

## **Проблемы оптимизации времени реверберации в крупных спортивно-зрелищных сооружениях и практические возможности их решения**

А.В. Перетокин<sup>1,2,a</sup> Х.А. Щиржецкий<sup>1,b</sup>

<sup>1</sup> НИИСФ РААСН. 127238, Россия, Москва, Локомотивный проезд, 21.

<sup>2</sup> ООО «Акустические материалы». 115054, г. Москва, ул. Новокузнецкая, д.33, стр.2.

E-mail: <sup>a</sup>[ap@acoustic.ru](mailto:ap@acoustic.ru), <sup>b</sup>[a021069@yandex.ru](mailto:a021069@yandex.ru)

Высокий уровень акустического комфорта, обусловленный хорошей разборчивостью, низкой гулкостью и приемлемым уровнем шума, крайне важен при проведении спортивных и концертных мероприятий на крупных спортивно-зрелищных сооружениях (СЗС) большой вместимости. Однако при акустическом проектировании крупных СЗС можно столкнуться с рядом проблем, такими как ограниченность доступных площадей для применения звукопоглощающих отделочных материалов, существенную зависимость времени реверберации от температурно-влажностного режима, сложность точного учета частотной зависимости зон рассеяния звука, сложность учета влияния трансформации на время реверберации. Кроме того, одной из главных проблем, например, для футбольных стадионов с открытой крышей является потеря полной идентификации физического смысла времени реверберации как основной характеристики звукового поля в связи с расщеплением начального хода отзвука на ряд дискретных разнонаправленных звуковых потоков, и, следовательно, нарушения условий диффузности звукового поля как основы статистической теории.

В настоящей работе представлены варианты решений данных проблем: теоретическое решение (создание аналитической модели звуковых полей и методов их расчета) и практическое решение (сохранение параметра времени реверберации как аналога требуемого фонда звукопоглощения для достижения допустимых оценок разборчивости речи и снижения уровней звуковой нагрузки). Проанализированы нормативные документы в части требований зависимости оптимального времени реверберации  $T_{opt}$  на крупных СЗС от их воздушного объема  $V$ , предложены новые зависимости  $T_{opt}(V)$  на основании выводов и предположений, сделанных в рамках работы, а также имеющейся базы практических измерений времени реверберации на существующих крупных СЗС.

*Ключевые слова:* акустика крупных спортивно-зрелищных сооружений, акустические измерения, время реверберации.

PACS: 43.55.Mc

## **Введение**

В действующем Своде правил [1] изложены методы акустического проектирования крытых спортивно-зрелищных сооружений (СЗС) вместимостью от 5 до 25 тыс. человек. Однако, начиная с 2010 г., в России началось массовое строительство крупных СЗС вместимостью более 40 тыс. человек, в том числе с возможностью трансформации объема сооружения (например, футбольные стадионы с раздвижной крышей или выкатным полем или залы с раздвижными трибунами – блинчерами), которая позволяет проводить широкую программу не только спортивных, но и культурно-развлекательных мероприятий. Особый масштаб строительство современных multifunctional спортивных объектов в России приобрело в период подготовки к Чемпионату Мира по футболу 2018, в ходе которого были возведены 12 крупных футбольных стадионов в 11 городах. Кроме того, начиная с 2017 г., в России были построены и другие знаковые спортивные объекты, такие как Дворец Гимнастики имени Ирины Винер-Усмановой вместимостью 4000 зрительских мест и Волейбольная арена «Динамо» вместимостью 3500 зрительских мест, оба объекта в г. Москве.

Проектирование и строительство, например, футбольных стадионов показало скудость имеющихся пособий и методик по акустическому проектированию, за исключением установленных международных требований [4, 5] к времени реверберации и разборчивости речи, без всякого сопровождения этих требований по методологии расчета акустических параметров, без учета специфики формирования звуковых полей в таких сооружениях. Последнее, как показал анализ реальных акустических условий на стадионах Чемпионата Мира, см. работы [6, 7], особенно важно, так как ни одна из принятых в настоящее время теорий акустики помещений не позволяет провести корректный расчет глобальных и локальных акустических параметров и, в первую очередь, основного из них – времени реверберации, в зависимости от трансформации воздушного объема исследуемого объекта, с дифференциацией объемных оптимумов времени реверберации по диапазонам частот.

