

УДК 534.84, 726.6

АКУСТИКА КОЛОННОГО ЗАЛА ИМЕНИ Н. В. ЛЫСЕНКО НАЦИОНАЛЬНОЙ ФИЛАРМОНИИ УКРАИНЫ

В. Т. ГРИНЧЕНКО*, А. П. МАКАРЕНКОВ*, Л. Н. ОСИПЧУК**,
А. Г. РУДНИЦКИЙ*, Н. А. ТРОХИМЕНКО**

* Институт гидромеханики НАН Украины, Киев

** ГосНИИ строительных конструкций Госстроя Украины, Киев

Получено 31.05.99

Приведены результаты акустических исследований, выполненных в Колонном зале имени Н. В. Лысенко Национальной филармонии Украины после реставрации и реконструкции. Получены данные о времени реверберации, распределении звуковых отражений по площади зрительских мест, энергетических параметрах звукового поля, однородности звукового поля и звукоизоляции зала. Опыт реконструкции здания и зала филармонии показывает, что при надлежащем контроле и соблюдении основных представлений современной архитектурной акустики использование современных строительных материалов и технологий вполне возможно сохранить акустические свойства уникальных сооружений, имеющих культурную и историческую ценность.

Наведені результати акустичних досліджень Колонного залу імені М. В. Лисенка Національної філармонії України після реставрації та реконструкції. Одержані дані про час реверберації, розподіл звукових відбиттів по площині глядацьких місць, енергетичних параметрів звукового поля, однорідності звукового поля та звукоізоляції залу. Досвід реконструкції будівлі і залу філармонії показує, що при відповідному контролі та дотриманні основних вимог сучасної архітектурної акустики й використанні сучасних будівельних матеріалів та технологій цілком можливо зберегти акустичні властивості унікальних споруд, які мають культурну та історичну цінність.

The results of acoustical tests of the Column Hall named after M. V. Lysenko of the National Philharmonic Society of Ukraine are presented. The data were obtained describing the reverberation time, echo distribution over the area of the spectator places, energy parameters of the sound field, homogeneity of the sound field and the sound insulation of hall. The experience of reconstruction of both the building and hall of the Philharmonic Society shows that when one will abide by the basic demands of modern architectural acoustics and use modern construction materials and technology it is absolutely possible to preserve the acoustical properties of unique buildings of cultural and historical value.

ВВЕДЕНИЕ

В 1882 году в верхней части Александровского (ныне Владимирского) спуска в Киеве было построено двухэтажное здание Купеческого собрания, которому суждено было сыграть значительную роль в становлении и развитии украинского музыкального искусства. Здание построено по проекту и под руководством киевского городского и епархиального архитектора В. Н. Николаева. Местная газета "Киевлянин" за 1882 год писала: "Во вторник 30 ноября состоялось открытие купеческого собрания в новом прекрасно устроенным доме. Все помещения второго этажа отделаны с большим вкусом, но особенно выдается танцевальный зал. Изящная простота – вот его характеристика. Обширный, в два света, с широкими хорами вокруг, поддерживаемыми изящной колоннадой под белый мрамор, этот зал не блестит ни позолотой, ни яркой росписью, но он необыкновенно эффектен... Едва ли можно сомневаться, что этот зал скоро приобретет большую популярность" [1]. И позднее: "... Помещение использовалось как концертный зал, здесь проходили праздники, литературные и музыкальные вечера, собрание различных Союзов и обществ, здесь

выступали гастролеры, отмечавшие великолепную акустику зала."

Колонный зал филармонии имеет богатую и драматическую историю. В нем выступали исполнители с мировыми именами: пианисты С. Рихтер и Е. Гилельс, скрипач Д. Ойструх, виолончелист М. Ростропович, дирижеры С. Турчак, Е. Светланов, К. Цекки, композиторы Н. Лысенко, А. Хачатурян, С. Прокофьев, Д. Шостакович. В зале пели знаменитые украинские коллективы и солисты. Все это подтверждало репутацию зала как одного из лучших в стране, и расценивалось как несомненная удача архитектора В. Н. Николаева.

Однако в сороковые – восьмидесятые годы этого века в результате ряда эксплуатационных аварий здание филармонии начало разрушаться. Косметические ремонты уже мало помогали. Рассматривалось даже предложение о сносе здания, но его "спасла" акустика Колонного зала. В стенограмме совещания, проходившего в СМ УССР 19.01.53 года, отмечалось: "Помещение, которое занимает филармония, – это единственное помещение, которое подходит для филармонии в смысле специальных акустических условий. Другого помещения в Киеве мы не найдем" [2].

