

Юрий КОЗАК

Киевский национальный университет строительства и архитектуры, Украина

## ЕСТЕСТВЕННАЯ АКУСТИКА ЗАЛОВ КАК ФАКТОР ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ

Строительная физика, а также архитектурная акустика как ее часть занимает важное место в контексте энергосбережения. Выбор формы отражающей поверхности является главной составляющей построения отражений в акустическом расчете. В статье предложен способ систематизации отражающих поверхностей.

**Ключевые слова:** архитектурная акустика, отражающая поверхность, поверхность нормалей, поверхность отраженных лучей

### ВВЕДЕНИЕ

Проблема сбережения энергии имеет множество направлений. Разделы строительной физики непосредственно связаны с решением задач в этой области. Наряду с теплотехникой и светотехникой, архитектурная акустика также призвана развивать разработки, благодаря которым распространение звука в залах не требует дополнительных затрат электрической энергии на усиление звука. Для реализации этой задачи большое значение имеет построение экранов, отражающих естественную звуковую энергию слушателям. Актуальность проблемы усилилась в современном архитектурном мире при использовании стен и потолков сложной геометрической формы.

### 1. АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Отражения звука в области архитектурной акустики являются, как известно, лишь приложением знаний по исследованию отражений. Общая теория отражений является геометрической задачей по исследованию поверхностей высших порядков.

Отражающие свойства поверхностей, а также методы построений отражений и теория поверхностей отраженных лучей широко представлены в работах проф. А.Л. Подгорного [1, 2] и его учеников.

## 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ОТРАЖЕНИЙ

Акустическую задачу получения отражающих экранов для доставки звуковой энергии слушателям можно разложить на четыре этапа:

1. Анализ отражающих поверхностей, применяемых в архитектуре.
2. Систематизация отражающих поверхностей.
3. Исследование поверхностей нормалей.
4. Получение поверхностей отраженных лучей.

Рассмотрим их подробнее.

### 2.1. Виды отражающих поверхностей, которые используются в архитектуре

Современная архитектура не ограничивает себя в выборе форм и силуэтов зданий ни стилистически, ни технологически. Это можно увидеть в проектах и реализациях современных разработок концертных залов и культовых сооружений. Однако, в архитектуре 20-го века и ранее использовались сложные формы внутренних поверхностей, которые мало исследованы и требуют проведения акустического анализа.



Рис. 1. Профиль апсиды церкви Казанской Иконы Божьей Матери в Киеве

Сферические и цилиндрические отражающие экраны традиционно используются для строительства культовых сооружений. Эту форму придают куполам, нефам и апсидам. Построение отражений от таких поверхностей показывают, что эта форма не всегда эффективно решает проблему доставки звуковой энергии слушателям. Так, во время проведения службы, источник звука имеет как минимум два местоположения за иконостасом, откуда требуется выведение звука наружу. Расчеты показывают, что отражающий экран в виде эллипсоида может лучше решить эту задачу, что подтверждено расчетом акустики зала церкви Казанской Иконы Божьей Матери и показано на рисунках 1 и 2.

Сводчатая конструкция в форме параболоида с древних времен использовалась еще в Средней Азии и имеет название «балхи». В европейской истории параболоид применили при строительстве куполов собора Св. Петра в Риме (Италия) и Исаакиевского Собора в Санкт-Петербурге (Россия). В наши времена, эту форму использовали при строительстве покрытий Педагогичес-

кого музея в Киеве (Украина), Московского планетария (Россия), церкви в Оклахома-сити (США), планетария в Бохуме (Германия) (рис. 3) и др.

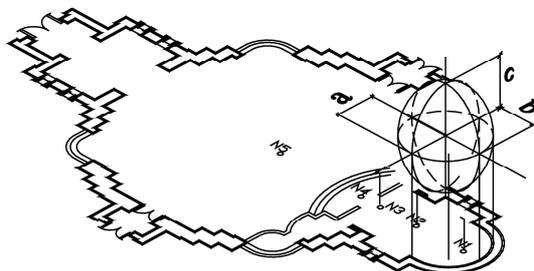


Рис. 2. Аксонометрия апсиды церкви Казанской Иконы Божьей Матери в Киеве

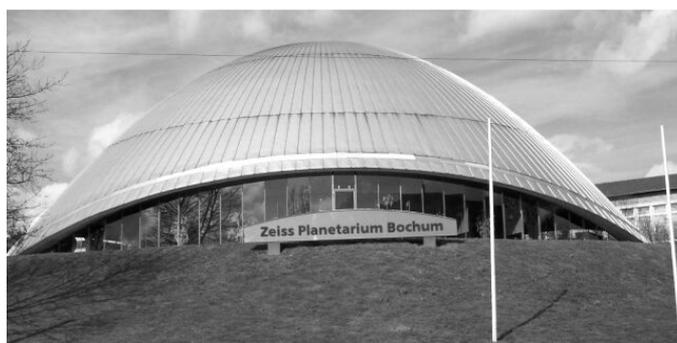


Рис. 3. Планетарий в Бохуме (Германия)

