

Акустические приборы и системы

УДК 534.6

Ю.С. Костючок, Л.С. Мартинович, Д.Е. Моторнюк, В.А. Нечитайло, А.В. Храпачевский, А.Н. Продеус, д.-р.техн.наук

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», ул. Политехническая, 16, корпус 12, г. Киев, 03056, Украина.

Акустическая паспортизация учебных помещений

Разработана форма акустического паспорта, удобная как для администрации учебных заведений, так и архитекторов, занимающихся реконструкцией помещений. Произведена акустическая паспортизация семи учебных помещений НТУУ «КПИ», позволившая выявить недостатки этих аудиторий, а также продемонстрировавшая удобство разработанной формы. Библиографический список: 16, рис. 1, табл. 1.

Ключевые слова: акустический паспорт; акустические характеристики помещений; уровень шума; разборчивость речи; коэффициент низкого тона.

Введение

Акустические характеристики помещений оказывают существенное влияние на качество восприятия учебного материала [1-7]. Это означает, что архитекторы и дизайнеры должны руководствоваться требованиями акустического паспорта при проектировании новых учебных заведений. Кроме того, это означает, что администрация учебных заведений должна уделять значительное внимание акустической экспертизе и паспортизации эксплуатируемых учебных помещений.

В период с 1999 по 2009 гг. Д. Брэдли, Х. Сато и В. Янгом [1-4] получены чрезвычайно важные результаты в виде количественных оценок степени влияния шума и реверберации на разборчивость речи в учебных помещениях. При этом экспериментально показано, что шумовая помеха значительно опаснее реверберации, во-первых, из-за близости основных источников шума, которыми являются рядом сидящие ученики. Ситуация усугубляется тем, что речевой шум обладает высокими маскирующими свойствами из-за подобия спектров помехи и сигнала. Вместе с тем, время реверберации в учебных помещениях редко превышает 0,9 с. Это означает, что диффузная часть звуковых отражений, именуемая «поздней реверберацией», имеет сравнительно низкую интенсивность

и потому обладает слабым маскирующим эффектом.

Другим важным результатом, представленным в работах [1-4], является количественная оценка зависимости разборчивости речи от возраста слушателей. Так, показано, что для достижения словесной разборчивости 95% для школьников 6 лет отношение сигнал-шум должно быть не ниже 16 дБ, для школьников 11 лет порог может быть снижен до 9 дБ, а для студентов - до 1 дБ.

Результаты исследования больших лекционных аудиторий, снабженных системами звукоусиления и оборудованных индукционными петлями в помощь слабослышащим, представлены в работе К. Эггеншвилера [5]. При этом отмечено, что уровень шума должен быть в пределах 30-40 дБА, уровень речевого сигнала должен составлять 65-75 дБ \pm 6 дБ, а время реверберации в помещениях объемом до 1000 м³ не должно превышать 0,8 с. При оценивании разборчивости речи рекомендовано обеспечивать значения индекса STI > 0,56 и значения коэффициента потери согласных ALcons > 8%.

В работе К. Ди Марино [6] характеристики большого лекционного зала оценивались как путем компьютерного моделирования (программа ODEON), так и путем измерений ряда акустических параметров: времени реверберации T60, EDT, индекса разборчивости речи STI и коэффициента ясности C80.

Результаты оценки акустики трех лекционных помещений в Лундском университете (Швеция) приведены в работе Р. Юсефа [7]. В качестве проблемы отмечено все более широкое использование технических аудиовизуальных средств, которые устанавливались в помещениях, не рассчитанных для этого. При экспериментальных исследованиях оценивались время реверберации T20, сила звука G, коэффициент ясности C50 и индекс разборчивости речи STI.

Очевидным недостатком работ [5,6,7] является превалирующее внимание к оцениванию реверберационных характеристик помещений, тогда как в [1-4] ясно указано на более важную

роль шумовой помехи. Вместе с тем, во всех упомянутых выше работах [1-7] отсутствуют четкие рекомендации по выбору оцениваемых параметров для акустической паспортизации помещений.

