

Х.А. ЩИРЖЕЦКИЙ¹, В.М. АЛЕШКИН¹, А.О. СУББОТКИН^{1,2}

¹ФГБУ «Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук» (НИИСФ РААСН), г. Москва, Россия

²Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, г. Москва, Россия

ОЦЕНКА АКУСТИКИ ХРАМОВЫХ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ ПАРАМЕТРА МЕРЫ ВЫСОТЫ

Аннотация. В работе, на основании анализа результатов натурных обследований акустики канонических молельных залов православной и мусульманской конфессий, разработано предложение по объективной оценке специфического ощущения сакральности проводимых религиозных мероприятий. Представлен новый параметр оценки этого ощущения - так называемая «мера высоты» восприятия звучания храма, с методикой его расчета и измерений. Произведена оценка связи этого параметра с известными критериями объемности и эхообразований, в зависимости от геометрии храма (в первую очередь, от высоты главного купола) и соотношения сигнал/шум по характерным зонам мест размещения прихожан.

Ключевые слова: акустика культовых сооружений, акустическое проектирование, мера объемности звучаний, акустический комфорт, молельные залы.

Ch.A. SCHIRJETSKY¹, V.M. ALESHKIN¹, A.O. SUBBOTKIN^{1,2}

¹Research Institute of Building Physics of Russian Academy of Architecture and Building Science (NIISF RAASN), Moscow, Russia

²Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

ASSESSMENT OF THE ACOUSTICS OF TEMPLE BUILDINGS AND STRUCTURES BASED ON THE PARAMETER MEASURE OF HEIGHT

Abstract. In this paper, based on the analysis of the results of field surveys of the acoustics of canonical prayer halls of the Orthodox and Muslim confessions, a proposal for an objective assessment of the specific sense of sacredness of religious events is developed. A new parameter for assessing this feeling is presented-the so - called "height measure" of the perception of the sound of the temple, with the method of its calculation and measurement. The relationship of this parameter with the known volume criteria of echo formations is estimated, depending on the geometry of the church (first of all, on the height of the main dome) and the signal-to-noise ratio for the characteristic areas of the parishioners ' accommodation.

Keywords: acoustics of religious buildings, acoustic design, reverberation, spatial acoustic measures, praying halls

Введение

Систематизация результатов многолетних исследований акустики храмовых зданий и сооружений, проведенных специалистами НИИСФ в молельных залах православной и мусульманской конфессий, показала недостаточность чисто формального переноса известных параметров акустики светских залов на объективную оценку и их тождество с восприятием акустики храмов прихожанами при проведении в них различных религиозных процедур и мероприятий. Начало таких исследований было положено еще в середине 90-ых годов XX в., в результате чего специалисты НИИСФ приняли активное участие в разработке СП 31-103-99 «Здания, сооружения и комплексы православных храмов», особенно в части методов акустического проектирования молельных залов по основному параметру акустики помещений – времени реверберации [1]. Однако в ходе последующего внедрения основных

положений этого документа и использования общих рекомендаций по методологии таких залов в практике проектирования православных храмов различного объема и вместимости, а с начала XXI в. – и в практике обеспечения акустического комфорта мечетей, выяснилось, что оптимальное решение поставленной задачи требует здесь некоторой коррекции известных правил и приемов акустического проектирования светских залов по следующим причинам:

- Установившиеся за многовековую историю канонические концепции объемно-планировочных решений молельных залов ортодоксальных христианских и мусульманских храмов, в основном, не соответствуют принятым в современной акустике залов рекомендациям по допустимым размерам и пропорциям, форме и конструкциям ограждений, что весьма ограничивает резерв средств проектировщиков для достижений оптимальных значений, обычно используемых глобальных и локальных акустических параметров (см. напр. [2-7]);

- Кроме того, сама система этих параметров, логически понятная и количественно обоснованная в светских залах, в молельных залах, как показывает развернутая субъективная экспертиза, требует введения, по крайней мере, еще одного объективного критерия, характеризующего специфику субъективного восприятия сакральности проводимых религиозных процедур.

Здесь необходимо отметить проведенный авторами настоящей разработки развернутый анализ современного состояния методологии акустического проектирования православных храмов России, с обозначением проблем, требующих своего решения, которые в равной степени можно отнести и к проблемам акустического проектирования мечетей [2].

