

А.М. МАКАРОВ, В.А. ЕЗЕРСКИЙ

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА ВРЕМЯ РЕВЕРБЕРАЦИИ В ПЛОСКИХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПОМЕЩЕНИЯХ С ОБОРУДОВАНИЕМ

Время реверберации является одной из основных характеристик, определяющей акустические свойства помещения. Оно зависит от совокупности многих факторов, включая объемно-планировочные параметры помещения, звукопоглощающих характеристик ограждений, а также наличие в помещениях рассеивающего звук технологического оборудования. Перечисленные факторы оказывают совместное воздействие на время реверберации, и в этой связи его определение является сложной многофакторной задачей. Ниже рассматриваются результаты компьютерного моделирования акустических процессов в плоских производственных помещениях с оборудованием, и на основе метода регрессионного анализа исследуется влияние указанных выше факторов на изменение времени реверберации.

Для выполнения анализа решались следующие задачи:

- с использованием компьютерной программы, построенной на основе метода прослеживания звуковых лучей (ray tracing) [1, 2], проведен многофакторный математический эксперимент по расчету времени реверберации;

- по результатам эксперимента построена регрессионная модель зависимости изменения времени реверберации в плоских производственных помещениях от объемно-планировочных и акустических параметров помещений и рассеивателей, а также от отношения объема оборудования к объему производственного помещения;

- произведена интерпретация результатов исследования.

При выполнении вычислительного эксперимента приняты следующие факторы: фактор X_1 – коэффициент звукопоглощения рассеивателей $\alpha_{\text{рас}}$; фактор X_2 – коэффициент звукопоглощения пола и стен помещения $\alpha_{\text{ст}}$; фактор X_3 – коэффициент, характеризующий объемно-планировочные параметры помещения $\gamma = \sqrt{bl}/h$; фактор X_4 – коэффициент звукопоглощения потолка $\alpha_{\text{пот}}$; фактор X_5 – отношение объема рассеивателей к объему производственного помещения $\Delta V_{\text{рас}}/V$. Каждый из факторов варьировался на трех уровнях. Область варьирования принята следующей: фактор X_1 – 0,03 (–1), 0,09 (0), 0,15 (+1); фактор X_2 – 0,03 (–1), 0,09 (0), 0,15 (+1); фактор X_3 – 4,90 (–1), 6,00 (0), 10,95 (+1); фактор X_4 – 0,03 (–1), 0,47 (0), 0,90 (+1); фактор X_5 – 0,01 (–1), 0,02 (0), 0,03 (+1). В скобках указаны кодированные значения факторов.

Расчеты выполнялись при размещении в помещениях рассеивателей с размерами $1,5 \times 1,5 \times 1,5$ м. Предметы размещались равномерно по всему помещению. Исследуемые помещения имели размеры: $36 \times 24 \times 6$ м, $36 \times 36 \times 6$ м, $72 \times 60 \times 6$ м. Источник шума размещался в центре помещения на высоте 1,5 м от пола и излучал энергию равномерно в сферу. Расчетная точка, в которой производился расчет уровней звукового давления после отключения источника шума, располагалась на высоте 1,5 м от пола и на расстоянии $1,5h$ от источника шума, где h – высота помещения. Для каждого варианта прослеживались пути не менее 15 000 испускаемых источником лучей.

При выборе плана эксперимента учитывалась необходимость получения адекватного математического описания величины времени реверберации. Для описания поверхности отклика $Y = f(X_1, X_2, X_3, X_4, X_5)$ проведен пятифакторный математический эксперимент. Результаты расчетов и план вычислительного эксперимента приведены в табл. 1.

При реализации плана эксперимента варианты варьирования факторов рандомизировались. Для этого последовательность проведения расчетов определялась с помощью таблицы равномерно распределенных случайных величин.

До построения модели выполнялась проверка воспроизводимости эксперимента. Выявленная с помощью критерия Кочрена [3] однородности дисперсий показала, что при уровне значимости $\alpha = 0,05$ расчетный критерий Кочрена $G_{\text{расч}} = 0,119$ меньше критического $G_{\text{кр}}^{0,05; 2; 30} = 0,198$. Следовательно, можно считать, что дисперсии опытов однородны. В таком случае дисперсию воспроизводимости эксперимента можно усреднить и принять равной $S_{\text{вос}\{Y\}}^2 = 0,002463$.