Решением обозначенной задачи могла бы стать разработка новой методики оценки времени реверберации на СЗС различного функционального назначения и объемно-планировочного решения, направленной на поиск оптимального соотношения звукопоглощающих, звукоотражающих и звукорассеивающих конструкций интерьера рассматриваемого объекта. Разрабатываемая методика должна обеспечивать хорошую сходимость расчетных и фактических значений, при этом, не требуя высокой научной

квалификации пользователя. Таким образом, поисковые исследования по данной тематике являются актуальной современной задачей.

## 1 Аналитические модели расчета времени реверберации

Известная формула Эйринга для расчета времени реверберации в помещении (см. [1, 3]) подразумевает выполнение ряда следующих 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 разработаны варианты аналитического расчета времени реверберации в условных геометрических фигурах, которые до некоторой степени моделируют форму проектируемого объекта. 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.

Для максимального упрощения расчетов за основу была принята модель в виде прямоугольного параллелепипеда со сторонами  $L$ ,  $B$ ,  $H$  (длина, ширина и высота), преобразованная в цилиндрическое круговое кольцо, в котором ширина играет роль высоты, площадь основания равна  $\pi R_z^2$ , где  $R_z$  – эквивалентный радиус, определяемый по формуле:

$$R_z = \frac{P}{2\pi} \quad (1)$$

Где  $P = 2(L+H)$  – периметр продольного разреза, см. рис. 1.

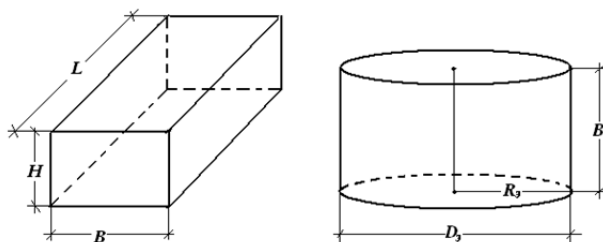


Рис. 1. Модели прямоугольного параллелепипеда и цилиндрического кругового кольца.

Введение подобной модели позволяет определить схему оценки звуковых потоков по рис. 2, обозначения на котором соответствуют исходной геометрии объекта.

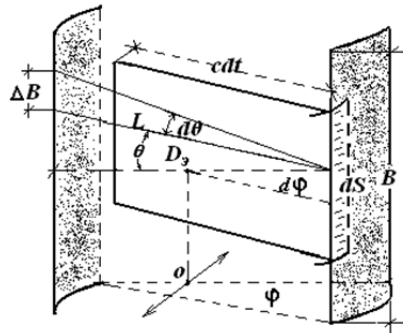


Рис. 2. Схема оценки звуковых потоков.

В соответствии с этим методом логическая последовательность расчета вероятности звуковых потоков  $W$  выглядит следующим образом:

$$W = W_1 \times W_2 \times W_3, \quad (2)$$

Где  $W_1$  – вероятность попадания звуковой посылки  $cdt$  под углами  $\theta$  и  $\varphi$  на площадку  $dS$ ,  $W_2$  – вероятность попадания посылки  $cdt$  на площадку  $dS$  под углом  $\theta$  (угол места),  $W_3$  – вероятность попадания посылки  $cdt$  на площадку  $dS$  под углом  $\varphi$  (азимут).

В результате решения выражения (2) для времени свободного пробега по статистической теории, т.е.  $W(dt) = 1$  при  $dt = \tau$ , путем перехода от стационарного процесса к процессу отзвука, были получены ряд формул по расчету времени реверберации для нескольких моделей.

Прямоугольный параллелепипед с двумя открытыми боковыми проемами (см. рис. 1):

$$T_1 = \frac{0,01}{\varphi(\bar{\alpha})} \cdot \frac{1}{\arctg\left\{\frac{\pi}{\Pi}\right\}}, \quad (3)$$

Где  $\Pi = 2\left(\frac{L+H}{B}\right)$  – параметр помещения,  $\varphi(\bar{\alpha}) = \{-\ln(1 - \bar{\alpha})\}$ ,  $\bar{\alpha}$  – средний коэффициент звукопоглощения в нормируемом диапазоне частот.

