 \lg \left\{ \frac{(4\Pi + 1/r_i^2)}{(\Pi + 1/r_i^2)} \right\}, \quad (2)$$

где r_i — расстояние приемника от выбранного источника звука; $\Pi = 16\pi/V$ — параметр проектируемого

СЗС; $B = \bar{\alpha}S/(1 - \bar{\alpha})$ — акустическая постоянная СЗС на средних частотах; $\bar{\alpha}$ — средний КЗП на этих частотах; S — общая площадь ограждений СЗС.

Выбор точек r_i определяется шагом $r_i = 2r_{i-1}$ ($i=1,2,3,\dots$), при этом:

$$r_0 = 0,35\sqrt{B}, \quad (3)$$

где r_0 — радиус гулкости (радиус действия прямого звука; расстояние от центра источника звука, при котором уровни прямого и диффузного звуков равны друг другу).

Градации классов качества параметра FSI: «отлично» — от 4 до 6 дБ; «хорошо» — от 3 до 4 дБ; «удовлетворительно» — от 2 до 3 дБ; «плохо» — менее 2 дБ.

Условное положение источника шума принимается в центре размещения фанатских групп (болельщиков, зрителей). При расчете индекса FSI общее количество шагов радиуса гулкости r_i определяется в соответствии с геометрическими размерами СЗС, но не менее трех.

Коэффициенты звукопоглощения отделочных материалов

При компьютерном моделировании и расчете акустических параметров СЗС важно корректно задать коэффициенты звукопоглощения отделочных материалов и конструкций, кресельных зон, а также учесть добавочное звукопоглощение, создаваемое ограждениями, инженерными коммуникациями (воздуховодами), мультимедийными системами и др.

В новый Свод правил включены коэффициенты звукопоглощения некоторых специализированных звукопоглощающих материалов, которые традиционно используются в отделке СЗС и соответствуют всем современным требованиям, в том числе требованиям пожарной безопасности.

Таблица 3
Table 3Аналитические модели расчета времени реверберации
Analytical models for calculating reverberation time

Расчетная модель времени реверберации	Для каких типов СЗС модель применима
$T_1 = \frac{0,01}{\varphi(\bar{\alpha})} \cdot \frac{1}{\arctg\left\{\frac{\pi}{\Pi}\right\}}$ $\Pi = 2\left(\frac{L+H}{B}\right)$	Для полуоткрытых СЗС (помещений с открытыми параллельными проемами ограждений, форма которых близка к прямоугольному параллелепипеду)
$T_2 = \frac{0,04K}{\varphi(\bar{\alpha})},$ где $K = \frac{(H_0 + R_3)}{1 + \frac{R_3}{2H_0}}$	Для всех рассмотренных моделей при условии открытой (постоянно или при трансформациях) крыши R_3 определяется по соответствующим формулам
$T_3 = \frac{0,04H_0}{\varphi(\bar{\alpha})}$	Для закрытых объемов СЗС
Примечания: L, B и H – длина, ширина и высота СЗС; Π – параметр СЗС; H_0 – средняя высота СЗС; $\varphi(\bar{\alpha}) = \{-\ln(1-\bar{\alpha})\}$, $\bar{\alpha}$ – средний коэффициент звукопоглощения; R_3 – эквивалентный радиус, который определяется в зависимости от формы СЗС по табл. 4.	

Аналитические формулы расчета времени реверберации

Известная формула Эйринга для расчета времени реверберации в помещении ограничена рядом условий: объем рассматриваемого помещения должен быть закрытым, требуемые для создания оптимального звукопоглощения материалы должны быть равномерно распределены по ограждающим конструкциям помещения, должна быть соблюдена пропорциональность соотношения основных габаритов помещения и др. При невыполнении этих условий расчет времени реверберации теряет свою точность, например, для футбольных стадионов с открытой крышей или спортивных залов формы прямоугольного параллелепипеда с размещением звукопоглощающих материалов только на потолке.

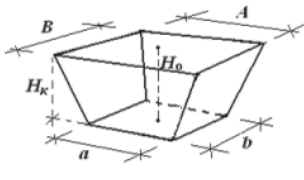
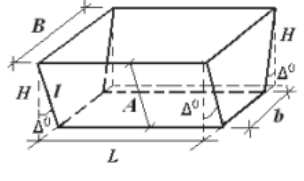
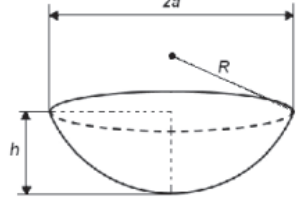
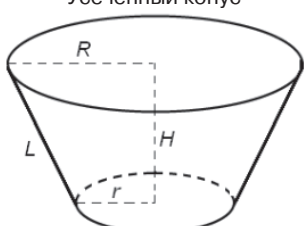
В виду вышеизложенного в новом Своде правил разработаны варианты аналитического расчета времени реверберации в условных геометрических фигурах, которые до некоторой степени моделируют форму проектируемого СЗС, см. также работу [6]. В основе предлагаемого расчета лежит принцип преобразования условной формы контура проектируемого объекта в некоторую, близкую по общим очертаниям, простую геометрическую фигуру, с помощью которой можно рассчитать ориентировочные значения времени реверберации, используя метод расчета вероятности звуковых потоков.