Цель данной работы состояла в разработке формы акустического паспорта для акустической экспертизы уже имеющихся учебных помещений. При этом ставилась задача представления информации в форме, удобной как для администрации учебного заведения, так и для архитекторов, занимающихся реконструкцией помещений.

1. Акустическая паспортизация

Акустическую паспортизацию учебных помещений производят, стремясь решить следующие задачи:

- обеспечение максимальной разборчивости речи для сохранения информационной составляющей передаваемого сообщения;
- сохранение естественного тембра голоса для сохранения эстетического компонента;
- обеспечение правильной локализации звукового образа (совмещение его со зрительным образом) для повышения фразовой (смысловой) разборчивости речи.

Акустическую паспортизацию помещений осуществляют как на этапе проектирования новых помещений, так и на этапе реконструкции существующих помещений [8]. В первом случае акустический паспорт представляет собой сводку результатов акустического моделирования, расчетов и рекомендаций по корректированию технического и дизайнерского проектов с учетом требований акустического проектирования. Во втором случае акустический паспорт представляет собой сводку результатов измерений акустических характеристик имеющихся помещений и рекомендаций по корректированию этих характеристик.

В обоих случаях ключевым является перечень характеристик, определяющих конечные, т.е. «потребительские» свойства помещения. Очевидно, состав таких перечней в первую очередь определяется функциональным назначением помещений. Так, например, при паспортизации помещений для прослушивания музыки общее количество оцениваемых характеристик и параметров помещения может достигать двух десятков, хотя на практике этот перечень может быть сокращен до четырех-пяти базовых показателей [9, 10, 11].

Перечень характеристик и параметров помещений, предназначенных для прослушивания речи, также может быть сделан достаточно компактным, что делает его удобным для обозрения и анализа.

2. Перечень оцениваемых параметров

В данной работе предложено в состав акустического паспорта ввести параметры, одинаково информативные как для администрации учебных заведений, так и для архитекторов и дизайнеров. Это параметры, характеризующие шумность помещения, разборчивость речи и качество речевого сигнала.

При оценивании уровня шума в учебном помещении, целесообразно оценивать как средний, так и максимальный уровни шума. Очевидно, такие измерения разумно проводить во время учебных занятий, поскольку в перерывах уровень шума может значительно возрастать, что типично и естественно для учебных заведений.

Для суждения о разборчивости речи в помещении в данной работе оценивались показатели в виде коэффициентов четкости (ясности)

$$C_{50} = 10 \lg \frac{E_{50}}{L_{50}}, \quad C_{80} = 10 \lg \frac{E_{80}}{L_{80}},$$

где $E_{80} = \int_0^{80} h^2(t) dt$, $L_{80} = \int_0^{\infty} h^2(t) dt$, $h(t)$ - им-

пульсная характеристика помещения. По результатам оценивания C_{50} вычислялся коэффициент слоговой разборчивости $K_c = (1 + 10^{-0,1 C_{50}})^{-0,2}$.

Целесообразность оценивания показателя C_{80} может быть обоснована тем, что исследуемые помещения принадлежат кафедре акустики и акустоэлектроники, где вопросам компьютерной обработки музыки уделяется значительное внимание.

Мерой качества речевого сигнала в данной работе служил коэффициент низкого тона $K_{НТ} = (T_{125} + T_{250}) / (T_{500} + T_{1000})$, где в числителе и знаменателе указаны значения времени реверберации на частотах 125, 250, 500 и 1000 Гц.