В числе последних здесь также было обращено внимание на необходимость развития системы объективных параметров акустики молельных залов в части приближения их к реальным процессам восприятия сакральности при проведении религиозных процедур.

1. Обоснование актуальности и цель исследования

Следует еще раз подчеркнуть, что основной особенностью проведения религиозных процедур в храмовых помещениях главных ортодоксальных конфессий является приближение прихожан к Богу через вокализированные речевые обращения проповедника, сопровождаемые в церковных сооружениях, в отличие от мусульманских, хоровыми распевами, а в католических храмах еще и органными исполнениями. При этом главной целью этих процедур является не просто приобщение к духовности, как на всех обычных культурных мероприятиях, а вхождение в нее, как в особое психоэмоциональное состояние человеческой сущности и, как следствие, полный уход от мира к божественной сущности. Именно с этой целью в канонических христианских и мусульманских соборах создаются высокие своды и купола, как «обиталище Бога», для перехода с «земли» (места нахождения прихожан) к «небу». Особую роль при этом играет аудиовизуальное окружение прихожан, соответствующее канонам данной религии, при котором проповедник должен играть роль проводника в мир духовности – «посланника от Бога», голос которого, в принципе должен представляться исходящим «с неба». Такая уникальность проведения религиозных процедур требует специфических требований к восприятию голосов проповедников как основного источника духовной сущности и погружения в нее душ прихожан. Отсюда следует вывод о том, что помещение молельного зала, при соответствующей поддержке интерьера, должно создавать у каждого прихожанина субъективное впечатление оптимального сочетания достаточной громкости и объемности (звукового окружения) звучания речи проповедника (особенно при сопровождении хора или органа), понятности передаваемой информации и, особенно, ощущения, что при этом основной источник звука находится на «небе», т.е. исходит сверху от купола (куполов) и сводов молельного зала храма соответствующей конфессии. Все это, естественно, должно восприниматься как нормальный акустический процесс, без искажений и эхообразований. Изложенное неизбежно приводит к заключению, что для достижения этого состояния в молельных залах христианской и мусульманской конфессий

должна быть, прежде всего, достаточно заметная реверберация (гулкость звучания), что, собственно, и наблюдается в значительной части ортодоксальных, исторически сложившихся помещениях обеих конфессий (см. [3-8]). Допустимым при этом является некоторая потеря разборчивости вокализированной речи священнослужителей, при том условии, что она нигде не должна опускаться ниже качественной оценки «удовлетворительно» по принятым в РФ и за рубежом классификации (см. [9,10]), особенно с учетом того обстоятельства, что большинство постоянных прихожан достаточно хорошо знает канонические, давно устоявшиеся текстовые части проповедей.

Анализ изложенного позволяет прийти к выводу, что основными акустическими факторами, способствующими созданию у прихожан субъективного ощущения полной сакральности проводимых в молельных залах религиозных мероприятий, являются:

- Степень оптимального сочетания понятности звучания проповедей, с необходимой для этой цели локализацией источника звука, хорового (музыкального) сопровождения проповедей и выделения на этом фоне, как основного, «голоса неба».
- Степень звукового погружения (окружения) в проводимую религиозную процедуру;
- Ощущение оптимальной громкости во время звучания проповедей, вокально-хорового или музыкального сопровождения;
- Отсутствие звуковых помех, эхообразований, избыточного шумового фона, заметных искажений звука (особенно при работе систем озвучения), и т.п.

2. Методология и результаты исследования

Исходя из изложенного, на основании сопоставлении данных натурных измерений с результатами субъективных экспертиз, было предложено расширить систему объективных параметров, обычно используемых для оценки акустики светских залов, параметром, максимально коррелированным со звуковыми потоками, приходящими из верхних объемов храмов, и, в первую очередь, от купола (куполов). Этот параметр, определяемый как «мера высоты» храма, по логике должен соответствовать степени восприятия прихожанами поддержки проводимой проповеди его «небесным» сопровождением.