1. Матрица планирования и результаты вычислительного эксперимента по определению времени реверберации T , с

№ п/п	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	Y_1	Y_2	Y_3	\bar{Y}_i	S_i^2
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	+1	–1	+1	–1	–1	10,4158	10,4801	10,5428	10,4796	0,004032
2	+1	+1	+1	–1	+1	3,3881	3,3703	3,3962	3,3849	0,0001755
3	–1	–1	–1	0	–1	1,8724	1,8577	1,8301	1,8534	0,0004612

4	0	-1	+1	0	0	1,7696	1,7845	1,7700	1,7747	0,00007207
5	+1	+1	-1	-1	-1	3,2078	3,2438	3,2328	3,2281	0,0003403
6	-1	+1	+1	-1	-1	4,5279	4,4448	4,5284	4,5004	0,002316
7	-1	+1	-1	-1	+1	3,4413	3,4222	3,4185	3,4273	0,0001497
8	+1	+1	-1	+1	+1	0,6095	0,6299	0,6837	0,6410	0,001469
9	+1	-1	-1	+1	0	0,7763	0,9387	0,8268	0,8473	0,006908
10	+1	-1	+1	+1	+1	0,7344	0,6864	0,7633	0,7280	0,001509
11	-1	0	+1	+1	-1	0,7427	0,6913	0,8732	0,7691	0,008793
12	-1	-1	-1	+1	+1	0,7609	0,6824	0,7819	0,7417	0,002751
13	+1	0	0	0	-1	1,5403	1,5317	1,5378	1,5366	0,00001957
14	-1	-1	+1	-1	+1	12,0889	12,2257	12,2436	12,1861	0,007161
15	-1	-1	0	-1	0	11,7869	11,7424	11,7353	11,7549	0,0007822
16	+1	+1	+1	+1	-1	0,7416	0,6547	0,6477	0,6813	0,002736
17	0	-1	0	+1	-1	0,6979	0,6914	0,6160	0,6684	0,002073
18	-1	+1	+1	+1	+1	0,7339	0,7529	0,7852	0,7573	0,0006727
19	-1	+1	-1	+1	-1	0,6838	0,5990	0,7177	0,6668	0,003738
20	+1	-1	-1	-1	+1	7,1006	7,1473	7,0066	7,0848	0,005136
21	0	0	-1	-1	-1	5,9125	5,9261	5,8850	5,9079	0,0004384
22	-1	-1	0	0	0	1,8231	1,8119	1,8839	1,8396	0,001501
23	-1	0	0	+1	-1	0,7541	0,8146	0,7230	0,7639	0,002170
24	-1	-1	-1	+1	0	0,7517	0,7252	0,8163	0,7644	0,002196
25	0	0	0	0	0	1,5224	1,5902	1,5659	1,5595	0,001180
26	+1	+1	-1	-1	+1	2,7678	2,7208	2,8301	2,7729	0,003006
27	+1	+1	-1	-1	0	2,9953	2,9866	3,0523	3,0114	0,001274
28	+1	+1	+1	-1	0	3,6248	3,7109	3,7085	3,6814	0,002404
29	0	0	+1	+1	+1	0,6051	0,7505	0,7309	0,6955	0,006225
30	0	0	0	-1	+1	5,0678	5,1522	5,0746	5,0982	0,002199

По результатам, приведенным в табл. 1, с помощью метода наименьших квадратов построена регрессионная модель зависимости времени реверберации от исследуемых факторов. После оценки значимости коэффициентов уравнения по критерию Стьюдента зависимость получила следующий вид:

$$\begin{aligned}
Y = & 1,5653 - 0,6793X_1 - 1,2562X_2 + 1,0852X_3 - 3,0182X_4 + 0,2016X_5 - \\
& - 0,3754X_1X_2 + 1,2337X_1X_4 - 0,1605X_1X_5 + 1,1725X_2X_3 + \\
& + 1,5443X_2X_4 + 4,2688X_2X_5 - 0,7852X_3X_4 - 2,4353X_3X_5 + \\
& + 1,8136X_4X_5 + 0,6865X_1^2 - 1,9773X_2^2 + 1,0132X_3^2 + 2,1297X_4^2 + \\
& + 1,6959X_1X_2X_3 - 1,9957X_1X_2X_4 - 0,6686X_1X_2X_5 + 4,5795X_1X_3X_4 + \\
& + 2,0878X_1X_4X_5 - 0,1806X_2X_3X_4 + 1,5222X_2X_3X_5 - 0,8782X_3X_4X_5.
\end{aligned}$$

На основе анализа полученного уравнения регрессии выполнена интерпретация результатов исследования. Прежде всего выявлялось влияние отдельных факторов.

Установлено, что наиболее сильное влияние на время реверберации (Y) оказывает фактор X_4 – коэффициент звукопоглощения потолка ($\alpha_{\text{пот}}$). Выявлены отрицательный линейный и положительный квадратичный эффекты влияния данного фактора. Это обстоятельство свидетельствует о том, что с увеличением коэффициента звукопоглощения потолка время реверберации изменяется в наибольшей степени по сравнению с воздействием других факторов. Следует также отметить, что на характер и силу влияния фактора X_4 оказывают другие факторы. Это видно из наличия взаимодействия с ним факторов X_1 , X_2 , X_3 , X_5 как по отдельности, так и в различных сочетаниях, например в сочетании с X_1 и X_3 , X_1 и X_5 .

