

МИНИСТЕРСТВО ЦИФРОВОГО РАЗВИТИЯ, СВЯЗИ И
МАССОВЫХ КОММУНИКАЦИЙ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ ИМ. ПРОФ. М. А.
БОНЧ-БРУЕВИЧА»

Факультет РТС

Кафедра ЦТМ

Учебная дисциплина «Звуковое вещание»

КУРСОВОЙ ПРОЕКТ

**«Расчет аппаратно-студийного комплекса телерадиовещания и
аудиотехники: расчет акустического оформления студий, театров и
концертных залов»**

Выполнил: ст. группы РЦТ-22

Балан Кирилл Андреевич

Проверила: ст. преподаватель кафедры ЦТМ

Свиньина О.А.

Санкт-Петербург

2025 г.

«Расчет аппаратно-студийного комплекса телерадиовещания и аудиотехники: расчет акустического оформления студий, театров и концертных залов»

Вариант: 503

Группа: РЦТ-22

Студент: Балан Кирилл Андреевич

Выполните расчет помещения аппаратно-студийного комплекса телерадиовещания и аудиотехники на требуемые акустические условия:

Помещение: Студия звукозаписи

Форма помещения: четырехугольная

Тип помещения: камерная

Размеры помещения:

высота $h = 6.7$ м

ширина $b = 10.9$ м

длина $l = 17.6$ м

площадь пола $S = 192$ м² объем $V = 1285$

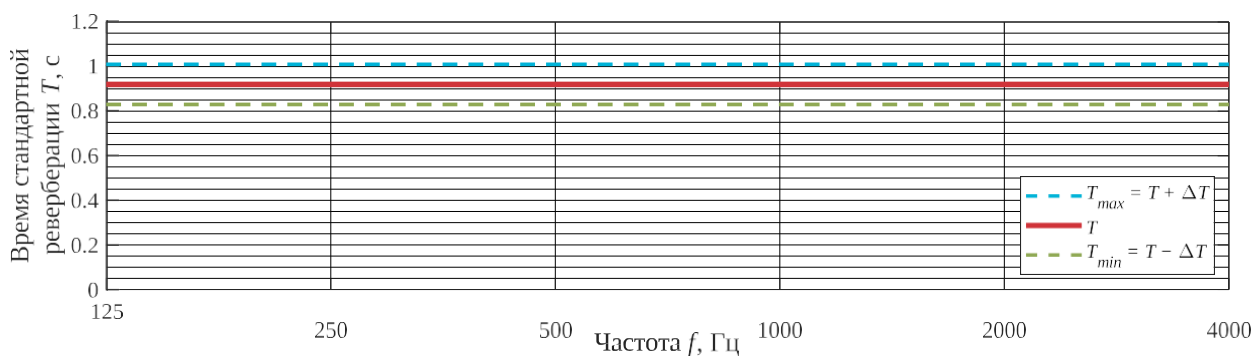
м³ Количество исполнителей: 32

Оптимальное время стандартной реверберации:

$T = 0.92$ с

$T(125 \text{ Гц}) = 0.92$ с

$\Delta T = 0.09$ с



Примечание:

Поглощающие материалы размещены в передней части студии со стороны окна в студийную аппаратную, отражающие/рассеивающие звук материалы – по бокам и сзади от исполнителей.

Дата выдачи задания: 18.02.2025
Руководитель курсового проекта:
Свинына О. А.

Дата сдачи проекта: 08.06.2025
старший преподаватель кафедры ЦТМ

Содержание

Содержание	3
Введение.....	4
Определение требуемого звукопоглощения в помещениях студийного комплекса	5
Расчет звукопоглощения, вносимого основным фондом	8
Расчет звукопоглощения, вносимого специальными материалами и конструкциями.....	9
Расчет времени стандартной реверберации	11
Расчет звукоизоляции студийного помещения.....	13
Построение и анализ трехмерной модели студийного помещения	17
Заключение	26
Список используемой литературы	27

Введение

В данном курсовом проекте целью работы является изучение теоретического и практического методов расчётов акустических параметров помещений.

Все расчёты выполняются для следующих частот: 125 Гц, 250 Гц, 500 Гц, 1000 Гц, 2000 Гц, 4000 Гц.

План выполнения курсового проекта:

- Изучение теории, методических указаний и дополнительной литературы.
- Выполнение теоретического расчёта времени стандартной реверберации с помощью методических указаний.
- Выполнение практического расчёта времени стандартной реверберации с помощью программы Ulysses.
- Анализ и сравнение полученных результатов.

Определение требуемого звукопоглощения в помещениях студийного комплекса

Тип проектируемого помещения (студии звукозаписи): студия звукозаписи, форма – четырехугольная.

Необходимо выполнить расчет помещения, имеющего площадь пола $S_{\text{п}} = 192 \text{ м}^2$ и высоту потолка $h = 6,7 \text{ м}$, объём помещения равен $V = 1285 \text{ м}^3$.

Количество исполнителей и сотрудников – 32.

Требуется обеспечить время стандартной реверберации $T = 0,92 \text{ с}$. с допустимым отклонением $\Delta T = 0,09 \text{ с}$.

$$T_{\min} = 0,92 - 0,09 = 0,83 \text{ с.}$$

$$T_{\max} = 0,92 + 0,09 = 1,01 \text{ с.}$$

На частоте 125 Гц необходимо обеспечить время стандартной реверберации $T_{125\text{Гц}} = 0,92 \text{ с}$.