Но только в начале 90-х годов было принято

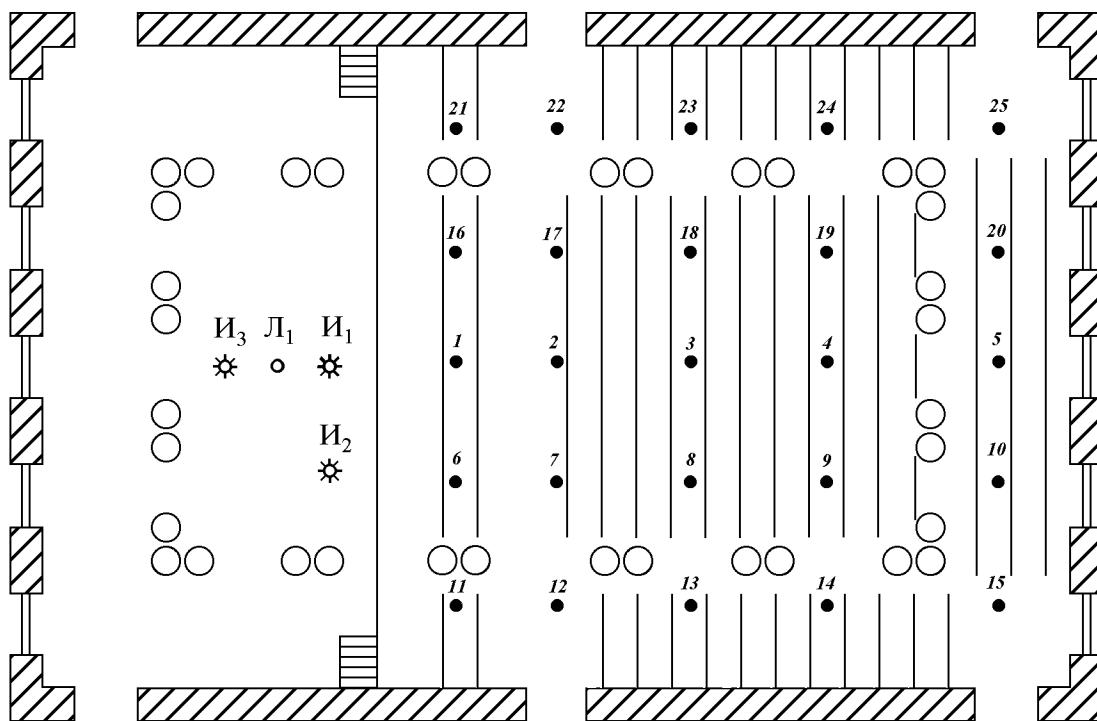


Рис. 1. План зала філармонії:
 I_1, I_2, I_3 – точки розташування джерел звука (громкоговорителів);
 L_1 – точка розташування імпульсного джерела звука;
 $1, 2, \dots$ – точки вимірювання акустических параметрів

решение восстановить первоначальную структуру здания, имевшего уже статус памятника архитектуры XIX века. В 1992 году здание филармонии было закрыто на реконструкцию и реставрацию (архитектор В. К. Хромченков). Спустя четыре года, 1 декабря 1996 года, благодаря труду многих коллективов, в обновленном Колонном зале состоялся большой праздничный концерт, знаменовавший начало новой страницы в истории Национальной филармонии Украины.

Этому событию предшествовала также большая работа группы акустиков Государственного научно-исследовательского института строительных конструкций (НИИСК), Института гидромеханики НАН Украины и АО "Киевпроект", выполнявшаяся по специально разработанной и утвержденной Министерством культуры Украины программе под руководством академика НАН Украины В. Т. Гринченко. Основной целью реставрационных работ было не только воссоздание архитектурных форм, но и сохранение уникальных акустических качеств Колонного зала при использовании новых технических решений, технологий и

современных материалов.

1. ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗАЛА

Объективные данные об акустических характеристиках зала филармонии были получены лабораторией строительной и архитектурной акустики НИИСК в результате измерений, проведенных в 1992 году [3].

Зал филармонии выполнен в классических традициях, характерных для многих музыкальных залов – в плане он имеет прямоугольную форму со следующими размерами: 30×19.7 м, максимальная высота – 11.5 м (рис. 1). Воздушный объем зала составляет $V_3 \approx 5800$ м³.