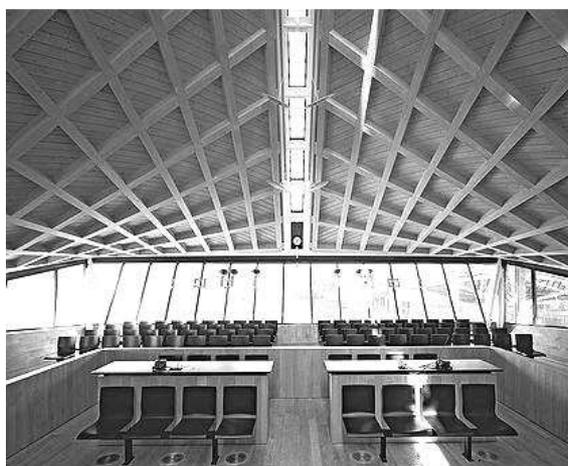


Рис. 4. Дворец Права в Антверпене (Голландия)

Форма гиперболического параболоида является довольно распространенной в строительной практике. В качестве примера можно привести покрытие здания Дворца права в Антверпене (Голландия) (рис. 4), церкви Святого Йосифа

в Мексике, Стадион в г. Калгари (Канада), крыша Национальной медицинской библиотеки в США, Commonwealth Institute в Лондоне (Великобритания), покрытие культового сооружения Mary's Cathedral в г. Сан-Франциско (США) состоит из восьми гипаров.



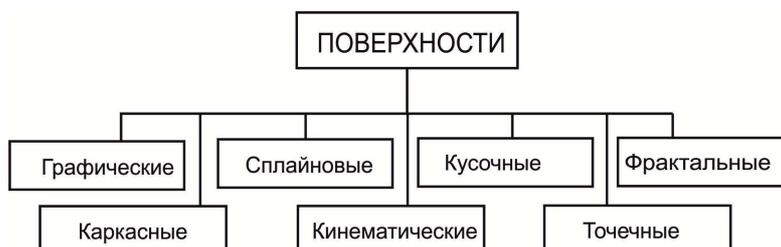
Рис. 5. Проект оперы в Гуанчжоу (Китай)

Современные архитекторы используют более сложные формы внутренних поверхностей стен и потолков. Так, проект оперы в Гуанчжоу демонстрирует подобные смелые решения (рис. 5).

## 2.2. Систематизация отражающих поверхностей

Все многообразие отражающих поверхностей необходимо систематизировать для упрощения построений и подбора оптимальной формы экранов.

Существуют различные варианты классификаций поверхностей [3]. По методу построения:



Или по методу формирования:



Однако, с точки зрения отражений, есть смысл систематизировать отражающие поверхности в привязке к методу построения отражений. Основываясь на построение отражений от нормали к поверхности, можно систематизировать отражающие поверхности по типу поверхностей нормалей к их сечениям. Таблица 1 демонстрирует разбиение поверхностей на четыре группы, соответствующие поверхностям нормалей в виде плоскости, гиперболического параболоида, кругового конуса и поверхности нормалей 4-го порядка.

Таблица 1. Систематизация отражающих поверхностей по типу поверхности нормалей

Поверхность нормалей	Отражающая поверхность	Уравнение отражающей поверхности
Плоскость (I группа)	Плоскость	$\frac{x}{a} + \frac{y}{b} + \frac{z}{c} = 1$
	Цилиндр	$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$
	Конус (эллиптический)	$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - \frac{z^2}{c^2} = 1$
	Торс	$r = r(u, v) = a(v) + u(v)$

Гиперболический параболоид (II группа)	Гиперболический параболоид	$z = \frac{x^2}{2p} - \frac{y^2}{2p}$
	Однополостный гиперболоид	$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - \frac{z^2}{c^2} = 1$
	Линейчатые спиралевидные поверхности	$z = \pm \sqrt{x^2 + y^2 - a^2} ctg \gamma + p \operatorname{Arctg} \frac{y}{x} \pm p \operatorname{Arctg}(\sqrt{x^2 + y^2 - a^2}/a)$
Круговой конус (III группа)	Круговой конус	$\frac{x^2 + y^2}{a^2} - \frac{z^2}{c^2} = 0$
	Эллипсоид вращения	$\frac{x^2 + y^2}{a^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1$
	Однополостный гиперболоид вращения	$\frac{x^2 + y^2}{a^2} - \frac{z^2}{c^2} = 1$
	Двуполостный гиперболоид вращения	$-\frac{x^2 + y^2}{a^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1$
	Параболоид вращения	$2z = \frac{x^2 + y^2}{p}$
	Тор	$(x^2 + y^2 + z^2 + a^2 - b^2)^2 = 4a^2(x^2 + y^2)$
	Циклиды Дюпена	$(x^2 + y^2 + z^2 - \mu^2 + b^2)^2 = 4(cx - a\mu)^2 + 4b^2y^2$
Поверхности Иоакимстала	$(x^2 + y^2 + z^2 - 2\mu ax)^2 = 4a^2(x^2 + y^2)$	
Поверхность нормалей 4го порядка (IV группа)	Конус общего вида	$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - \frac{z^2}{c^2} = 0$
	Эллипсоид общего вида	$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1$
	Однополостный гиперболоид общего вида	$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - \frac{z^2}{c^2} = 1$
	Двуполостный гиперболоид общего вида	$-\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1$
	Параболоид общего вида	$z = \frac{x^2}{2p} + \frac{y^2}{2p}$

### 2.3. Исследование поверхностей нормалей

Написание уравнений поверхностей нормалей осуществлялось согласно алгоритму геометрического построения.