При переходе от полуоткрытых объемов к моделям с одним открытым ограждением (открытой крышей) кольцо «закрывается» по одному из оснований, и при введении того же параметра  $R_3$  получается следующая общая формула:

$$T_2 = \frac{0,04K}{\varphi(\bar{\alpha})}, \quad K = \frac{(H_0 + R_3)}{\left(1 + \frac{R_3}{2H_0}\right)} \quad (4)$$

Где  $H_0$  – высота модели по средней высоте СЗС.

Необходимо отметить, что формула (4) является универсальной, то есть при изменении формы объекта будет меняться только параметр  $R_3$ , что существенно упрощает аналитические расчеты.

Обелиск с закрытым основанием, см. рис. 3. Параметр  $R_3$  определяется соотношением:

$$R_3 = 0,32 \sqrt{F + f + \sqrt{F \cdot f}}, \quad F = AB \text{ и } f = ab \quad (5)$$

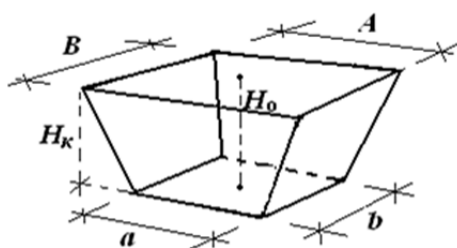


Рис. 3. Модель обелиска.

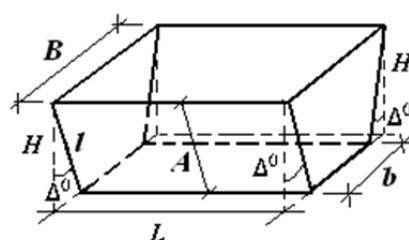


Рис. 4. Модель усеченного обелиска.

Усеченный обелиск с закрытым основанием, см. рис. 4. Параметр  $R_3$  определяется соотношением:

$$R_3 = \sqrt{\frac{L(B+b)}{2\pi}} \quad (6)$$

Шаровой сегмент основанием вниз (см. рис. 5) и основанием вверх (см. рис. 6).

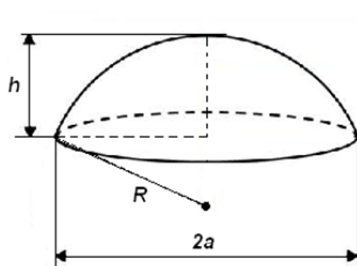


Рис. 5. Модель шарового сегмента основанием вниз.

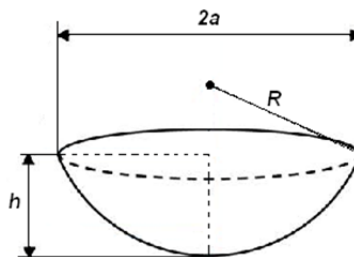


Рис. 6. Модель шарового сегмента основанием вверх.

В обоих случаях параметр  $R_3$  определяется соотношением:

$$R_3 = 0,4 \sqrt{3a^2 + H_0^2} \quad (7)$$

В случае преобразования шарового сегмента в полусферу:

$$R_3 = 0,8H_0 \quad (8)$$

Усеченный конус (см. рис. 7).

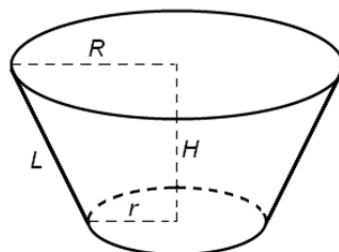


Рис. 7. Модель усеченного конуса.

Необходимо отметить, что в реальных СЗС форма основания по рис.7 близка к эллипсу (например, ледовая арена), вследствие чего:

$$R_3 = 0,4\sqrt{2(AB + ab) + Ab + aB} \quad (9)$$

Где  $A$  и  $B$  – большие, а  $a$  и  $b$  – малые полуоси эллипса.