Основными несущими конструкциями являются кирпичные стены, оштукатуренные известково-гипсо-песчаным составом с последующим покрытием тонким слоем отделочной краски. Пол в зале выполнен из трехслойных паркетных щитов толщиной 40 мм, существовавших до реконструкции, и покрытых лаком. Площадь пола (без учета сцены) составляет около 400 м². По периметру зала

на высоте 5 м расположен балкон шириной ≈ 4.2 м, удерживаемый колоннами первого яруса. 36 колонн нижнего и 36 колонн верхнего ярусов после восстановительного ремонта также оштукатурены тем же составом, что и стены, по слою драны и шерсти. По штукатурке колонн нанесены шпаклевочный и отделочный слой (так называемая "венецианская" штукатурка под мрамор). Перекрытие зала – деревянный плоский потолок над балконом и куполообразный подвесной потолок (плафон) с плоской центральной частью над партером зала. Конструкция и отделка плафона потолка в процессе реконструкции остались без изменения. По продольной оси зала подвешены три многоярусные хрустальные люстры, розетки которых выполняют роль вентиляционных отверстий и делают объемы зала и чердака акустически связанными. Часть колонн, потолок, балкон зала и его элементы были заново выполнены из дерева и соответствующим образом оштукатурены. В торцевых стенах зала размещено 10 окон прямоугольной формы размером 3.7×2.17 м в первом ярусе и 10 окон фигурной формы на балконе. При этом общая площадь остекленных поверхностей составляет приблизительно 121 m^2 .

Перечислим конструктивные и отделочные изменения, произошедшие в процессе выполнения строительных и реставрационных работ.

- Деревянные фермы покрытия здания были заменены на металлические, к которым перенавешен плафон потолка зала. При этом увеличился объем чердака. Изменение его акустических характеристик было скомпенсировано внесением дополнительного звукоизолирующего фонда, что также способствовало улучшению звукоизоляции зала.
- Изменена конструкция перекрытия между залом и фойе. Несущие деревянные балки перекрытия были заменены на металлические (27 двутавров), по которым уложены деревянные балки сечением 200×250 мм. Засыпка полости перекрытия выполнена сухим прокаленным песком толщиной слоя 80 мм ($\rho = 1300 - 1500 \text{ кг/m}^3$). Полость шириной 60 мм между подшивочным потолком (со стороны фойе) и деревянным настилом в перекрытии полностью заполнена звукоизолирующими материалом – базальтовыми звукоизолирующими матами марки БЗМ ($\rho = 25 \text{ кг/m}^3$). Несущая часть пола выполнена из двух слоев досок толщиной 40 и 25 мм, уложенных в различных направлениях. По верхнему слою досок (25 мм) через слой электроизоляционного

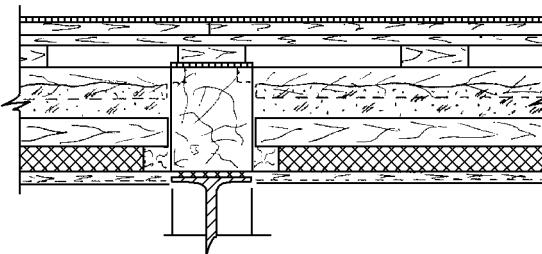


Рис. 2. Конструкция перекрытия (слои сверху вниз): паркетный щит – 40 мм, прокладка из картона – 3 мм, несущая часть пола из досок – 65 мм, воздушный промежуток – 40 мм, засыпка сухим прокаленным песком – 80 мм, прокладка из листов пергамина – 1 мм, деревянный настил – 70 мм, звукоизолирующие маты марки БЗМ, подшивка из досок – 30 мм, штукатурка – 20 мм

картона толщиной 3 мм уложены паркетные щиты. Конструкция перекрытия показана на рис. 2.

- Передний и задний торцы сцены обшиты фанерованной древесностружечной плитой толщиной 18 мм. Сцена имеет размеры 9.7×19.7 м, ее площадь составляет 191 m^2 . Планшет сцены выполнен из деревянных брусьев толщиной 60 мм, высота сцены над уровнем пола зала – 0.8 м.
- Окна и центральная балконная дверь зала выполнены двойными с раздельными переплетами и тройным остеклением (стеклопакет плюс стекло). Конструкция указанных окон и дверей принята с учетом требований обеспечения необходимой звукоизоляции зала.
- Глухие внутренние двери зала – двухстворчатые филенчатые толщиной ~ 50 мм с уплотнением в притворах с помощью прокладок из профильной резины.
- Убранство сцены и окон в зале полностью заменено на новое. Фоновый занавес размером 14×3 м, боковые кулисы сцены размером 8×3 м выполнены из бархата в складку. Общая площадь бархатного убранства сцены составляет $\sim 90 - 95 \text{ m}^2$. Помимо фонового занавеса на сцене предусмотрен также занавес из легкой ткани типа "маркиз" площадью $\sim 50 \text{ m}^2$. На окнах зала навешены портьеры и шторы. Около 50% площади окна закрывается портьерами и ламбрекеном из бархата в складку.