В табл. 3 представлены расчетные алгоритмы времени реверберации для СЗС различного типа (открытого, полуоткрытого и закрытого объемов).

Выводы

1. Показано, что подходы к нормированию акустических параметров и акустическому проектиро-

Таблица 4
Table 4Определение эквивалентного радиуса R_3
Determination of equivalent radius R_e

Форма СЗС	Формула для определения R_3
Обелиск 	$R_3 = 0,32\sqrt{F+f+\sqrt{F \cdot f}},$ $F = AB \text{ и } f = ab$
Усеченный обелиск 	$R_3 = \sqrt{\frac{L(B+b)}{2\pi}}$
Шаровой сегмент 	$R_3 = 0,4\sqrt{3a^2 + H_0^2}$ В случае преобразования шарового сегмента в полусферу: $R_3 = 0,8H_0$
Усеченный конус 	$R_3 = 0,4\sqrt{2(AB+ab)+Ab+aB}$ где A и B – большие, a и b – малые полуоси эллипса

ванию, изложенные в Своде правил 2018 г. устарели применительно к современным СЗС. Таким образом, задача подготовки и проработки нового СП 415.1325800.2023 «Здания общественные. Правила акустического проектирования», рассмотренного в рамках настоящей работы, является весьма актуальной;

2. В рамках разработки Свода правил 2023 г. предложен новый, близкий к реальности подход к графической зависимости времени реверберации от воздушного объема $T_{\text{опт}}(V)$, основанный на анализе большого количества натурных измерений времени реверберации на существующих СЗС, учитывающий доступные для применения звукопоглощающей отделки площади поверхностей.

3. Введены новые параметры для оценки акустического комфорта СЗС, в частности, индекс фанатской поддержки FSI. Актуализированы данные по звукопоглощающим характеристикам отделочных материалов, для возможности использования этой

информации при акустическом моделировании СЗС и расчете акустических параметров.

4. Предложен новый подход к оценке времени реверберации на СЗС на ранних стадиях проектирования для случаев, когда условия применимости

формулы Эйринга не выполняются. Новый подход предполагает аналитический расчет времени реверберации в условных геометрических фигурах, которые в определенной степени моделируют форму СЗС.

Список литературы

1. Океанов Г.В., Гранёва А.В. Архитектурные и технологические особенности большепролетного светопрозрачного покрытия стадиона «Казань-Арена» // *Промышленное и гражданское строительство*. 2021. № 5. С. 13–18.
2. Белостоцкий А.М., Акимов П.А., Аул А.А., Дмитриев Д.С., Дядченко Ю.Н., Нагибович А.И., Островский К.И., Павлов А.С. Расчетное обоснование механической безопасности стадионов к чемпионату мира по футболу 2018 года // *Academia. Архитектура и строительство*. 2018. № 3. С. 118–129.
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*. Москва. 2019.
5. 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>
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. Щиржецкий Х.А., Сухов В.Н. Проблематика акустического проектирования спортивно-зрелищных залов различного объема и вместимости // *БСТ*. 2017. № 6. С. 26–28.
8. Щиржецкий Х.А., Сухов В.Н., Щиржецкий А.Х., Алёшкин В.М. К проблеме акустического проектирования современных залов многоцелевого назначения // *Жилищное строительство*. 2019. № 7. С. 16–24. DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2019-7-16-24>
9. Щиржецкий Х.А. Экспресс-оценка зон разборчивости речи в помещениях. *Сборник трудов н.-т. семинара в г. Севастополе*. 2012.
10. 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>

References

1. Okeanov G.V., Graneva A.V. Architectural and technological features of the long-span translucent covering of the Kazan-Arena stadium. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo*. 2021. No. 5, pp. 13–18. (In Russian).
2. Belostotsky A.M., Akimov P.A., Aul A.A., Dmitriev D.S., Dyadchenko Yu.N., Nagibovich A.I., Ostrovsky K.I., Pavlov A.S. Calculation justification for the mechanical safety of stadiums for the 2018 FIFA World Cup. *Academia. Architecture and construction*. 2018. No. 3, pp. 118–129. (In Russian).
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. 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>
6. Peretokin A.V., Shchirzhetsky 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. Shchirzhetskii Kh.A., Sukhov V.N. Problems of acoustic design of sports and entertainment halls of various sizes and capacities. *BST*. 2017. No. 6, pp. 26–28. (In Russian).
8. Shchirzhetskii Kh.A., Soukhov V.N., Shchirzhetskii A.Kh., Aleshkin V.M. On the problem of acoustic design of modern multipurpose halls. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2019. No. 7, pp. 16–24. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2019-7-16-24>
9. Shchirzhetsky Kh.A. Rapid assessment of speech intelligibility zones in indoor environments. *Collection of proceedings of the scientific and technical seminar in Sevastopol*. 2012. (In Russian).
10. Peretokin A.V., Shchirzhetsky H.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>