Для всех рассмотренных моделей при открытии одной части ограждений (обычно крыша) для расчета времени реверберации справедлива формула (4). При закрытии объема модели по рис. 2 представляется интерес ее преобразования. Тогда формулу (2) можно представить в следующем виде:

$$W = \frac{cdt}{4\pi^2 R_3 H_0 (H_0 + R_3)} \int_0^S dS \cdot \int_0^{\pi/2} \cos\theta d\theta \cdot \int_0^{2\pi} d\varphi = \frac{cdt}{4\pi^2 R_3 H_0 (H_0 + R_3)} \cdot (2\pi R_3^2 + 2\pi R_3 H_0) \times \\ \times \sin\theta \Big|_0^{\pi/2} \cdot 2\pi = \frac{cdt}{2\pi R_3 H_0 (H_0 + R_3)} \{2\pi R_3 \cdot (R_3 + H_0)\} = \frac{cdt}{H_0} \quad (10)$$

Для расчета времени свободного пробега  $\tau$  принимается  $W = 1$ , тогда:

$$\frac{c\tau}{H_0} = 1, \tau = \frac{H_0}{c} \quad \text{и} \quad n = \frac{1}{\tau} = \frac{c}{H_0}$$

Для расчета времени реверберации  $T_3$  следует ввести уравнение статистического отзвука (см. [3, 8]):

$$\frac{\varepsilon(T)}{\varepsilon_0} = 10^{-6} = e^{nT \ln(1-\bar{\alpha})}$$

Откуда:

$$T_3 = -6 \frac{\ln 10}{\ln(1-\bar{\alpha})} \cdot \frac{1}{n} = -\frac{13,8}{\ln(1-\bar{\alpha})} \cdot \frac{H_0}{c} = \frac{0,04 H_0}{\varphi(\bar{\alpha})} \quad (11)$$

Таким образом, представленные формулы расчета времени реверберации при невозможности применения формулы Эйринга могут быть использованы при следующих вариантах объемно-планировочных решений СЗС:

- Формула для расчета  $T_1$  может быть использована только при расчетах полуоткрытых спортивных залов, то есть помещений с открытыми параллельными проемами ограждений, форма которых близка к прямоугольному параллелепипеду;
- Формула для расчета  $T_2$  может быть использована для всех рассмотренных моделей при условии открытой (постоянно, или при трансформациях) крыши;
- Формула для расчета  $T_3$  может быть использована для закрытых объемов помещений.

## 2 Оценка времени реверберации по аналитическим моделям на реальных СЗС

Наиболее критичным этапом при оценке времени реверберации по предложенным аналитическим моделям является правильный с позиции подобия выбор

геометрической модели рассматриваемого СЗС, определение степени его закрытости и пропорций его ограждений, с оптимизацией на этой основе метода расчета времени реверберации.

Пример 1 – Дворец гимнастики имени Ирины Винер-Усмановой в г. Москва. Данный зал художественной гимнастики можно условно приблизить к геометрической фигуре – «перевернутой» усеченной пирамиде или «обелиску», см. рис. 3. Фото зала представлено на рис. 8. В зале применена звукопоглощающая отделка потолка и стен.



Рис. 8. Дворец гимнастики имени Ирины Винер-Усмановой в г. Москва.

В табл. 1 представлены основные параметры помещения и результаты расчета и измерения времени реверберации.

Таблица 1

**Дворец гимнастики имени Ирины Винер-Усмановой в г. Москва**

| Параметр                                            | Значение параметра    |
|-----------------------------------------------------|-----------------------|
| Общая площадь ограждающих поверхностей              | 15 000 м <sup>2</sup> |
| Воздушный объем                                     | 90 000 м <sup>3</sup> |
| Средний коэффициент звукопоглощения $\bar{\alpha}$  | 0.45                  |
| Расчет времени реверберации по аналитической модели | 1.80 с                |
| Измеренные значения времени реверберации            | 1.83 с                |

Таким образом, результаты аналитического моделирования практически полностью соответствуют измеренным значениям времени реверберации.

Пример 2 – Дворец спорта в г. Видное Московская обл. Данный зал игровых видов спорта имеет форму «усеченного обелиска», см. рис. 4. Фото зала см. на рис. 9.

В табл. 2 представлены основные параметры помещения и результаты расчета и измерения времени реверберации.



Рис. 9. Дворец спорта в г. Видное Московская обл.