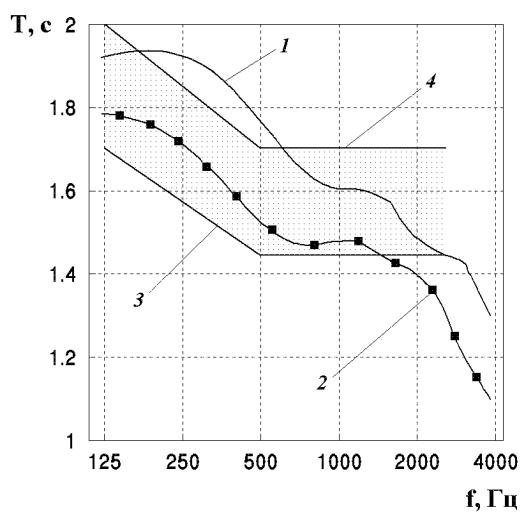


Рис. 3. Частотная характеристика времени реверберации:
1 – пустой зал;
2 – зал, заполненный слушателями;
3 и 4 – оптимальные значения времени реверберации для звучания камерной музыки и пения (3) и симфонической музыки (4)

- В зале установлено 595 отреставрированных кресел (вместо существовавших 700 кресел). Из них 431 кресло расположено в партере и 164 кресла – на балконе. В креслах обновлены материалы наполнения сидений и их обивка, выполненная из мелковорсистой мебельной ткани толщиной ~ 2 мм. На спинках кресел дополнительно установлены накладки (145×465 мм) из аналогичного материала.
- В проходах партера уложена ковровая дорожка толщиной ~ 8 мм и общей площадью ~ 85 м².
- На балконе над сценой установлен концертный орган фирмы “Шпет” (Швейцария), спроектированный с учетом акустических свойств и характеристик зала.
- Зал дополнительно оборудован системами вентиляции и кондиционирования воздуха с размещением вентиляционных решеток на стенках зала, в полу сцены и на плафоне. В системах вентиляции и кондиционирования воздуха предусмотрено шумопоглощение.

Решения по всем изменениям, касающимся акустики концертного зала, принимались на основании акустических расчетов и с учетом результатов соответствующих измерений, проводимых в

акустических камерах НИИСКА.

2. АКУСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗАЛА

В процессе акустического обследования зала после его реконструкции был проведен комплекс натурных измерений, включавший измерение времени реверберации, однородности звукового поля, импульсные измерения для оценки структуры ранних звуковых отражений и определения энергетических параметров звукового поля, измерения звукоизоляции ограждающих конструкций зала, а также уровней проникающих шумов.

Измерения проводились как в пустом зале, полностью подготовленном к эксплуатации, так и в зале, заполненном публикой на 70–80 %. При измерениях использовалась прецизионная измерительная аппаратура фирм “Bruel & Kjær” и “Роботрон”. Параллельно звуковые процессы записывались на измерительный магнитофон с последующей обработкой сигналов на компьютере. Точки измерений и места расположения источников звука показаны на плане зала (см. рис. 1). Полученные по стандартной методике [4] и усредненные по площасти слушательских мест частотные характеристики времени реверберации при различных положениях источника звука приведены на рис. 3. Из рисунка видно, что характеристики стандартного времени реверберации (T , с) имеют спадающий характер от низких частот к верхним. На средних частотах значения T составляют в среднем 1.7 с и 1.5 с для пустого и заполненного зала соответственно. Заполнение зала публикой привело к снижению времени реверберации по всему частотному диапазону на величину $\Delta T = 0.14–0.3$ с.

На том же рисунке приведены частотные характеристики рекомендуемых оптимальных значений T для данного зала, определяющих качественное звучание музыкальных произведений различных жанров. Сопоставление характеристик показывает, что практически во всем частотном диапазоне значения времени реверберации в зале со слушателями лежат в области оптимальных значений для камерной, симфонической музыки и пения ($T_{\text{опт}} \approx 1.4–1.7$ с). Для органной музыки фактическое время реверберации несколько меньше оптимального, однако это обстоятельство было учтено швейцарской фирмой “Шпет” при проектировании органа, предназначенного для установки в зале филармонии и адаптированного к его акустическим характеристикам.

Сравнение усредненных частотных характеристик времени реверберации пустого зала до и по-