Помимо указанных выше показателей, оценивалась также зависимость времени реверберации от частоты. При этом оценки EDT , T_{20} и T_{30} вычислялись методом Шредера, по огибающей $R_{\phi}(t)$ функции $h_{\phi}(t)$, полученной из импульсной характеристики $h(t)$ путем фильтра-

ции ее набором октавных фильтров [13]:

$$R_{\phi}(t) = \int_{-\infty}^{-t} h_{\phi}^2(-\tau) d\tau. \text{ Полезность такой зависи-}$$

мости в том, что она позволяет архитекторам и дизайнерам составить более полное представление о влиянии конструктивных особенностей помещений на акустические характеристики.

3. Организация экспериментальных исследований

Измерения шума в учебных помещениях проводились с использованием цифрового шумомера SL-814.

Оценивание времени реверберации осуществлялось в соответствии с рекомендациями ISO 3382-2 [13]. При этом использовался импульсный метод, согласно которому на диск компьютера записывался отклик помещения на импульсное воздействие в виде звука лопнувшего резинового шарика. Полученная запись затем подвергалась обработке для оценивания времени реверберации.

Запись и обработка звука производилась с использованием микрофона МКФ МД-186 и внешней звуковой карты M-Audio FastTrackPro, в среде Matlab 2009b.

4. Результаты экспериментов

Результаты оценивания основных акустических параметров учебных помещений представлены в таблице 1. Как следует из приведенных данных, средний уровень шума во всех помещениях превышает допустимое санитарными нормами СССР [14] значение 40 дБА. В помещениях 212а и 231 это превышение является значительным и составляет 7-8 дБА. Заметим, однако, что эти помещения удовлетворяют санитарным нормам Украины, где нормальным для учебных помещений считается уровень шума 50 дБА [16]. Как следует из табл. 1, максимальный уровень шума превышает норму лишь в двух помещениях. При этом в помещении 438 зафиксировано превышение нормы на 6 дБА.

Таблица 1. Результаты оценивания основных акустических параметров учебных помещений

Параметры	Оценки параметров							Норма
	212	212а	224	229	231	233	438	
Номер помещения	212	212а	224	229	231	233	438	
Средний уровень шума, дБА	44	48	42	43	47	44	44	≤ 40/50*
Макс. уровень шума, дБА	48,6	51	47	47,5	55,1	48,6	60,7	≤ 55/65*
Время прихода первого отражения, с	0,01	0,027	0,012	0,02	0,01	0,017	0,015	≤ 0,05
C ₅₀ , дБ	4,59	3,68	1,57	-0,95	-0,82	4,40	-0,95	≥ -2
C ₈₀ , дБ	8,38	7,02	4,49	1,81	2,39	8,32	1,81	≥ -3
k_c	0,76	0,79	0,84	0,89	0,89	0,77	0,89	> 0,8
k_{HT}	0,84	0,90	0,81	0,90	0,87	0,98	0,90	0,9-1/1-1,3**

* числа перед символом «/» означают норму для лекционных помещений, а числа после символа «/» означают норму для лабораторных и компьютерных помещений [14, 15]

** числа перед символом «/» означают норму для речи, а числа после символа «/» означают норму для музыки

Значения коэффициента четкости C_{50} для всех помещений заключены в допустимых пределах, обеспечивая 80% слоговую и 95% фразовую разборчивость [11]. Значения коэффициента C_{80} также находятся в разрешенном диапазоне.

Вместе с тем, значения коэффициента разборчивости речи k_c в помещениях 212 и 233 оказались на 4-5% ниже нормативного значения, что свидетельствует о несколько повышенном уровне диффузных отражений звука.

Судя по значениям коэффициента низкого тона k_{HT} , качество речевого сигнала является наиболее низким в помещениях 212 и 224. В остальных помещениях качество звука можно признать удовлетворительными, а лаборатория 233 может быть признана одинаково пригодной как для речи, так и для музыки.

Результаты построения зависимостей времени реверберации от частоты представлены на рис. 1.