Таблица 2

**Дворец спорта в г. Видное Московской обл.**

| Параметр                                            | Значение параметра    |
|-----------------------------------------------------|-----------------------|
| Общая площадь ограждающих поверхностей              | 6800 м <sup>2</sup>   |
| Воздушный объем                                     | 35 000 м <sup>3</sup> |
| Средний коэффициент звукопоглощения $\bar{\alpha}$  | 0.23                  |
| Расчет времени реверберации по аналитической модели | 2.80 с                |
| Измеренные значения времени реверберации            | 3.20 с                |

Полученный результат представляет несомненный практический интерес. Хотя разница в расчете и измерениях составляет 0.4 с, общая тенденция оценки гулкости помещения просматривается достаточно ясно.

Пример 3 – Тренировочный зал волейбольной арены «Динамо» в г. Москва. Данный зал имеет форму, близкую к прямоугольному параллелепипеду, фото зала см. на рис. 10.



Рис. 10. Тренировочный зал волейбольной арены «Динамо» в г. Москва.

В зале применена звукопоглощающая отделка потолка и стен. В табл. 3 представлены основные параметры помещения и результаты расчета и измерения времени реверберации.

Таблица 3

| <b>Тренировочный зал волейбольной арены «Динамо» в г. Москва</b> |                     |
|------------------------------------------------------------------|---------------------|
| Параметр                                                         | Значение параметра  |
| Общая площадь ограждающих поверхностей                           | 2100 м <sup>2</sup> |
| Воздушный объем                                                  | 4800 м <sup>3</sup> |
| Средний коэффициент звукопоглощения $\bar{\alpha}$               | 0.2                 |
| Расчет времени реверберации по аналитической модели              | 1.35 с              |
| Измеренные значения времени реверберации                         | 1.55 с              |

Разница в расчете и измерении времени реверберации составляет 0.2 с, что говорит о хорошей сходимости результатов.

Пример 4 – Футбольный стадион «Газпром Арена» в г. Санкт-Петербург. Данный объект с полным основанием можно считать уникальным СЗС, не только в связи с его объемом и вместимостью, но и, главное, в возможности трансформации конструкции кровли и футбольного поля, что позволяет считать этот объект многофункциональным в полном смысле этого термина (фото см. на рис. 11). Геометрию стадиона с определенной степенью точности можно описать как эллиптический конус.

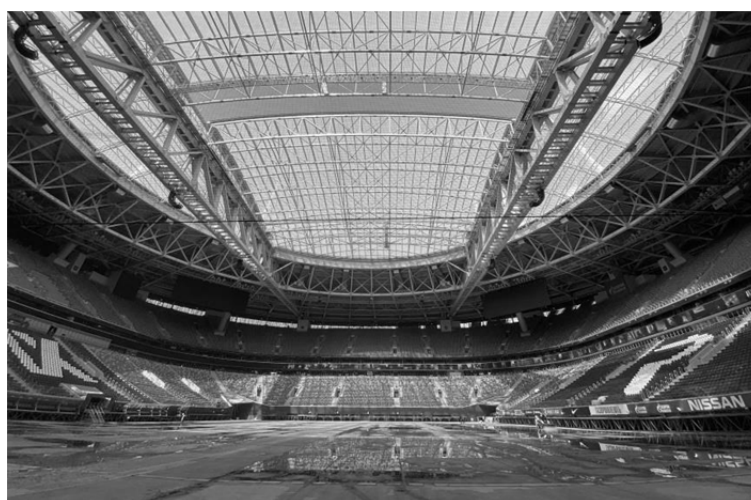


Рис. 11. Футбольный стадион «Газпром Арена» в г. Санкт-Петербург.

В табл. 4 представлены основные параметры объекта и результаты расчета и измерения времени реверберации в режиме с закрытой и открытой крышей.

Таблица 4

**Футбольный стадион «Газпром Арена» в г. Санкт-Петербург**

| Параметр                                                              | Значение параметра       |
|-----------------------------------------------------------------------|--------------------------|
| Общая площадь ограждающих поверхностей                                | 161 000 м <sup>2</sup>   |
| Воздушный объем                                                       | 2 000 000 м <sup>3</sup> |
| Средний коэффициент звукопоглощения $\bar{\alpha}$ с открытой крышей  | 0.23                     |
| Средний коэффициент звукопоглощения $\bar{\alpha}$ с закрытой крышей  | 0.21                     |
| Расчет времени реверберации с открытой крышей по аналитической модели | 8.8 с                    |
| Измеренные значения времени реверберации с открытой крышей            | 8.6 с                    |
| Расчет времени реверберации с закрытой крышей по аналитической модели | 11.8 с                   |
| Измеренные значения времени реверберации с закрытой крышей            | 10.1 с                   |

Расчет времени реверберации для стадиона с открытой крышей по предложенной аналитической модели (формула (4)) приводит к значению 8,8 с, что практически соответствует измеренным значениям.