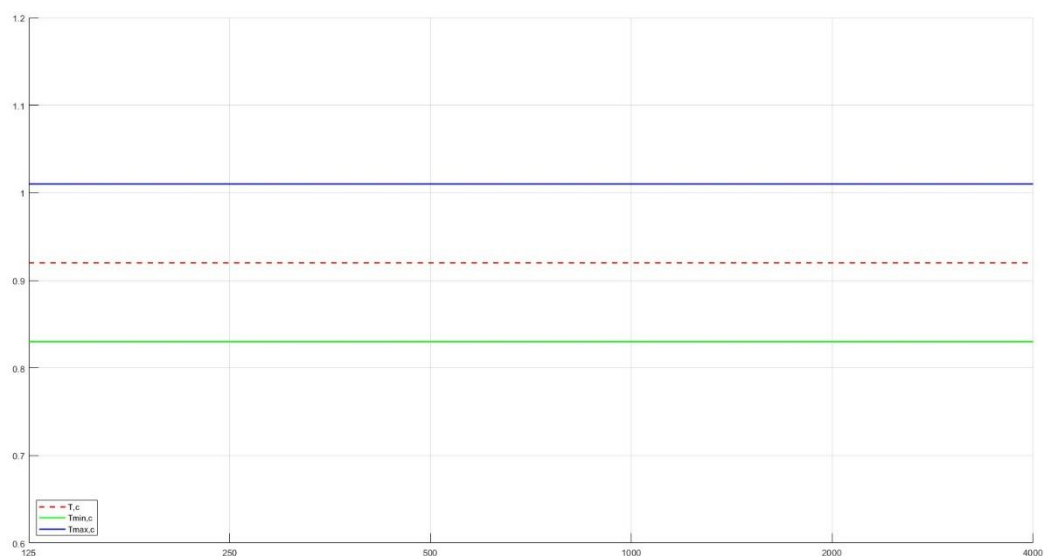


Рисунок 1 - График требуемого времени стандартной реверберации.

Из формулы Эйринга следует, что время стандартной реверберации T равно:

$$T = \frac{0.161 * V}{4 * \varphi * V - S * \ln(1 - \alpha_{\text{ср}})}$$

Из формулы получим средний коэффициент звукопоглощения:

$$\alpha_{\text{ср}} = 1 - e^{\frac{\frac{0.161 * V}{T} - 4 * \varphi * V * 10^{-3}}{-S}}$$

Зная размеры помещения, вычислим его площадь. Так как помещение является четырехугольным, площадь помещения будет равна:

$$S_{\text{помещения}} = 2 * S_{\text{пола}} + 2 * h * l + 2 * h * b = 765.9 \text{ м}^2$$

Отношение объёма студии к её полной площади будет равно:

$$\frac{V}{S} = 1.68$$

Влажность воздуха $\varphi = 60\%$

Найдем общее число единиц звукопоглощения:

$$A = \alpha_{\text{ср}} * S$$

Таблица 1 – Расчёт требуемых коэффициентов звукопоглощения.

f, Гц	$\alpha_{\text{мин}}$	$\alpha_{\text{макс}}$	$\alpha_{\text{ср}}$
125	0,28	0,23	0,26
250	0,28	0,23	0,26
500	0,28	0,23	0,25
1000	0,28	0,23	0,25
2000	0,27	0,22	0,24
4000	0,24	0,20	0,22

Таблица 2 – Требуемое количество единиц звукопоглощения.

$f, \text{Гц}$	$A_{\text{мин}}$	$A_{\text{макс}}$	$A_{\text{ср}}$
125	214,5	176,2	199,1
250	214,5	176,2	199,1
500	214,5	176,2	191,5
1000	214,5	176,2	191,5
2000	206,8	168,5	183,8
4000	183,8	153,2	168,5

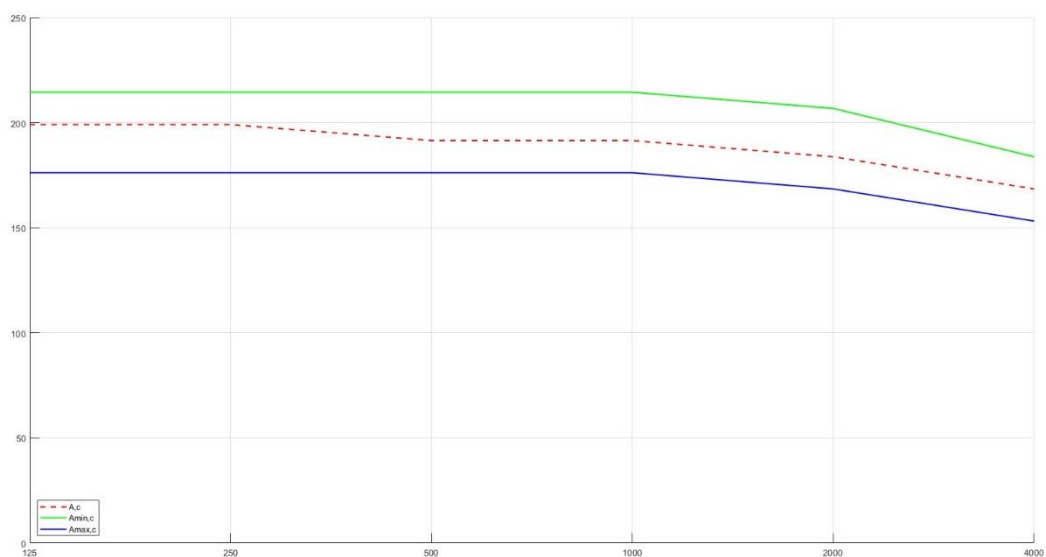


Рисунок 2 - Требуемое количество единиц звукопоглощения.

Расчет звукопоглощения, вносимого основным фондом

Определим число единиц звукопоглощения, вносимых основным фондом.

Заметим, что единицы звукопоглощения инвентаря умножаются на его количество. Расчет ведется исходя из оптимального числа исполнителей, которое равно 32. Остальные абсорбенты, относящиеся к основному фонду для нашей студии, перечислены в табл. 3.

Общее число единиц звукопоглощения основного фонда рассчитывается по формуле:

$$A_0 = a_1S_1 + a_2S_2 + \dots + A_1n_1 + A_2n_2 + \dots$$

Площадь вентиляционных решёток была рассчитана исходя из объёма по формуле:

$$S_{\text{вент}} = \frac{V}{300} = 4.28 \text{ м}^2$$

Таблица 3 – Вносимое абсорбентами звукопоглощение.