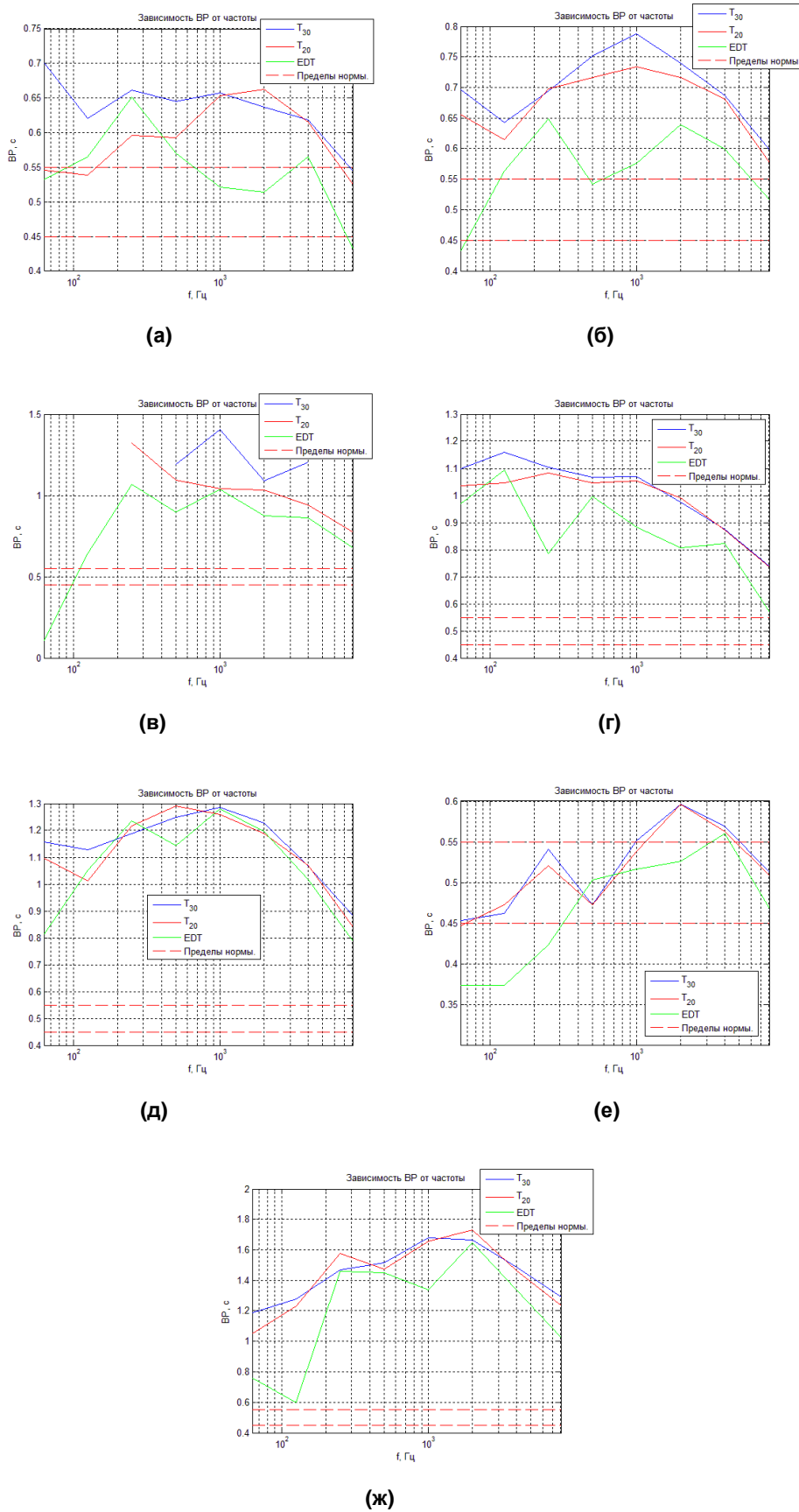


Рис. 1. Графики зависимостей оценок времени реверберации от частоты для помещений 212 (а), 212а (б), 224 (в), 229 (г), 231 (д), 233(е), 438(ж)

5. Обсуждение полученных результатов

Представленные результаты свидетельствуют, что в некоторых из обследованных помещений уровень шума заметно, на 7-8 дБ превышает санитарные нормы СССР, хотя по санитарным нормам Украины шумность этих помещений находится в пределах нормы.