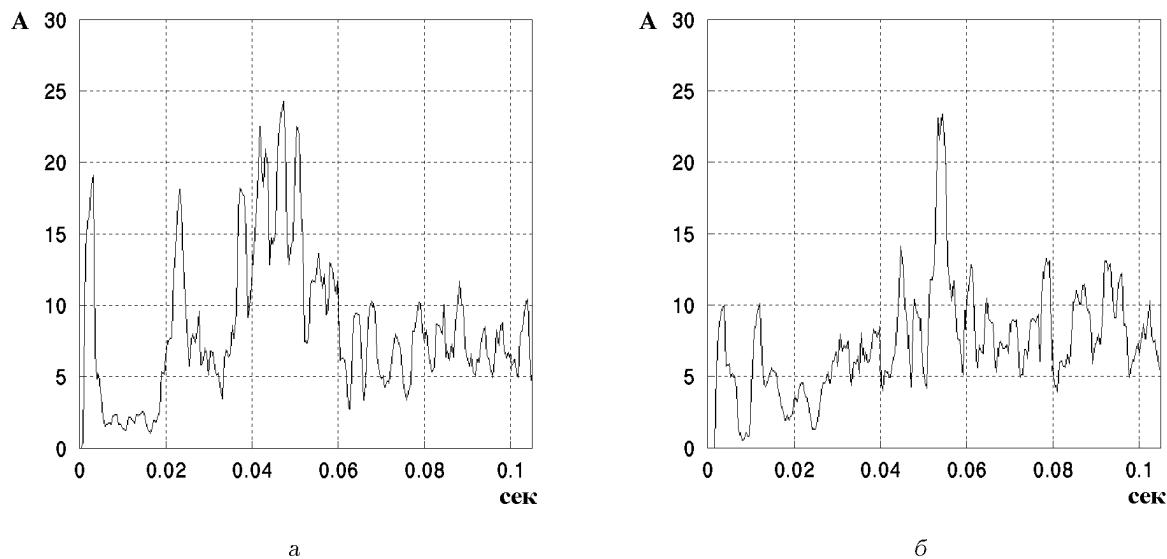


Рис. 4. Отклик імпульсного сигналу:
а – в центральній частині підлоги (точка 3), б – під балконом (точка 13)

сле реконструкції показує, що частотна характеристика T зала після реконструкції стала менше частотнозалежною. Относительне збільшення значень T в області низких частот (до 0.3 с на частоті 125 Гц) являється позитивним фактором, приведшим до збільшенню значення коефіцієнта низького тона $K_{\text{нт}}$ від 1.05 до реконструкції до 1.17 після реконструкції. Це сприяє улучшенню тембральної окраскизвучання [5].

Существенным критерием акустического качества зала является структура ранних звуковых отражений. Первые интенсивные отражения, приходящие к слушателю с оптимальным временем запаздывания, дополняют прямой звук, улучшают слышимость и разборчивость, способствуют улучшению ясности и прозрачности звучания, а также созданию эффекта пространственности. Анализ графических построений хода звуковых лучей методом теории геометрической акустики [3] показал, что наиболее полно фронтальными и боковыми отражениями обеспечиваются места, расположенные в центральной части партера (внутри межколонного пространства). При этом расчетное время запаздывания этих отражений составляет от 30–35 мс в передней части партера до 10–15 мс в конце зала, что в целом соответствует оптимальным значениям [6]. Менее благоприятными являются слушательские места, расположенные под балконом и места на балконе. Первичные фронтальные отражения для слушателей под балконом, из-за его экранирующего дей-

ствия, практически отсутствуют (сюда поступает лишь рассеянная звуковая энергия), а время запаздывания боковых отражений составляет 5–9 мс, что несколько меньше рекомендемых значений. Для слушателей балкона направленные боковые отражения отсутствуют, а фронтальные составляют менее 10 мс, что также не в полной мере соответствует оптимальным значениям.

Результаты импульсных измерений подтвердили выводы о структуре звуковых отражений, полученные на основании графических построений. В качестве импульсного сигнала при измерениях использовался широкополосный сигнал (выстрелы из стартового пистолета) длительностью $\tau \approx 0.5$ мс.

На рис. 4 приведены амплитудно-временные характеристики отклика зала в центральной части партера (точка 3) и в партере под балконом (точка 13) при расположении импульсного источника на авансцені. Из рисунка видно, что первое интенсивное отражение поступает в точку 3 через 20 мс после прихода прямого звука, второе – через 34 мс, последующие через 39, 43 и 47 мс соответственно. При этом все ранние интенсивные отражения с уровнями, близкими к уровню прямого звука, поступают в рассматриваемую точку партера в интервале первых 50 мс, что в полной мере соответствует рекомендованным оптимумам [6]. Полученные значения времени запаздывания первых отражений, а также интервалы следования последующих и их амплитуд позволяют охарактеризовать структуру импульсного отклика в точке 3