Абсорбенты	Кол-во или площ.	125 Гц		250 Гц		500 Гц		1000 Гц		2000 Гц		4000 Гц	
		<i>a</i>	A	<i>a</i>	A	<i>a</i>	A	<i>a</i>	A	<i>a</i>	A	<i>a</i>	A
Исполнители	32 чел.	0,28	8,96	0,4	12,8	0,45	14,4	0,49	15,7	0,47	15,04	0,45	14,4
Инвентарь	64 шт.	0,23	14,72	0,26	16,64	0,26	16,64	0,29	18,56	0,32	20,48	0,36	23,04
Деревянный пол на балках (229)	192 м ²	0,15	28,8	0,11	21,12	0,10	19,2	0,07	13,4 4	0,06	11,52	0,07	13,44
Окно в студийную аппаратную (16)	3 м ²	0,35	1,05	0,25	0,75	0,18	0,54	0,12	0,36	0,07	0,21	0,04	0,12
Вентиляци- онные решетки (438)	4,28 м ²	0,3	1,28	0,4	1,71	0,5	2,14	0,5	2,14	0,5	2,14	0,4	1,71
Дверь (10)	9 м ²	0,1	0,9	0,07	0,63	0,05	0,45	0,04	0,36	0,04	0,36	0,04	0,36
Итого S ₀ = 208,28 м ² :	A ₀	55,71		53,65		53,37		50,56		49,75		53,07	
Следует добавить A-A ₀		120,49...15 8,8		122,55...16 0,9		122,83...16 1,13		125,64...16 3,94		118,75...157,0 5		100,13...130,7 3	

Общая площадь, занимаемая основным фондом звукопоглощения:

208,28 м² без учета площади пола, с учетом площади пола – 16,28 м².

Расчет звукопоглощения, вносимого специальными материалами и конструкциями

На основании данных, полученных в п.2, рассчитаем звукопоглощение, вносимое материалами специального фонда звукопоглощения.

Площадь специальных материалов равняется разности общей площади и площади основного фонда:

$$S_{\text{сф}} = 765.9 - 208.28 = 557.62 \text{ м}^2$$

Первым шагом вычислим необходимое количество единиц звукопоглощения специального фонда. Для этого из общего числа единиц звукопоглощения вычтем число единиц звукопоглощения основного фонда.

$$A_{\text{необходимое}} = A_{\text{оптимальное}} - A_0$$

Таблица 4 – Следует добавить единиц звукопоглощения.

$F, \text{Гц}$	125	250	500	1000	2000	4000
$A_{\text{min}} - A_0$	158,8	160,9	161,13	163,94	157,05	130,73
$A_{\text{доб.ср}}$	143,99	145,45	138,13	140,94	134,05	115,43
$A_{\text{max}} - A_0$	120,49	122,55	122,83	125,64	118,75	100,13

Далее требуется рассчитать требуемый коэффициент звукопоглощения специальных материалов, для чего данные из таблицы 4 необходимо поделить на площадь материалов специального фонда.

Таблица 5 - Требуемый коэффициент звукопоглощения материалов.

$F, \text{Гц}$	125	250	500	1000	2000	4000
a_{min}	0,2848	0,2886	0,2890	0,2940	0,2816	0,2344
a_{avg}	0,2582	0,2610	0,2477	0,2528	0,2404	0,2070
a_{max}	0,2161	0,2200	0,2203	0,2253	0,2130	0,1796

Следующим шагом является подбор материалов, звукопоглощение которых в сумме будет давать требуемое звукопоглощение. Было выбрано два звукопоглощающих материала, дающих в равной пропорции коэффициент поглощения из таблицы 5.

Это плиты «Ацеид» (ГОСТ 4248-52), $h = 8$ мм (№700), и плиты из минеральной ваты, два слоя; $h = 25-30$ мм (№734), дающая необходимое звукопоглощение.

Перемножив собственные значения коэффициента звукопоглощения на занимаемую площадь, получим $A_{с.ф.}$, результаты расчёта занесены в таблицу 6. Так как полученное звукопоглощение находится в допустимых пределах (таблица 4), никаких дополнительных перерасчетов не требуется.

Таблица 6 – Расчет единиц звукопоглощения специального фонда.

S_m, m^2	F (Гц)	125		250		500		1000		2000		4000	
	$A_{доб}$	101.41		103.78		104.17		107.14		107.99		104.78	
	№ погл.	а	А	а	А	а	А	а	А	а	А	а	А
120	734	0.08	9.6	0.4	48	0.64	76.8	0.89	106.8	0.95	114	0.81	97.2
437.62	700	0.32	140.04	0.21	91.9	0.16	70.02	0.09	39.39	0.06	26.26	0.03	13.13
Итог $A_{с.ф.}$		149.64		139.9		146.82		146.19		140.26		110.33	
$A_{о. ф.}$		55.71		53.65		53.37		50.56		49.75		53.07	
$A_{с.ф.} + A_{о.ф.}$		205.35		193.55		200.19		196.75		190.01		163.4	

Расчет времени стандартной реверберации

По аналогии с пунктом 1 данной курсовой работы рассчитаем время стандартной реверберации в помещении студии с учетом основного и специального фонда, где A – общее число единиц звукопоглощения, вносимых основным, специальным и дополнительным фондом абсорбентов; S – суммарная площадь всех поверхностей помещения. Результаты расчётов предоставлены в таблице 7.

Таблица 7 - Расчет времени стандартной реверберации с учетом материалов.

F, Гц	125	250	500	1000	2000	4000
A	205,35	193,55	200,19	196,75	190,01	163,4
$-S \cdot \lg(1-A/S)$	103,82	96,89	100,78	98,76	94,84	79,82
$0.4 \cdot \delta \cdot V$	0	0	0,5140	1,5420	5,14	15,42
T, с	0,87	0,93	0,89	0,90	0,90	0,96

На графике на рис. 4 показана частотная зависимость полученного в результате теоретического расчёта времени стандартной реверберации. Видно, что полученные значения не выходят за рамки минимального и максимального показателя времени реверберации.