Полученные оценки разборчивости речи на основе лишь реверберационных свойств помещений могут рассматриваться лишь как предварительные, поскольку разборчивость речи зависит от совместного действия шума и реверберации. Поэтому в дальнейшем целесообразно использовать показатель в виде отношения полезной и вредной составляющих звука [1]

$$U_{50} = 10 \lg \frac{E_{50}}{L_{50} + N},$$

где N - уровень фонового шума.

Индекс разборчивости речи STI может быть приближенно вычислен через U_{50} на основе соотношения [12] $U_{50} \cong 31 \cdot STI - 16$.

В Приложении приведен образец предлагаемой формы акустического паспорта, свидетельствующий о принципиальной возможности компактного описания акустических свойств учебных помещений.

Заключение

Произведена акустическая экспертиза семи учебных помещений НТУУ «КПИ», позволившая выявить недостатки некоторых учебных помещений, а также продемонстрировавшая удобство разработанной формы акустического паспорта.

Список использованных источников

1. Bradley J., Reich R. and Norcross S. On the combined effects of Signal-to-noise ratio and room acoustics on speech intelligibility. - J.Acoust.Soc.Am., Vol. 106, 1999.
2. Sato H., Bradley J. Evaluation of acoustical conditions for speech communication in working elementary school classrooms. - J. Acoust.Soc.Am., 106 (4), 2004.
3. Bradley J., Sato H. Speech intelligibility test results for grades 1, 3 and 6 children in real classrooms, Proceedings of ICA, Kyoto, 2004.
4. Yang W. and Bradley J. Effects of room acoustics on the intelligibility of speech in classrooms for young children. - J. Acoust. Soc. Am. 125 (2), February 2009. - P. 922-933.
5. Eggenschwiler K. Lecture Halls - Room Acoustics and Sound Reinforcement. - Forum Acusticum 2005 Budapest. - P. 1-6.
6. Di Marino C. et al. Acoustic Enhancement of Proposed Grand Lecture Hall using Computer Simulation. - Canadian Acoustics, Vol. 39, No. 1, 2011. - P. 43-48.
7. Youssef R., Bard D., Mahmoud F., Esa N. Acoustical Quality Assessment of Lecture halls at Lund University, Sweden. - Inter-noise, Melbourne, Australia, 16-19 November, 2014.
8. Алдошина И., Приттс Р. Музыкальная акустика. – Композитор, С-Пб, 2006.
9. Bradley J. The Evolution of Newer Auditorium Acoustics Measures. – Canadian Acoustics, Vol.18, No.4, pp. 13-23. – 1990.
10. Bradley J.S. Review of objective room acoustics measures and future needs. – Proceedings of the International Symposium on Room Acoustics, ISRA 2010, Melbourne, Australia, August 29-30, 2010, pp. 1-8.
11. Ahnert W., Schmidt W. Appendix to EASERA Manual: Fundamentals to Perform Acoustical Measurements. – Berlin, 2006. – P. 1 – 53.
12. Marshall Long. Architectural Acoustics. – Elsevier Academic Press, 2006. – 873 p.
13. ГОСТ Р ИСО 3382-2-2013. Акустика. Измерение акустических параметров помещений. Часть 2. Время реверберации обычных помещений. – Москва, Стандартинформ, 2014. – 20 с.
14. Санитарные нормы допустимого шума в помещениях жилых и общественных зданий и на территории жилой застройки. – Министерство здравоохранения СССР, Главное санитарно-эпидемиологическое управление. – 1984 г.
15. Атаманчук П., Мендерецький В., Панчук О., Чорна О. Основи охорони праці. Навчальний посібник. – Київ «Центр учбової літератури», 2011. – 222 с.
16. ДСН 3.3.6.037-99 Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. – Постанова ОЗ України N 37 від 01.12.99, м.Київ.