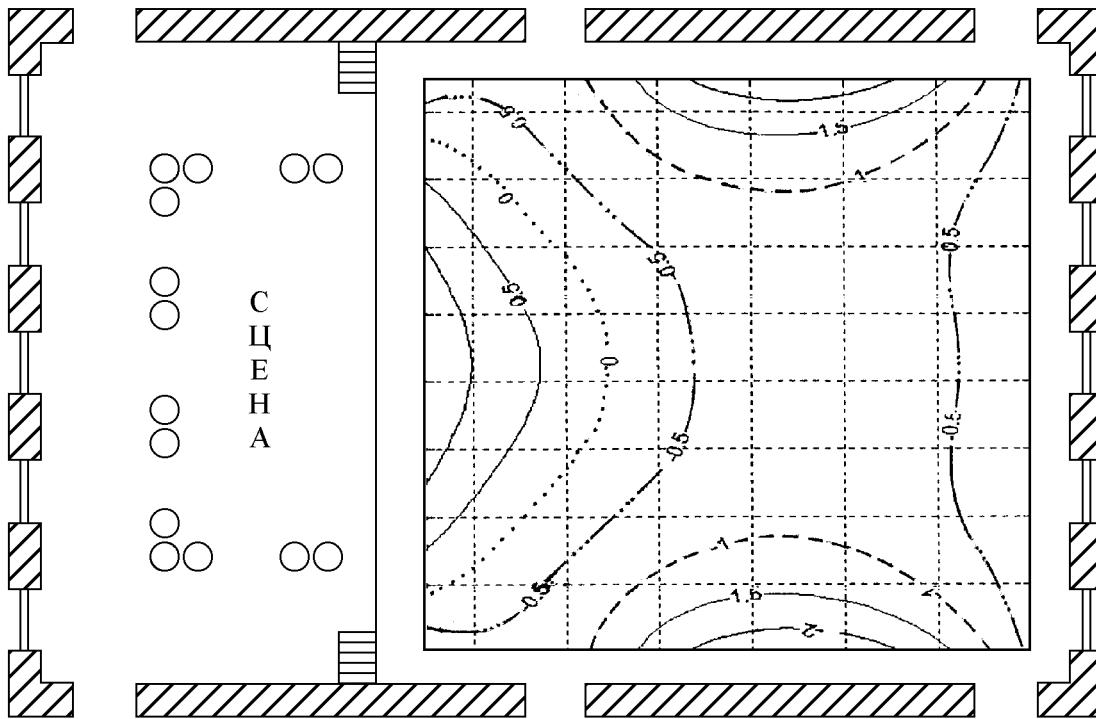


Рис. 5. Распределение значений времени запаздывания первых интенсивных направленных отражений по площади партера

как вполне благоприятную.

Структура отклика, полученного под балконом (точка 13), заметно отличается от предыдущей и характеризуется явной недостаточностью энергии ранних звуковых отражений. С недостаточным уровнем поступает сюда также и прямой звук из-за экранирующего действия колоннами. Распределение значений времени запаздывания первых интенсивных направленных отражений по площади партера приведены на рис. 5.

Записи импульсных откликов были также использованы для вычисления следующих энергетических критерий звукового поля [7]: индекса гулкости

$$G_{50} = 10 \lg \frac{E_{\infty} - E_{50}}{E_{50}}, \quad (1)$$

индекса четкости

$$D_{50} = 10 \lg \frac{E_{50}}{E_{\infty}} \quad (2)$$

и наиболее показательного критерия акустического качества музыкальных залов – индекса ясности

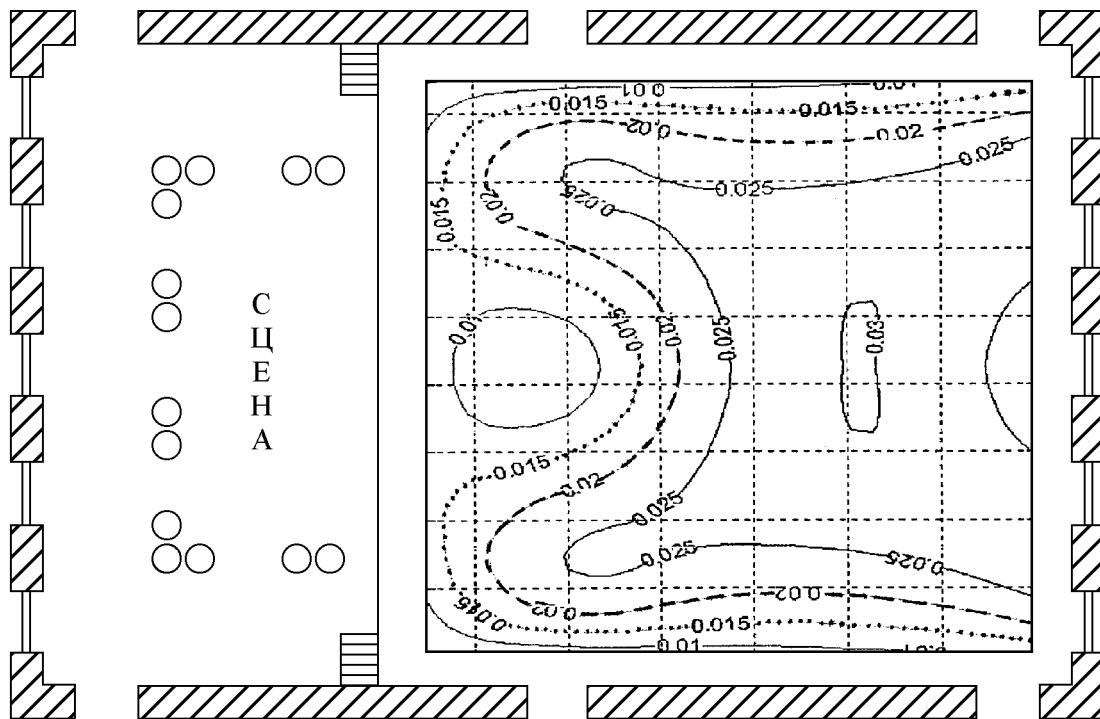
$$C_{80} = 10 \lg \frac{E_{80}}{E_{\infty} - E_{80}}. \quad (3)$$