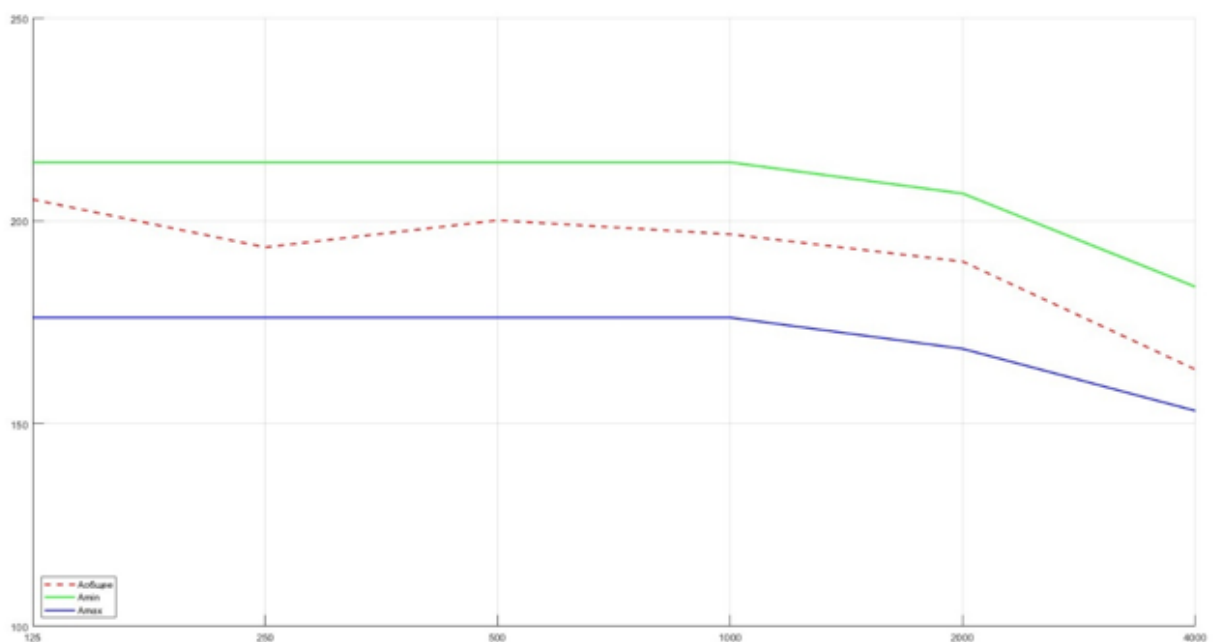


Рис. 3. Звукопоглощение помещения с основным и специальным фондом.

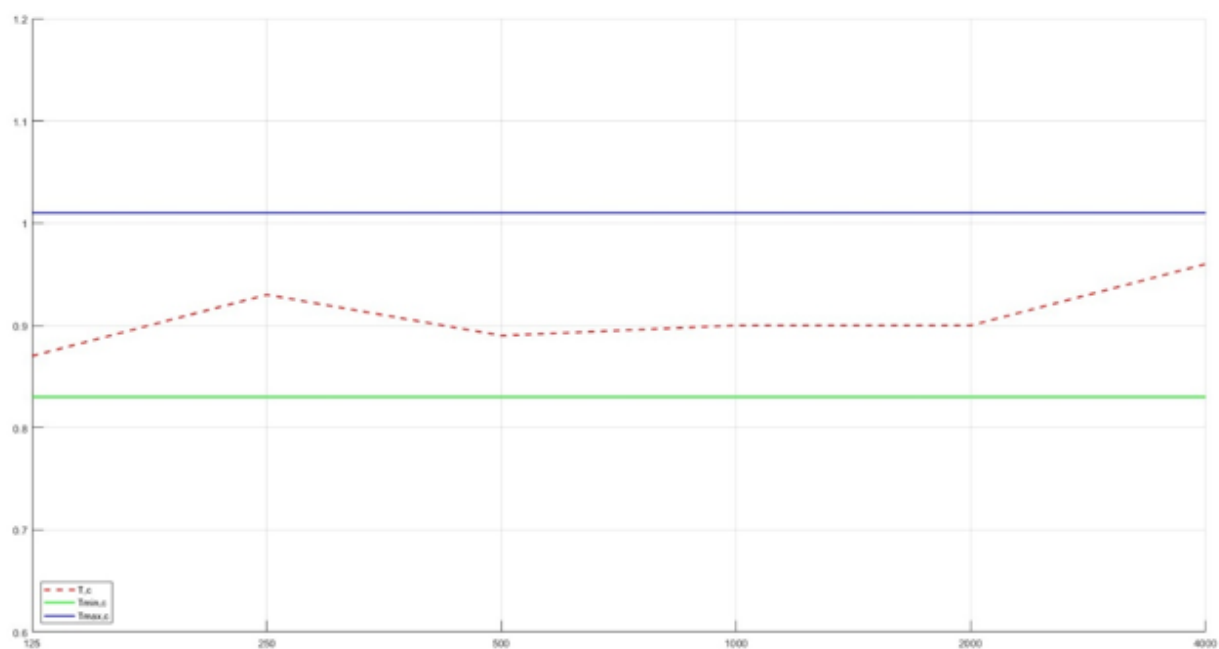


Рис. 4. Результат расчета времени стандартной реверберации.

Расчет звукоизоляции студийного помещения.

План расположения смежных помещений и основные размеры в метрах показаны на рис. 6. Высота студии 6.7 м, а общее число единиц звукопоглощения $aS = 191.54$, при этом $S = 193.7 \text{ м}^2$.

Допустимый уровень воздушных шумов в студии $N_0 = 25 \text{ дБ}$.

Все предварительные данные – вид преграды, с каким помещением она граничит, её линейные размеры и площадь занесены в табл.8.

На уровень шума влияет шум работы от вентиляционных устройств, который в нашем случае примем равным $N_v = 20 \text{ дБ}$.

Рассчитаем требуемое шумоподавление:

$$N = (e^{0.23N_0} - e^{0.23N_v}) * A_{cp} = 41125$$

Где $A_{cp} = 191,54$ – среднее число единиц звукопоглощения в помещении.

После этого необходимо рассчитать требуемые коэффициент звукопоглощения для каждой преграды по формуле:

$$\sigma_k = N_k - 10 \lg(N - n) + 10 \lg(S_k)$$

Где N_k – уровень силы звука в смежном помещении; S_k – площадь преграды.

Далее для каждой преграды подбирается соответствующая конструкция с требуемым σ_k , после чего по формуле $n = \sum n S_k * \exp[0,23 * (N_k - \sigma_k)]$ рассчитывается количество шума, проходящего через преграду из соседних помещений.

Детальный расчет для каждой преграды предоставлен в таблице 8.

Были приведены все рассуждения, позволяющие наиболее рационально выбрать конструкции всех преград. Фактически полученная сумма всех слагаемых равна 16666, т. е. несколько меньше ранее вычисленной $N_k = 41125$.