В режиме закрытой крыши используется формула (11), однако, конфигурацию верхнего объема, физически корректно будет ввести в нее вместо величины  $H_0$  максимальное значение высоты  $H_{max}$ . Таким образом, формула для расчета времени реверберации по данной модели преобразуется к виду:

$$T_m = \frac{0,04H_{max}}{\varphi(\bar{\alpha})},$$

Тогда расчетные значения времени реверберации при этом выше измеренных значений на 1.7 с, однако общая тенденция увеличения времени реверберации СЗС при закрытии воздушного проема кровли сохраняется.

### **3 Анализ зависимости времени реверберации от воздушного объема СЗС**

Главным критерием точности аналитических расчетов времени реверберации является степень приближения их к нормативным графическим зависимостям  $T_{onm}(V)$ , изложенных в стандартах [1–3]. Однако возникают две проблемы, затрудняющие достижение оптимальных значений времени реверберации, тем более, что возможности их решения в достаточной степени ограничены, а в некоторых случаях даже могут противоречить друг другу. Суть этого противоречия в следующем:

- По мере увеличения воздушного объема СЗС растет и его время реверберации, что, в свою очередь, требует увеличения фонда (площади) звукопоглощающей отделки;
- В крупных СЗС по соображениям эргономики и эффективности строительства наблюдается тенденция сведения к минимуму доступных для применения акустической отделки площадей, распределяя при этом практически все площади ограждений на необходимое технологическое оборудование, связанные с ним служебные помещения и площади зрительских мест. Особенно наглядно эта тенденция проявляется на ледовых аренах и футбольных стадионах (ограниченная площадь кровли, форма трибун).

Кроме того, дополнительные проблемы при проектировании крупных СЗС может создать оценка температурно-влажностного режима, существенно влияющего на звукопоглощение на частотах выше 2000 Гц, особенно на футбольных стадионах с трансформацией [9].

Исходя из изложенного, правильным выходом мог бы стать анализ и накопление практического опыта, как по коррекции акустики уже действующих СЗС, так и при акустическом проектировании новых СЗС, что позволило бы оптимизировать представление зависимости  $T_{onm}(V)$ . Однако накопление практического опыта показало, что с позиции реальных возможностей разработки акустических решений современных СЗС требуется четкое разделение их на 2 основные группы:

1. Крытые спортивные залы и арены различного воздушного объема и вместимости, которые при заданном функционале и площади зрительских мест, позволяют проводить некоторую вариабельность их общих объемно-планировочных решений, формы и конструкций ограждений, что оставляет разработчикам решений по акустической отделке достаточное поле деятельности для приближения акустической обстановки соответствующего объекта к оптимальным значениям  $T_{onm}(V)$ ;
2. Спортивные арены большого воздушного объема – футбольные стадионы (при трансформациях – с закрытой крышей), которые вследствие четкого назначения объектов и соображений, как уже упоминалось, эргономики, имеют, к сожалению, весьма ограниченные возможности применения акустической отделки, см., например, [7, 10].

В силу указанных причин, на основании анализа большой базы данных по натурной и теоретической оценке времени реверберации в различных СЗС предлагается новый, близкий к реальности подход к графической зависимости  $T_{onm}(V)$  (см. рис. 11).

При условии невозможности применения достаточной площади звукопоглощающих материалов в отделке для обеспечения значений  $T_{onm}(V)$  в соответствии с графиком

вводится коэффициент  $\Pi_a$ , который допускает поправку к графику и определяется следующим соотношением:

$$\Pi_a = \frac{S_{\text{ак.отд.}}}{S_{\text{общ.}}}$$

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  $\Pi_a$  приведены в табл. 5.