Проведенный с этих позиций анализ, с учетом интегрально-логарифмических особенностей восприятия звука слуховым аппаратом человека (см. напр. [3,10-15]), позволил разработать следующее предложение по локальной оценке «меры высоты» (LH):

$$LH_i = 10 \lg \frac{\int_0^{\tau_k} p_{\Omega H_i}^2(t) dt}{\int_0^{\tau_k} p_{0H_i}^2(t) dt - \int_0^{\tau_k} p_{\Omega H_i}^2(t) dt'} \quad (1)$$

где $p_{\Omega H_i}^2(t)$ - средний квадрат звукового давления импульсного отзвука в некоторой точке молельного зала, воспринятый направленным вверх микрофоном, с диаграммой направленности в форме кардиоиды;

$p_{0H_i}^2(t)$ - средний квадрат звукового давления импульсного отзвука в той же точке исследуемого молельного зала, воспринятый ненаправленным микрофоном, т.е. шаровой диаграммой направленности;

τ_k - интервал когерентности вокализированной речи священнослужителей.

Для определения диапазона оптимальных значений этого параметра следует сопоставить данные натурных исследований изотропности звуковых полей в разных зальных помещениях, которые показали, что субъективная оценка превалирования звуковых потоков по координатным направлениям начинается, как было отмечено, с предела $\pm 3,0$ дБ [11]. Сопоставляя эти данные с логической цепочкой, известной из основ психоакустики: мера громкости (в дБ) – уровень громкости (в сонах) – уровень ощущения громкости (в фонах), можно прийти к выводу, что оптимальный диапазон параметра равен $+3,0 \div +6,0$ дБ, с пределом допустимых значений до $+8,0$ дБ (см. напр. [12]). При значениях меньше $3,0$ дБ «голос неба» может просто «потеряться» на фоне звукового окружения, а при величинах

больших 8,0 дБ высока вероятность возникновения опасности эхообразований и потери объемности звукового поля.

При этом необходимым условием оптимального выбора предела интегрирования τ_k является, как уже отмечалось, выполнение следующего соотношения:

$$\tau_k \leq t_{\text{изо}} , \quad (2)$$

Для определения оптимальных значений интервала когерентности, естественно потребуются дополнительные исследования процессов вокализации священнослужителей различных конфессий. На первом этапе разработки этой темы авторами данной работы было принято решение использовать для цели допустимые значения т.наз. «порога четкости разговорной речи» в диапазоне 30 – 50 мс (см. [10-12]). Однако развернутые субъективные экспертизы особенностей звуковоспроизведения канонических служб в храмах православной и мусульманской конфессий показали существенную зависимость восприятия прихожанами ощущения прихода с «высоты» передаваемой проповеди от связи характеристик вокализации канонических текстов с, собственно, геометрией молельного зала, и, в первую очередь, с высотой главного купола (куполов) по отношению к самой критичной точке восприятия звука (обычно эта точка находится непосредственно под куполом и является наиболее близкой к источникам звукоизлучения). Проведенный специалистами фонетический и спектральный анализ процесса вокализации речи показал, что при этом, как фонетически сбалансированные звуки (слоги, слова, фразы), так и отдельные гласные и согласные, удлиняются по времени произношения не менее, чем в два раза (см. [16,17]). Особенностью этого удлинения является заметный дисбаланс соотношения спектральных мощностей излучения в пользу гласных [16]. При этом, учитывая, что минимальная длительность гласных близка к 80мс, речь может быть представлена как однородный псевдослучайный процесс последовательности фонем (см. [17]). Таким образом, определяющим при выборе интервала когерентности для храмовых залов следует считать временные пределы поступления первых мощных отражений от верхних объемов храмов (особенно от его главного купола), в сочетании с интервалами определения меры объемности и, естественно, при выполнении условия (2).

Отсюда представляется логически обоснованным ввести, при сопоставлении меры высоты и меры объемности, два значения этих параметров, зависящих от прихода 1-ого мощного геометрического отражения (или их фокусировки) в контрольную точку молельного зала.

1. При высоте центрального купола $H \leq 10 \div 12$ м, т.е. при допустимости запаздывания отзвуков вокализированной речи по отношению к прямому звуку до 60÷80 мс.