Значительно уменьшать уровень помех по сравнению с заданным нерационально, так как это вызовет повышение стоимости строительства.

№	Вид преграды	С чем граничит?	Линейные размеры, м	S_k , м ²	N_k , дБ	Треб. σ_k , дБ	Конструкция	σ_k , дБ	$0,23 \cdot (N_k - \sigma_k)$	$\exp[0,23 \cdot (N_k - \sigma_k)]$	$S_k \cdot \exp[0,23 \cdot (N_k - \sigma_k)]$
1	Стена	Студийная аппаратная	(10,9x6,7)-7,3	65,73	85	66,07	Кирпичная оштукатуренная стена, толщина 920	64,5	4,715	111,61	7336,05
2	Стена	Служебное помещение	10,9x6,7	73,03	60	41,52	Кирпичная оштукатуренная стена, толщина 140	47	2,99	19,89	1452,25
3	Стена	Служебное помещение	17,6x6,7	117,92	60	43,61	Кирпичная оштукатуренная стена, толщина 140	47	2,99	19,89	2344,92
4	Стена	Тамбур	(17,6x6,7)-9	108,92	50	33,26	Кирпичная оштукатуренная стена, толщина 140	47	0,69	1,99	217,16
5	Смотровое окно	Студийная аппаратная	3x1	3	85	52,66	Трёхстекольное смотровое окно	55	6,9	992,27	2976,82
6	Дверь	Тамбур	(1,5x2)x3	9	50	22,43	Дверь с прокладкой	29	4,83	125,21	1126,90
7	Пол	Подвал	17,6x10,9	192	60	45,72	Междуэтажное перекрытие, типовое, с воздушным промежутком	55	1,15	3,16	606,37
8	Потолок	Служебное помещение	17,6x10,9	192	60	45,72	Междуэтажное перекрытие, типовое, с воздушным промежутком	55	1,15	3,16	606,37
Итого				761,6	Итого $N = 16666$, а $N_0 = 21,51$ дБ						

Таблица 8 – Расчет звукоизоляции от воздушных шумов для студии звукозаписи.

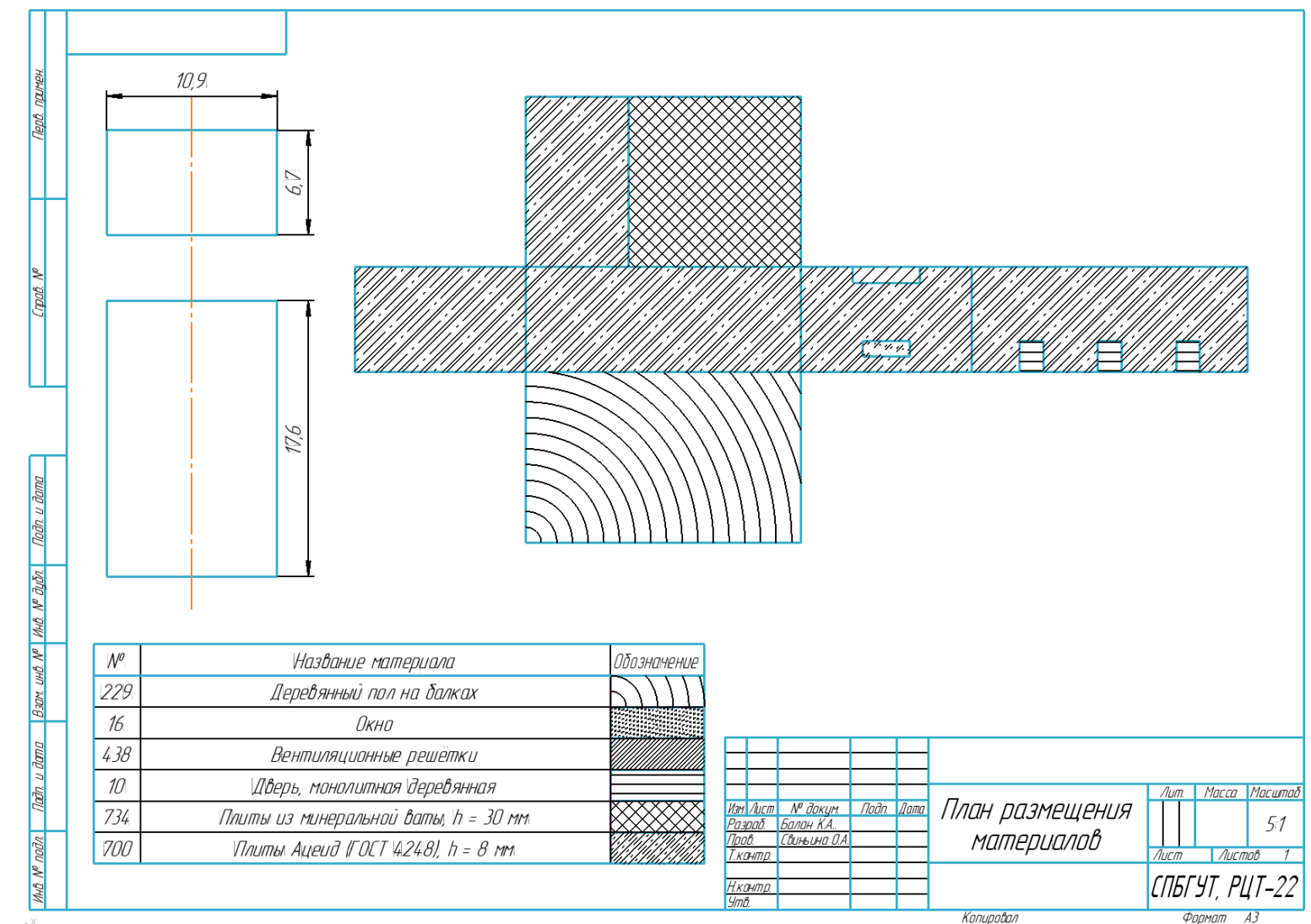


Рис. 5. План размещения материалов.

Перв. примен.		1001 4400044 НОУ	
Справ. №			
Подп. и дата			
Взам. инв. №		Инв. № дудл.	
Подп. и дата			
Инв. № подл.			