Здесь E_{50} , E_{80} – текущие интегралы реверберации, взятые к моментам времени 50 и 80 мс, а E_{∞} – полный интеграл реверберации.

Полученные значения индекса C_{80} для различных точек размещения измерительного микрофона, при расположении импульсного источника на сцене, составляют от -2 до +1.5 дБ. Сравнение этих значений с приводимыми в литературе [6, 8] показывает, что индекс ясности зала филармонии полностью соответствует рекомендованной области оптимальных значений. Распределение значений C_{80} по площади партера показано на рис. 6.

Значения индекса гулкости составляет по площади зала от +1.8 до +6.0 дБ, а индекса четкости – от -4 до -7.5 дБ. Следует отметить, что до настоящего времени область оптимальных значений этих индексов для концертных залов и их взаимосвязь с критериями субъективных оценок окончательно не установлена.

Для достижения хорошей акустики залов весьма важным является обеспечение в них достаточной диффузности звукового поля. Прямоугольная форма помещения с гладкими поверхностями не способствует созданию диффузного звукового поля. Для повышения диффузности необходимо, чтобы те участки ограждений, которые не связаны с

Рис. 6. Распределение значений C_{80} по площади партера

формированием полезных направленных отражений, создавали ненаправленные звуковые отражения и способствовали рассеянию звуковой энергии.

В зале филармонии это достигается в первую очередь расчленением всех стен балконом и формой подвесного плафона потолка. Существенную роль в увеличении диффузности звукового поля играют спаренные колонны нижнего и верхнего ярусов, эффективно рассеивающие звуковые волны, начиная с частот 700–800 Гц. Дополнительное рассеяние звуковых волн высоких частот обеспечивается рельефным декором балкона, потолка, колонн и стен. Улучшению диффузности способствуют также и оптимальные соотношения основных геометрических размеров зала.

Известно, что между двумя условиями диффузности звукового поля – однородностью и изотропностью – существует тесная вероятностная связь, а при нарушении одного из этих условий со значительной вероятностью нарушается и другое. Указанное обстоятельство дает право вместо проверки изотропности пользоваться значительно более простой проверкой однородности. В нашем случае для оценки диффузности звукового поля в зале была использована методика [6], предусматри-

вающая измерение лишь однородности звукового поля. Для этого в различных точках зала, расположенных в области преобладания отраженного звука, производились измерения уровней звукового давления при работе ненаправленного источника звука, излучающего октавные полосы белого шума в диапазоне 63–8000 Гц. В таблице представлены значения средних абсолютных отклонений по площади зала (δ_i) относительно среднего уровня, измеренного на расстоянии от источника, равном граничному радиусу, для октавных полос в диапазоне 250–8000 Гц. Результаты показывают, что значения δ_i не превышают по площади слушательских мест 3 дБ в низкочастотной области, 2 дБ в области средних частот и 1.5 дБ в области высоких частот. Эти данные, а также достаточно низкое значение критической частоты зала ($f_{kp}=38$ Гц), рассчитанное по данным измерений T , выше которой распределение собственных частот объема зала становится нерегулярным, позволяют сделать заключение о том, что диффузность звукового поля в зале является достаточной.

Серьезное внимание при реконструкции уделялось защите зала от проникновения внешних и внутренних шумов. Существенным недостатком зала до реконструкции являлись высокие уровни

Таблица. Средние абсолютные отклонения δ_i по площади слушательских мест партера

Средние геометр. частоты октавных полос, Гц	Центральная часть партера	Подбалконная часть партера
250	2.7	2.5
500	1.9	1.6
1000	1.1	1.1
2000	1.2	1.1
4000	0.5	0.8
8000	1.2	1.2