Мера высоты:

$$LH_i = 10 \lg \frac{\int_0^{80\text{мс}} p_{\Omega H_i}^2(t) dt}{\int_0^{80\text{мс}} p_{0 H_i}^2(t) dt - \int_0^{80\text{мс}} p_{\Omega H_i}^2(t) dt}, \quad (3)$$

где обозначения см. формулу (1).

Мера объемности (см. [18]):

$$LE_i = 10 \lg \frac{\int_{25\text{мс}}^{80\text{мс}} p_{\infty i}^2(t) dt}{\int_0^{80\text{мс}} p_{0 i}^2(t) dt}, \quad (4)$$

где $p_{\infty i}^2$ – средний квадрат звукового давления импульсного отзвука, воспринятый в i – ой точке помещения микрофоном, с диаграммой направленности в форме «восьмерки», с осью максимальной чувствительности направленной перпендикулярно к продольной оси зала;

$p_{0 i}^2(t)$ - см. формулу (1).

Зона оптимумов параметра $LE = -5 \div -7$ дБ.

2. При высоте центрального купола > 12 м

Мера высоты:

$$LH_i = 10 \lg \frac{\int_0^{t_{pci}} p_{\Omega H_i}^2(t) dt}{\int_0^{t_{pci}} p_{0i}^2(t) dt - \int_0^{t_{pci}} p_{\Omega H_i}^2(t) dt}, \quad (5)$$

Мера объемности (взята по аналогичному параметру «поздней объемности» в стандарте РФ [18, Прил. А.2.5]):

$$LE_i = 10 \lg \frac{\int_{80мс}^{t_{pci}} p_{\infty i}^2(t) dt}{\int_0^{t_{pci}} p_{0i}^2(t) dt}, \quad (6)$$

где величина t_{pci} – время поступления в i -ую точку помещения храма полезного сигнала импульсного отзвука.

Последнее принимается из условия соотношения сигнал/шум в соответствующей точке помещения, при допущении, что, несмотря на существенные диспропорции объемно-планировочных решений молельных залов, вследствие повсеместно высоких значений в них времени реверберации, огибающие отзвуков, с достаточной степенью точности, можно аппроксимировать линейной функцией спада отзвуков в логарифмическом масштабе частоты, определяемой общей крутизной по всему спаду полезного сигнала.

Отсюда следует возможность оценить время прохождения полезного сигнала из следующего линейно-пропорционального соотношения:

$$\frac{\Delta L_{pci}}{60 \text{ дБ}} \sim \frac{t_{pci}}{T}, \quad (7)$$

где $\Delta L_{pci} = L_{pci} - L_{ши}$ (L_{pci} – уровень полезного сигнала в i -ой точке помещения, $L_{ши}$ – уровень шума в ней);

T – время реверберации молельного зала.

Отсюда время прохождения полезного сигнала:

$$t_{pci} = \frac{\Delta L_{pci}}{60} \cdot T \quad (8)$$

Таким образом, сводка формул (1 - 8) позволяет, в принципе, произвести как расчет, так и организацию процедуры измерений обоих параметров. В равной степени это относится и к оптимальному выбору такого важного для правильного использования предложенных параметров критерия, как временной предел эхообразования (см. формулу 2), в отношении которого, вплоть до настоящего времени существует большое разнообразие методов расчета и измерений, что, естественно, требует развития и этого направления исследований. В любом случае, этот параметр должен быть критерием необходимости установки в молельных залах системы озвучения для поддержки пасторской речи священнослужителей.

Выводы

1. В работе, на основании комплексного обследования акустики православных храмов и мусульманских соборов, разработан новый параметр восприятия канонических служб в молельных залах – т.наз. «мера высоты», связанная, по мнению авторов, с процессом приобщения прихожан к сакральности проводимых религиозных процедур и мероприятий.

2. Разработаны предложения по двум вариантам расчета и измерений этого параметра, в зависимости от объемно-планировочного решения соответствующего храма (в первую очередь, высоты главного купола) и соотношения по отдельным зонам реверберационно-шумового фона помещения.