№ помещения	Название помещения
1	Студия звукозаписи
2	Студийная аппаратная
3	Тамбур
4	Службное помещение

БОНЧ.00044 1.001				
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Разраб.	Балан К.А.			
Проб.	Свинына О.А.			
Т.контр.				
Н.контр.				
Утв.				

Студия звукозаписи. План помещения		Лист	Масса	Масштаб
				4:1
		Лист	Листов	1
		СПБГУТ, РЦТ-22		

Копии

Формат А4

Рис. 6. План помещения.

Построение и анализ трехмерной модели студийного помещения

В соответствии с методикой, изложенной в методическом указании [1], с помощью программы Ulysses было выполнено построение трехмерной модели помещения, рассмотренного в данном примере, размещение на внутренних поверхностях помещения звукопоглощающих материалов и конструкций, а также произведен анализ стандартного времени реверберации в полученном помещении.

Материалы размещались в соответствии с планом размещения материалов основного и специального фондов звукопоглощения (приложение 2). Аксонометрическая проекция смоделированного помещения представлена на рисунке 7. На рисунке 8 изображены проекции модели в плоскости XY (а), XZ (б) и YZ (в).

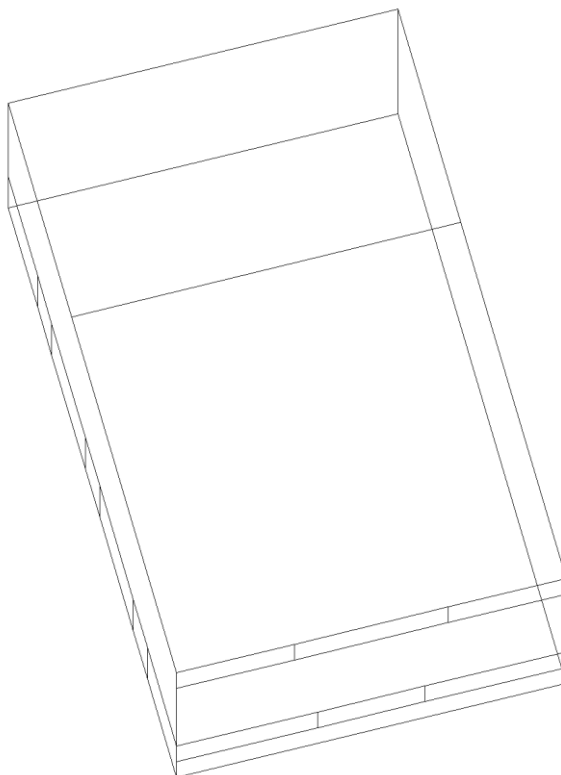
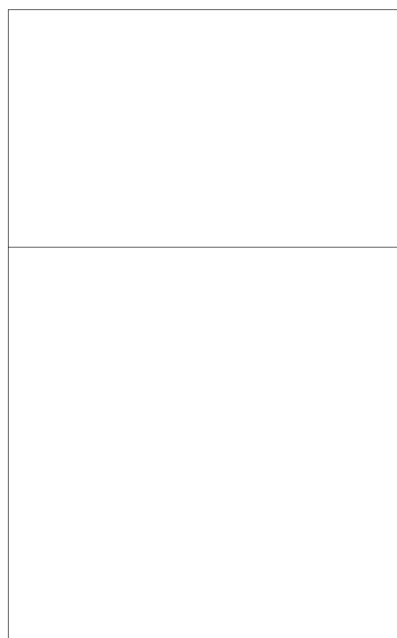
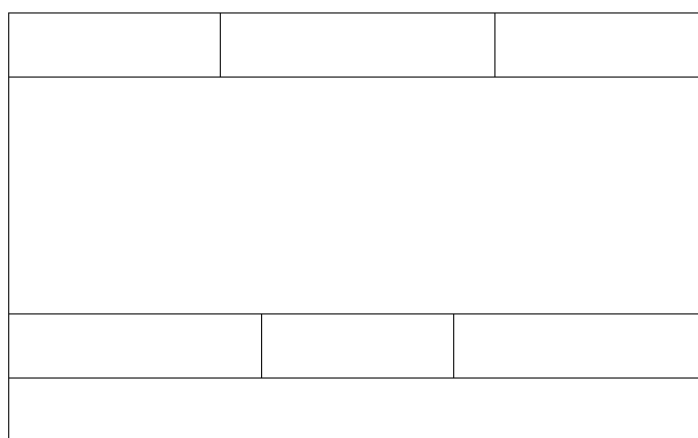


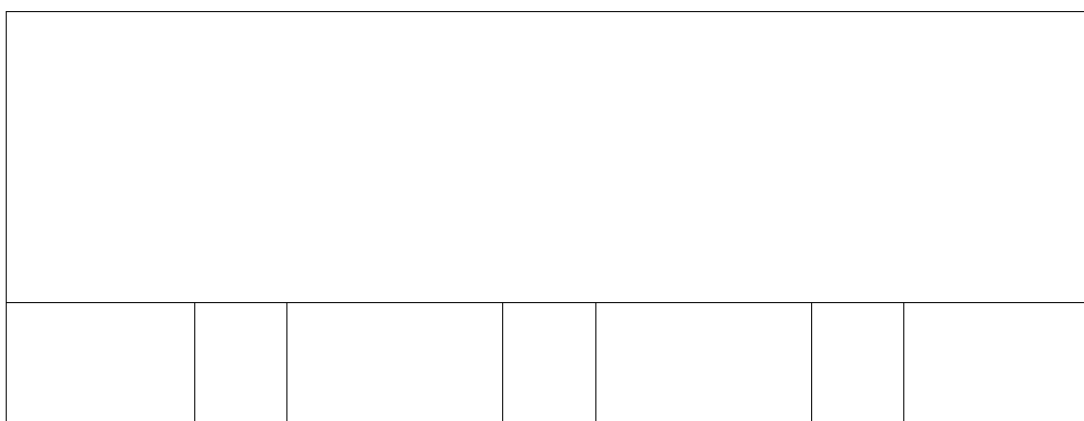
Рис. 7. Модель студии в программе Ulysses.



(a)



(б)



(в)

Рис. 8. Различные виды (проекции) модели студии в программе Ulysses.

После построения модели студийного помещения и присвоения поверхностям соответствующих звукопоглощающих материалов с помощью инструмента Assign Material, их параметры можно проверить через инструмент Facelist (рис. 9-14).