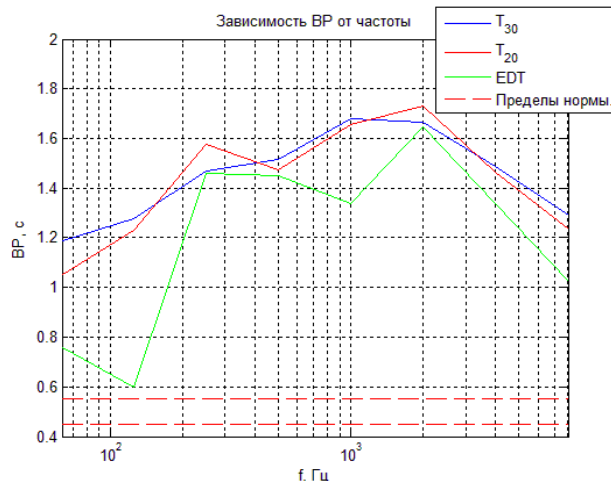
Поступила в редакцию 01 июня 2016 г.

Акустический паспорт аудитории №438

1.	Дата и время	16.11.15 13:30-14:00
2.	Место проведения измерений	Корпус № 12 НТУУ "КПИ", аудитория 438: ул. академика Янгеля, 16/9
3.	Состав экспертной группы	Костючок Ю.С., Мартинович Л.С., Моторнюк Д.Е., Нечитайло В.А.

Измеренные параметры помещения

4.	Частота, Гц	ВР, с		
		T30	T20	EDT
	63	1,1875	1,0540	0,7576
	125	1,2773	1,2318	0,5978
	250	1,4667	1,5744	1,4614
	500	1,5176	1,4734	1,4512
	1000	1,6802	1,6584	1,3365
	2000	1,6660	1,7327	1,6487
	4000	1,4862	1,4624	1,3374
8000	1,2925	1,2346	1,0261	



	Параметр	Измеренное значение	Норма
5.	Время прихода первого отражения, с	0,015	≤0,05
6.	Средний уровень шума, дБА	44	≤50
7.	Макс. уровень шума, дБА	60,7	≤55
8.	Индекс четкости C50, дБ	-0,9499	≥-2
9.	Индекс прозрачности C80, дБ	1,8085	≥-3
10.	Коэффициент слог. разборчивости	0,8887	> 0,8
11.	Тембр (коэффициент низкого тона)	0,8960	0,9 -1,0

Заключение экспертной группы:

В помещении зафиксировано максимальное значение уровня шума, превышающее санитарные нормы, что объясняется наличием смежной лаборатории, стены и двери которой пропускают шум в аудиторию. Кроме того, помещение является гулким. Рекомендуется провести коррекцию акустических характеристик данной аудитории.

УДК 534.6

Ю.С. Костючок, Л.С. Мартинович, Д.Е. Моторнюк, В.А. Нечитайло, А.В. Храпачевський, А.М. Продеус, д.-р.техн.наук

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»,
вул. Политехнічна, 16, корпус 12, м. Київ, 03056, Україна.

Акустична паспортизація навчальних приміщень

Розроблено форму акустичного паспорта, зручну як для адміністрації навчальних закладів, так і для архітекторів, що займаються реконструкцією приміщень. Виконано акустичну паспортизацію семи навчальних приміщень НТУУ «КПІ», що дозволило виявити недоліки цих приміщень, а також продемонстровано зручність розробленої форми. Бібл. 16, рис. 1, табл. 1.