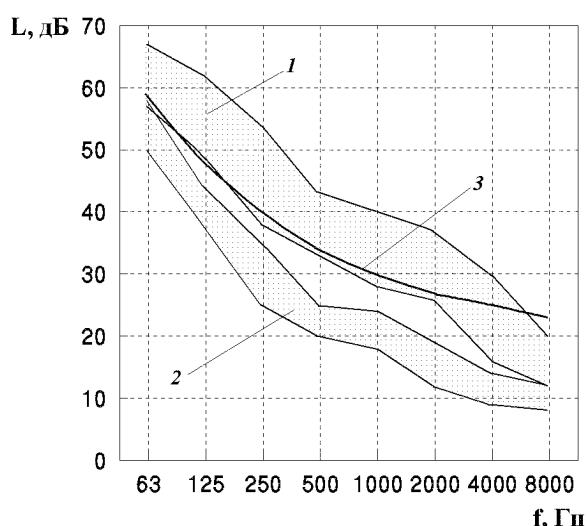


Рис. 7. Уровни шума автомобильного транспорта, проникающего в зал филармонии:

- 1 – область изменения уровней шума в партере и на сцене до реконструкции (интенсивность транспорта – 1330 экипажей/час);
 2 – то же после реконструкции (интенсивность транспорта – 3000 экипажей/час);
 3 – нормативная частотная характеристика допустимых уровней шума согласно СНиП II-12-77

шума автомобильного транспорта, проникающего через окна. При интенсивности движения около 1350 экипажей в час уровни проникающего шума превышали допустимые значения на 2–9 дБ в диапазоне 63–2000 Гц и на 7–9 дБ по уровню звука.

На основании проведенных расчетов для установки была предложена конструкция оконного блока о раздельными переплетами и тройным остеклением: стеклопакет плюс стекло. Толщина стекол в стеклопакете составляла 8 и 4 мм с воздушным промежутком между ними 16 мм. Толщина стекла во внутренней створке составляла 4 мм, а расстояние между стеклопакетом и стеклом –

160 мм. Проведенные лабораторные испытания предложенной конструкции окна показали, что она обеспечивает индекс изоляции воздушного шума $R_w = 46$ дБ и, что особенно важно, имеет достаточно высокую звукоизоляцию в области низких частот ($R = 25–40$ дБ).

Натурные измерения уровней шума в зале после реконструкции проводились в вечернее время, соответствующее времени проведения концертов. Результаты измерений показали, что несмотря на значительно возросшую интенсивность движения автотранспорта (более 3000 экипажей в час) измеренные уровни шума в зале не превышают предельно допустимых значений, установленных СНиП II-12-77 “Зашита от шума” (рис. 7).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Комплекс проектных, строительных и реставрационных работ, проведенных в здании Национальной филармонии Украины, позволил сохранить основные акустические характеристики Колонного зала имени Н. В. Лысенко, определяющиеся его объемом, формой, пропорциями основных геометрических размеров, очертанием внутренних поверхностей и характером их отделки. Исходя из этого, были приняты меры, сохраняющие указанные параметры в процессе реконструкции. Проведенные измерения показали, что объективные акустические характеристики Колонного зала находятся в пределах оптимальных значений, установленных нормативными документами и общепринятыми международными рекомендациями.

Опыт реконструкции здания и зала филармонии показывает, что при надлежащем контроле и соблюдении основных представлений современной архитектурной акустики и использовании современных строительных материалов и технологий вполне возможно сохранить акустические свой-

ства уникальных сооружений, имеющих культурную и историческую ценность. За время, прошедшее после реконструкции в Колонном зале проводится активная концертная деятельность. Как зрители, так и исполнители с мировыми именами по-прежнему отмечают высокие акустические качества зала. Такую оценку высказывают В. Крайнев, В. Спиваков, Ю. Башмет, А. Авдиевский, В. Стадлер и многие другие. Все они с большим желанием выступают в Колонном зале Национальной филармонии Украины.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают глубокую благодарность сотрудникам институтов "Укрпроектреставрация", "Киевпроектреконструкция" и АО "Киевпроект" за понимание и помощь в реализации разработанных рекомендаций.

1. Газета "Киевлянин".— Киев.— 1882.
2. Стенограмма совещания в СМ УССР от 19.01.53.— ЦГАОР. Ф. 2, оп. 8, д. 8049.— Л. 126–135.
3. Заключение по результатам исследования и оценке акустических качеств Колонного зала имени Н. В. Лысенко Национальной филармонии Украины.— К.: НИИСК, 1992.
4. ГОСТ 24146-89. Зрительные залы. Методы измерения времени реверберации.
5. Беранек Л. Л. Сравнение субъективных взглядов на качество концертных залов и объективных измерений их акустических свойств // Акуст. ж.— 1995.— 41, N 5.— С. 706–716.
6. Макриненко Л. И. Акустика помещений общественных зданий.— М.: Стройиздат, 1986.— 170 с.
7. Макриненко Л. И., Лане М. Ю., Щиржепкий Х. А. Актуальные проблемы студийной акустики // Сб. науч. трудов НИИСФ "Вопросы архитектурной акустики, защиты от шума в акустической экологии".— М.: НИИСФ, 1989.— С. 5–24.
8. Анерт В., Райхард В. Основы техники звукоусиления.— М.: Радио и связь, 1984.— 350 с.