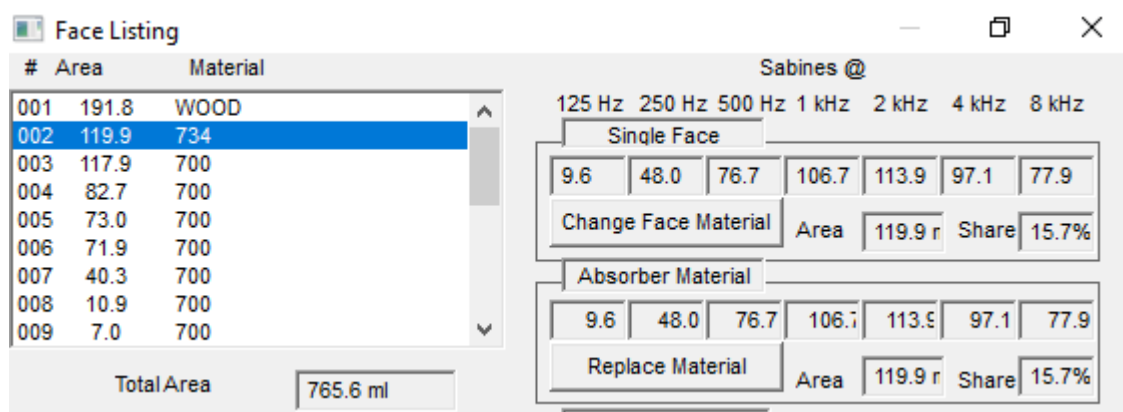


Рис. 9. Материал 734.

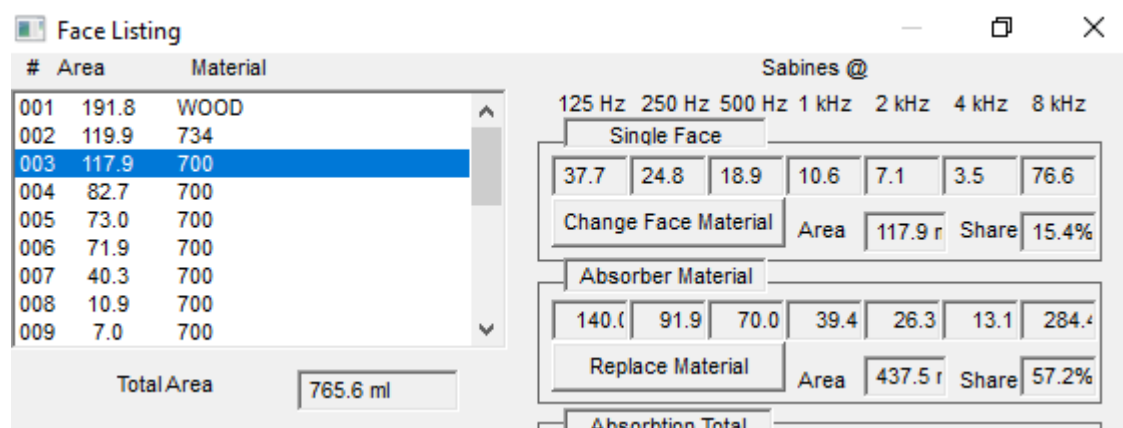


Рис. 10. Материал 700.

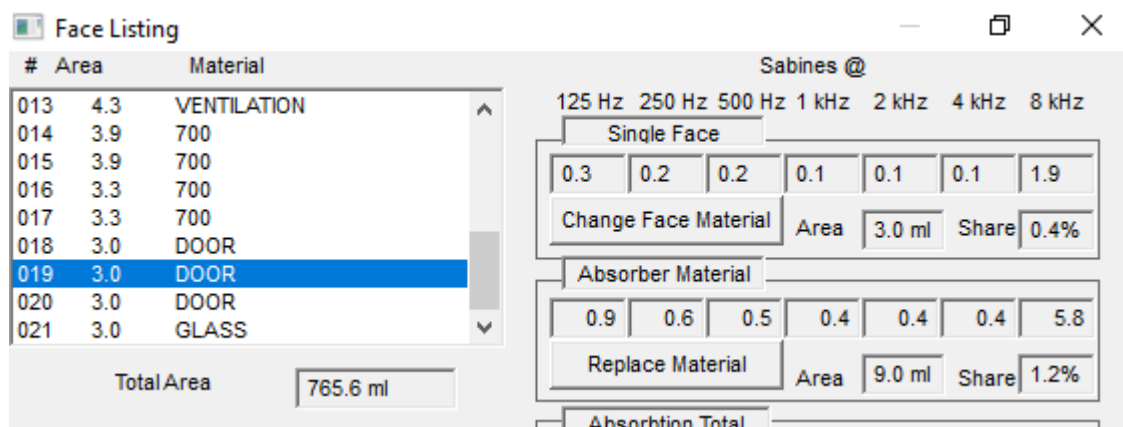


Рис. 11. Дверь.

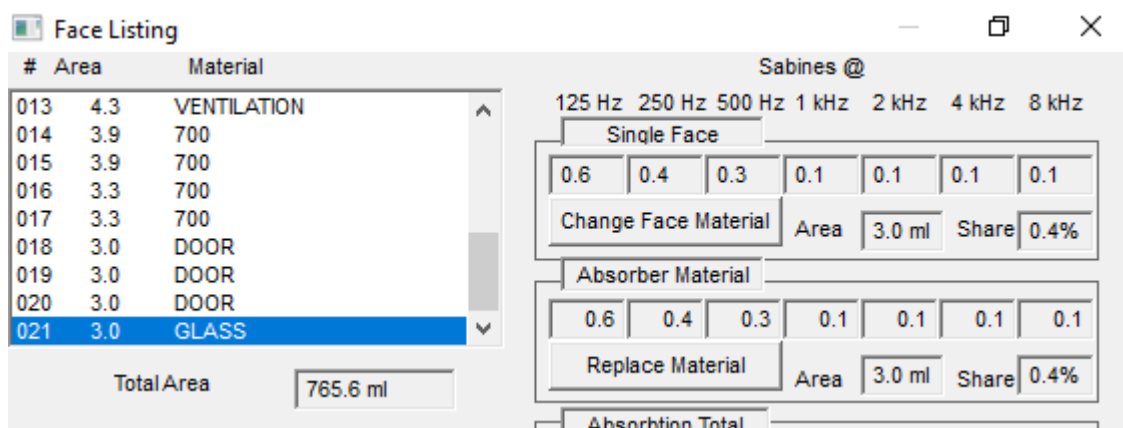


Рис. 12. Окно в студию аппаратную.