3. Предложенный параметр требует, перед внедрением его в практику проектирования и строительства храмовых сооружений, дополнительной проверки на натурных объектах, с возможной коррекцией по их результатам методов расчета и измерений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СП 31103-99 "Здания, сооружения и комплексы православных храмов" М. 2000, (Новая редакция - СП 391.1325800.2017 «Храмы православные. Правила акустического проектирования». М., 2017)
2. Щиржецкий Х.А., Сухов В.Н., Алешкин В.М. «К вопросу обеспечения условий акустического комфорта при проектировании и строительстве зданий и сооружений в комплексах православных храмов России», журнал «БСТ: Бюллетень строительной техники», №6 (2020), с.26-27
3. Щиржецкий Х.А., Алешкин В.М., Щиржецкий А.Х. «Особенности акустических требований к молебным залам канонических конфессиональных зданий и сооружений», Труды III Всероссийской Акустической конференции (РАО), С.-Петербург, 21-25 сентября 2020 г. С. 490-497.
4. Щиржецкий Х.А., Чесноков А.Н. и др. Акустика соборов Московского Кремля. "Акустический журнал", 1998. т.44. № 4.
5. Борисов Л.А., Щиржецкий Х.А. Акустика Храма Христа Спасителя. "Сборник докладов X-ой сессии Российского Акустического общества" М. 2000.
6. Алешкин В.М., Щиржецкий Х.А., Сухов В.Н. Проблематика современного состояния акустического проектирования молебных залов мечетей // Строительство и реконструкция. 2016. №3(65).
7. Алешкин В.М., Щиржецкий Х.А., Сухов В.Н. К вопросу решения проблем акустики молебных залов мечетей на примере соборной мечети в Москве. «Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли РФ в 2016 году» - М.: Сб. научных трудов РААСН, 2017. том 2.
8. Ahnert W., Feistel S., Behrens T. Speech intelligibility prediction in very large sacral venues//Architectural Acoustics Session 4pAAa. ICA 2013 Montreal, Canada 2 - 7 June 2013.
9. Щиржецкий Х.А. «Экспресс-оценка зон разборчивости речи в помещениях» // Сборник трудов н.-т. семинара в г. Севастополе, Севастополь. 2012 г.
10. Щиржецкий Х.А., Борисов Л.А. Акустика зальных помещений. М.: ж-л «Сцена», 2002. № 21.
11. Makrinen L. Acoustics of Auditoriums in Public Buildings. Published for the Acoustical Society of America through the American Institute of Physics, 1994.
12. Barron M. Auditorium Acoustics and Architectural Design. Second Edition. Spon Press. London and New York, 2010.
13. Ahnert W., Schmidt W. «Fundamentals to perform acoustical measurements». Appendix to EASERA.
14. Kayili M. (2005). "Acoustic Solutions in Classic Ottoman Architecture", Manchester, England: Foundation for Science Technology and Civilization; also available at <http://www.fstc.co.uk>, retrieved 4 September 2007.
15. Wasim Orfali. "Room Acoustic and Modern Electro-Acoustic Sound System Design during Constructing and Reconstructing Mosques". Unpublished PhD thesis. Von der Fakultät V- Verkehrs- und Maschinensysteme der Technischen Universität Berlin. 2007.
16. Покровский Н.Б. Расчет и измерение разборчивости речи. М.: Связьиздат, 1962.
17. Вахитов Я.Ш. Слух и речь. Л.: ЛИКИ, 1973.
18. ГОСТ Р ИСО 3382-1-2013 «Измерение акустических параметров помещений», Часть 1 «Зрительные залы».