Ключові слова: акустичний паспорт; акустичні характеристики приміщень; рівень шуму; розбірливість мовлення; коефіцієнт низького тону.

UDC 534.6

Y. Kostyuchok, L. Martynovych, D. Motorniuk, V. Nechytailo, A. Hrapachevskiy, A. Prodeus, Dr.Sc.
National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute",

st. Polytechnique, 16, Kiev, 03056, Ukraine.

Acoustic certification of classrooms

A form of classrooms acoustic passport handy both school administrators and architects involved in the reconstruction of the rooms was developed. Produced acoustic certification of seven classrooms NTU "KPI" revealed the shortcomings of these audiences and demonstrated the convenience of the developed form. Ref. 16, figure 1, table 1.

Keywords: acoustic passport; the acoustic characteristics of the rooms; noise level; speech recognition; low tone coefficient.

References

1. Bradley, J., Reich, R. and Norcross, S. (1999). On the combined effects of Signal-to-noise ratio and room acoustics on speech intelligibility. J. Acoust. Soc. Am., Vol. 106.
2. Sato, H. and Bradley, J. (2004). Evaluation of acoustical conditions for speech communication in working elementary school classrooms. J. Acoust. Soc. Am. 106 (4), Pt. 1, Pp.2064–2077.
3. Bradley, J. and Sato, H. (2004). Speech intelligibility test results for grades 1, 3 and 6 children in real classrooms. Proceedings of ICA, Kyoto.
4. Yang, W. and Bradley, J. (2009). Effects of room acoustics on the intelligibility of speech in classrooms for young children. J. Acoust. Soc. Am. 125 (2), Pp. 922–933.
5. Eggenschwiler K. (2005). Lecture Halls - Room Acoustics and Sound Reinforcement. Forum Acusticum, Budapest, Pp. 1–6.
6. Di Marino C. et al. (2011). Acoustic Enhancement of Proposed Grand Lecture Hall using Computer Simulation. Canadian Acoustics, Vol. 39, No. 1, Pp. 43–48.
7. Youssef, R., Bard, D., Mahmoud, F. and Esa, N. (2014). Acoustical Quality Assessment of Lecture halls at Lund University, Sweden. Inter-noise, Melburn, Australia, 16-19 November, Pp. 934–943.
8. Aldoshyna, I. and Pritts, R. (2006). Musical acoustics. Composer, S-Pb, 719 p. (Rus)
9. Bradley J. (1990). The Evolution of Newer Auditorium Acoustics Measures. Canadian Acoustics, Vol.18, No.4, Pp. 13–23.
10. Bradley, J. (2010). Review of objective room acoustics measures and future needs. Proceedings of the International Symposium on Room Acoustics, ISRA 2010, Melbourne, Australia, August 29-30, Pp. 1–8.
11. Ahnert, W. and Schmidt, W. (2006). Appendix to EASERA Manual: Fundamentals to Perform Acoustical Measurements. Berlin, Pp. 1–53.
12. Marshall Long. (2006). Architectural Acoustics. Elsevier Academic Press, P. 873.

13. GOST R ISO 3382-2-2013 (2014). Acoustics. Measurement of acoustic parameters of rooms. Part 2: Reverberation time of conventional rooms, Moscow, Standartinform, P. 20. (Rus)
14. Sanitary norms of permissible noise in residential and public buildings and in residential areas (1984), The Ministry of Health of the USSR, the Central Sanitary and Epidemiological Department (Rus)
15. *Atamanchuk, P., Mendereckiy, V., Panchuk, O. and Chorna, O.* (2011). Basics of labor protection. Tutorial. Kyiv "Center of educational literature", P. 222. (Rus)
16. DSN 3.3.6.037-99 (1999). Sanitary standards of industrial noise, infrasound and ultrasound. Resolution of the Ukraine Health Ministry 12.01.99, No. 37, Kyiv (Ukr)