Таблица 5

| Значение коэффициента $\Pi_a$ | Поправка к $T_{\text{онм}}(V)$          |
|-------------------------------|-----------------------------------------|
| $> 0.5$                       | в соотв. с графиком $T_{\text{онм}}(V)$ |
| $0.3 - 0.5$                   | $T_{\text{онм}}(V) + 10\%$              |
| $< 0.3$                       | $T_{\text{онм}}(V) + 20\%$              |

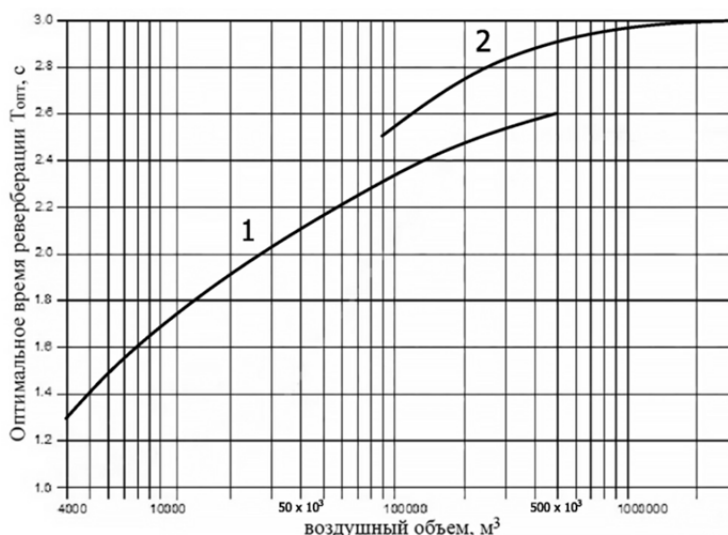


Рис. 11. График оптимального времени реверберации  $T_{\text{онм}}$  на средних частотах (500 – 1000 Гц) для крупных спортивных сооружений при условии заполнения трибун зрителями на 70%:

- 1 – для крытых спортивных залов и арен;  
2 – для трансформируемых спортивных арен большого воздушного объема – футбольных стадионов.

### Заключение

По результатам проведенного исследования по вопросам оценки и оптимизации времени реверберации на крупных СЗС можно сделать следующие выводы:

1. Предложен новый подход к оценке времени реверберации на СЗС для случаев, когда условия для расчета времени реверберации по формуле Эйринга не выполняются. Новый подход предполагает аналитический расчет времени реверберации в условных геометрических фигурах, которые в определенной степени моделируют форму СЗС.
2. Новый подход к оценке времени реверберации не предполагает сложных расчетов и глубоких знаний пользователя в данной области и обеспечивает хорошую сходимость

оценочных значений времени реверберации с измеренными значениями на реальных СЗС.

3. На основании анализа большой базы данных по натурной и теоретической оценке времени реверберации в различных СЗС, а также архитектурных и технологических особенностей современных СЗС предложен новый, близкий к реальности подход к графической зависимости  $T_{onm}(V)$ , который мог бы быть рассмотрен и использован при обновлении и актуализации свода правил по акустическому проектированию крупных СЗС.

### Список литературы

1. СП 415.1325800.2018 Здания общественные. Правила акустического проектирования – Москва, 2018.
2. СП 31-112-2004 Физкультурно-спортивные залы. Части 1 и 2.
3. СП 51.13330.2011 Защита от шума» Актуализированная версия СНиП 23-03-2003 – Москва, 2011.
4. FIFA World Cup Handbooks Stadium Requirements Handbook (Stadium Infrastructure & Stadium Operations) Version 2018 FIFA World Cup / 01.11.2014.
5. UEFA EURO 2020 Tournament requirements.
6. *Peretokin A., Livshits A., Orlov A., Shirgina N.* Acoustics features of sports facilities on the example of FIFA 2018 football stadiums in Russia (ICA 2019, Aachen).
7. *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 г.).
8. *Фурдуев В.В.* Акустические основы вещания. М. «Связьиздат» 1960.
9. *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 года. С.500-510. DOI:10.34756/GEOS.2021.17.38058.
10. *Щиржецкий Х.А., Сухов В.Н.* Проблематика акустического проектирования спортивно-зрелищных залов различного объема и вместимости//БСТ. 2017. №6. С.26-28.