Для поверхностей первой группы уравнение поверхности нормалей записано в виде параметрического уравнения плоскости. Его вид зависит от типа отражающей поверхности и положения нормалей.

$$\begin{aligned}x &= x_a + a_1 t + b_1 k \\y &= y_a + a_2 t + b_2 k \\z &= z_a + a_3 t + b_3 k\end{aligned}\quad (1)$$

Для отражающих поверхностей четвертой группы уравнение поверхности нормалей в параметрическом виде записывается следующим образом:

$$\begin{aligned}x &= a_1 t \cos u + a_2 \cos u \\y &= b_1 t \sin u + b_2 \sin u \\z &= c_1 t + c_2\end{aligned}\quad (2)$$

где:  $a_1, b_1, c_1, a_2, b_2, c_2$  - коэффициенты, зависящие от вида отражающей поверхности.

Так, для конуса 2-го порядка  $a_1 = t/a, a_2 = a, b_1 = t/b, b_2 = b, c_1 = -1/c, c_2 = c$ , для эллипсоида 2-го порядка  $a_1 = t/a, a_2 = a, b_1 = t/b, b_2 = b, c_1 = 1/c, c_2 = c$

Построение поверхности нормалей для IV группы показано на рисунке 6.

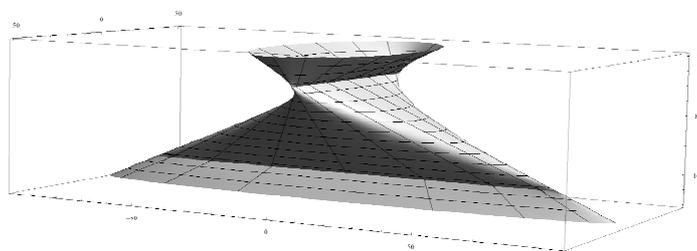


Рис. 6. Поверхность нормалей для 4-й группы отражающих поверхностей

## 2.4. Поверхности отраженных лучей

На основании уравнения нормали, записывается уравнение поверхности отраженных лучей заменой координат основания нормали на параметрическое уравнение сечения отражающей поверхности.

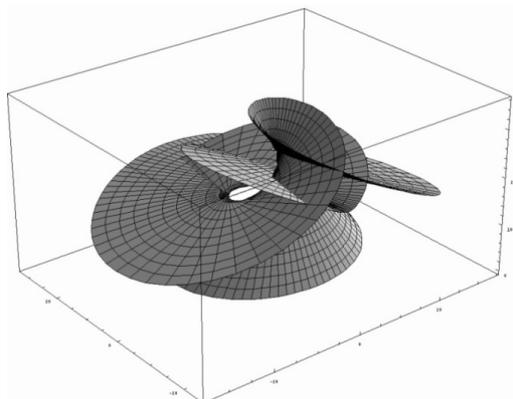


Рис. 7. Поверхность отраженных лучей

Пользуясь систематизацией отражающих поверхностей из таблицы 1, выводятся уравнения поверхностей отраженных лучей. Уравнения также отличаются коэффициентами, зависящими от вида отражающей поверхности. Внешний вид поверхности отраженных лучей показан на рисунке 7.

## ВЫВОДЫ

В задачах акустики большое значение имеет построение поверхностей отраженных лучей. С помощью систематизации, предложенной в исследовании, возможно как облегчить задачу получения отражений от заданных отражающих поверхностей, так и решить обратную задачу подбора отражающих поверхностей по наперед заданным условиям.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Підгорний О.Л., Розшарування конгруенцій нормалей поверхонь 2-го порядку вздовж ліній плоских перерізів, Прикладна геометрія та інженерна графіка, КДТУБА, К.: 1996, Вип. 60, с. 8-14; Вип. 61, с. 10-12.
- [2] Подгорный А.Л., Поверхности отражённых лучей, Прикладная геометрия и инженерная графика, Будівельник, К.: 1975, Вып. 20, с. 13-16.
- [3] Кривошапка С.Н., Иванов В.Н., Энциклопедия аналитических поверхностей, Книжный дом «Либроком», М.: 2009, 556 с.

## NATURAL ACOUSTICS IN HALLS AS AN ENERGY-SAVING FACTOR

**Construction physics and architectural acoustics as its part have an important influence on energy saving. The choice of form of reflection surfaces is the main component of acoustics calculation. Systematization of reflecting surfaces and analysis of reflections was proposed.**

**Keywords: architectural acoustics, reflecting surface, surface of normals, surface of reflected rays**