REFERENCES

1. SP 31103-99 "Buildings, structures and complexes of Orthodox churches" M. 2000, N. edition 2017-2018.
2. Ch.A. Shchirzhetskiy, V.N. Sukhov, V.M. Aleshkin. "On the issue of ensuring the conditions of acoustic comfort in the design and construction of buildings and structures in the complexes of Orthodox churches in Russia", the journal "BST: Bulletin of building technology". No. 6 (2020). Pp. 26-27.
3. Shchirzhetskiy Ch.A., Aleshkin V.M., Shchirzhetskiy A.Ch. "Features of acoustic requirements for prayer halls of canonical confessional buildings and structures", Proceedings of the III All-Russian Acoustic Conference (RAO), St. Petersburg, September 21-25, 2020. 490-497.
4. Shchirzhetskiy Ch.A., Chesnokov A.N. and others. Acoustics of the cathedrals of the Moscow Kremlin. - "Acoustic Journal", 1998. v. 44. no. 4.
5. Borisov L.A., Shchirzhetskiy H.A. Acoustics of the Cathedral of Christ the Savior. - "Collection of reports of the X-th session of the Russian Acoustic Society" M. 2000.
6. Aleshkin V.M., Shchirzhetskiy Ch.A., Soukhov V.N. Problems of the current state of acoustic design of prayer halls in mosques. - Magazine "Construction and reconstruction", 2016. No. 3 (65).
7. Aleshkin V.M., Shchirzhetskiy Ch.A., Soukhov V.N. On the issue of solving the problems of acoustics of prayer halls of mosques on the example of the cathedral mosque in Moscow. - "Fundamental, exploratory and applied research of the RAASN on scientific support for the development of architecture, urban planning and the construction industry of the Russian Federation in 2016" - M.: Sat. scientific works of RAASN, 2017. volume 2.

8. Ahnert W., Feistel S., Behrens T.. Speech intelligibility prediction in very large sacral ven-ues // Architectural Acoustics Session 4pAAa. ICA 2013 Montreal, Canada 2 - 7 June 2013.
9. Shchirzhetskiy Ch.A. "Express-assessment of speech intelligibility zones in the premises" // Collection of works of scientific-technical. seminar in Sevastopol, - Sevastopol. 2012.
10. Shchirzhetskiy Ch.A., Borisov L.A. Hall acoustics. M.: Zh-l "Scene", 2002. No. 21.
11. Makrinenko L. Acoustics of Auditoriums in Public Buildings. Published for the Acoustical Society of America through the American Institute of Physics, 1994.
12. Barron M. Auditorium Acoustics and Architectural Design. Second Edition. Spon Press. London and New York, 2010.
13. Ahnert W., Schmidt W. "Fundamentals to perform acoustical measurements". Appendix to EASERA.
14. Kayili M. (2005). "Acoustic Solutions in Classic Ottoman Architecture", Manchester, England: Foundation for Science Technology and Civilization; also available at. <http://www.fstc.co.uk>, retrieved 4 Sep-tember 2007.
15. Wasim Orfali. "Room Acoustic and Modern Electro-Acoustic Sound System Design during Construct-ing and Reconstructing Mosques". Unpublished PhD thesis. Von der Fakultat V-Verkehrs- und Maschi-nensysteme der Technischen Universitat Berlin. 2007.
16. Pokrovsky N.B. Calculation and measurement of speech intelligibility. M.: Svyazizdat, 1962.
17. Vakhitov Y. Sh. Hearing and speech. L.: LIKI, 1973.
18. GOST R ISO 3382-1-2013 "Measurement of acoustic parameters of premises", Part 1 "Spectator halls".

Информация об авторах:

Щиржецкий Христофор Алексеевич

ФГБУ «Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук» (НИИСФ РААСН), лаборатория №42 «Акустика залов», г. Москва, Россия, старший научный сотрудник, кандидат технических наук.

E-mail: svn36@mail.ru

Алешкин Василий Михайлович

ФГБУ «Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук» (НИИСФ РААСН), лаборатория №42 «Акустика залов», г. Москва, Россия, ведущий инженер, аспирант (соискатель).

E-mail: wsjk@mail.ru

Субботкин Антон Олегович

ФГБУ «Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук» (НИИСФ РААСН), лаборатория №42 «Акустика залов», г. Москва, Россия, ведущий инженер.

Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, г. Москва, Россия.

E-mail: a.o.subbotkin@yandex.ru

Information about authors:

Schirjetsky Christofof Al.

Research Institute of Building Physics of Russian Academy of Architecture and Building Science (NIISF RAASN), Moscow, Russia, senior research fellow.

E-mail: svn36@mail.ru

Aleshkin Vasily M.

Research Institute of Building Physics of Russian Academy of Architecture and Building Science (NIISF RAASN), Moscow, Russia, leading engineer.

E-mail: wsjk@mail.ru

Subbotkin Anton Ol.

Research Institute of Building Physics of Russian Academy of Architecture and Building Science (NIISF RAASN), Moscow, Russia, leading engineer.

Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia.

E-mail: a.o.subbotkin@yandex.ru