На втором месте по силе влияния оказался фактор X_2 – коэффициент звукопоглощения пола и стен $\alpha_{\text{ст}}$. Выявлены отрицательные линейный и квадратичный эффекты данного фактора X_2 , свидетельствующие о неоднозначном влиянии его в рассматриваемом диапазоне изменений. Характер и силу влияния фактора X_2 также зависит от связи его с другими факторами. Наибольшее взаимодействие проявляется в сочетании с фактором X_4 .

Несколько меньшее влияние на время реверберации оказывает фактор X_3 – коэффициент, характеризующий объемно-планировочные параметры помещения $\gamma = \sqrt{bl}/h$. Выявлены положительные линейный и квадратичные эффекты данного фактора. Это свидетельствует о том, что с увеличением фактора

X_3 время реверберации возрастает. Отмечено также взаимодействие X_3 с другими факторами, кроме фактора X_1 , что свидетельствует о практически полном отсутствии взаимосвязи между коэффициентом, характеризующим объемно-планировочные параметры помещения, и коэффициентом звукопоглощения оборудования.

Для фактора X_1 выявлены незначительные отрицательный линейный и положительный квадратичный эффекты. Также выявлено взаимодействие фактора X_1 с другими факторами, кроме, как уже отмечалось ранее, фактора X_3 .

Наименьшее влияние оказывает фактор X_5 . Выявлен лишь слабый положительный линейный эффект. Но при этом следует отметить, что фактор X_5 взаимодействует со всеми остальными факторами.

В целом выполненный анализ уравнения регрессии свидетельствует о достаточно сложном характере влияния на время реверберации как отдельных факторов, так и при их взаимодействии.

На рис. 1 в качестве примера представлена зависимость времени реверберации от коэффициента звукопоглощения потолка (X_4) и коэффициента звукопоглощения оборудования (X_1). Из графика видно, что на величину времени реверберации значительное влияние оказывает звукопоглощение потолка. При этом снижение времени реверберации происходит неравномерно. При изменении $\alpha_{\text{пот}}$ от 0,03 до 0,68 и малых коэффициентах звукопоглощения рассеивателей происходит значительное уменьшение времени реверберации. С увеличением коэффициента звукопоглощения рассеивателей наблюдается дополнительное

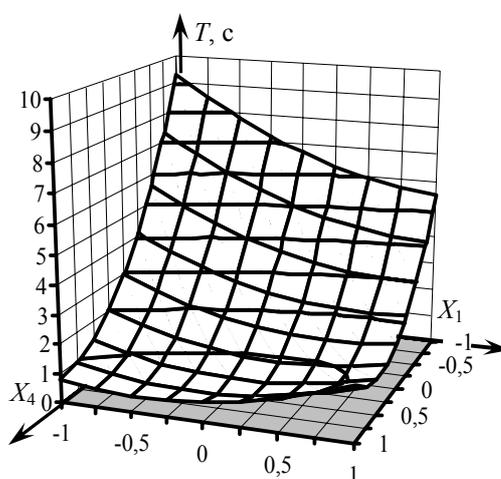


Рис. 1. Зависимость времени реверберации (T , с) в плоском производственном помещении от коэффициента звукопоглощения рассеивателей ($\alpha_{\text{рас}}$) и коэффициента звукопоглощения потолка ($\alpha_{\text{пот}}$) ($Y = f(X_1; X_4)$ при $X_2 = 0; X_3 = 0; X_5 = 0$)

незначительное уменьшение времени реверберации. При дальнейшем росте $\alpha_{\text{пот}}$ от 0,68 до 0,90 время реверберации практически не изменяется. При этом влияние коэффициента звукопоглощения рассеивателей не проявляется.

В целом произведенные исследования показали, что регрессионный анализ является эффективным инструментом для исследования сложного многофакторного процесса формирования звукового поля в помещениях с технологическим оборудованием, рассеивающих звуковую энергию. В частности результаты выполненного исследования позволили определить эффективную область применения звукопоглощающих облицовок потолка для снижения шума в производственных помещениях с рассеивателями в зависимости от их объемно-планировочных и акустических параметров, а также от плотности размещения и звукопоглощающих характеристик технологического оборудования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Schroeder, M.R. Computer models for concert hall acoustics / M.R. Schroeder // Amer. J. Phys. – 1973. – V. 41, № 4. – P. 461 – 471.
2. Воронков, А.Ю. Особенности использования метода прослеживания звуковых лучей при оценке шума в производственных помещениях / А.Ю. Воронков, А.М. Макаров, П.Ю. Потылицин // Труды ТГТУ : сб. науч. ст. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2005. – Вып. 17. – С. 208 – 211.
3. Гмурман, В.Е. Руководство к решению задач по теории вероятности и математической статистике / В.Е. Гмурман – М. : Высшая школа, 2004. – 404 с.