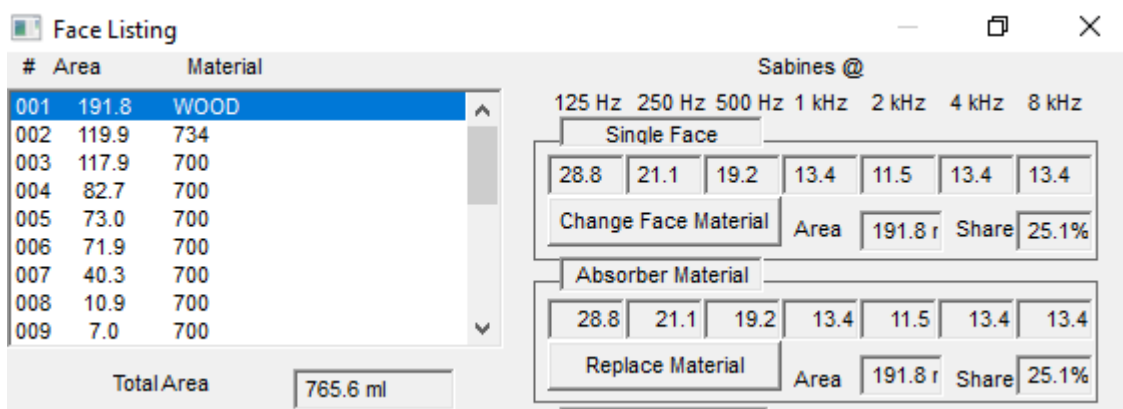


Рис. 13. Деревянный пол на балках.

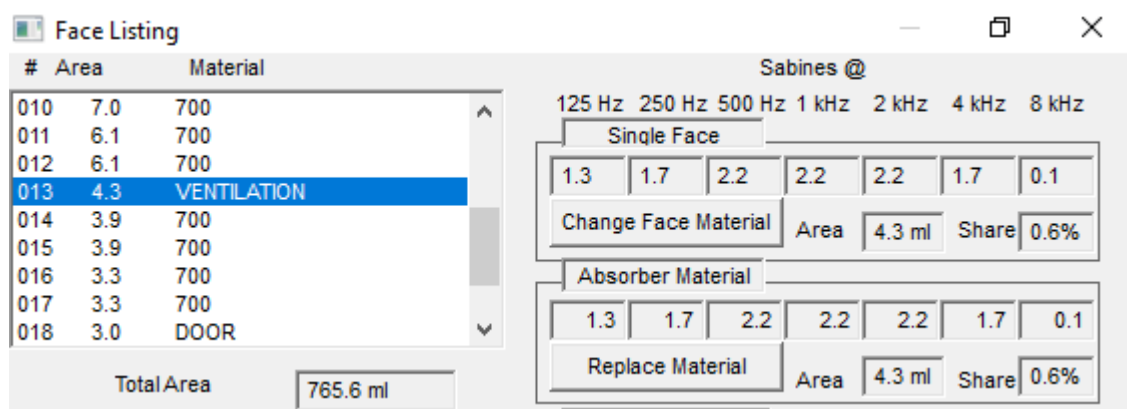


Рис. 14. Вентиляция.

Произведем расчёт времени стандартной реверберации для смоделированной студии по формуле Эйринга (RT60 Eyring). Результаты расчёта (рис. 15) отображены в виде графика для двух случаев: без учета звукопоглощения воздушной среды (зелёный график) и с учетом звукопоглощения воздушной среды при относительной влажности воздуха 60% (розовый график).

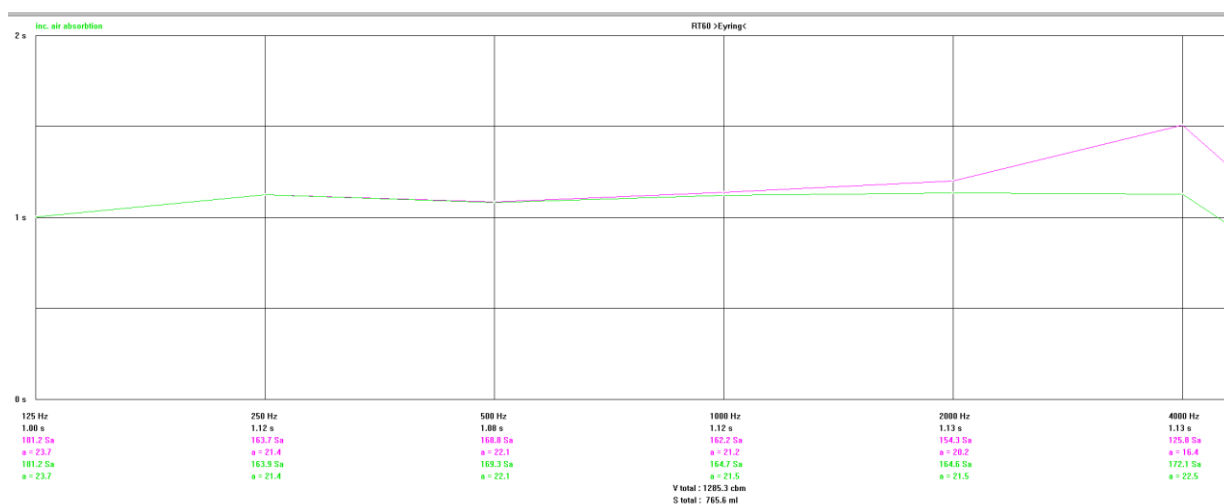


Рис. 14. Результаты расчета времени стандартной реверберации в полностью пустом помещении.

Полученный путём моделирования в программе Ulesses график сильно отличается от теоретического и не попадает в допуски по причине того, что при моделировании не учитывается звукопоглощение исполнителей и их инвентаря.

Наглядно погрешность расчета и измерения времени стандартной реверберации предоставлена на рис. 15.

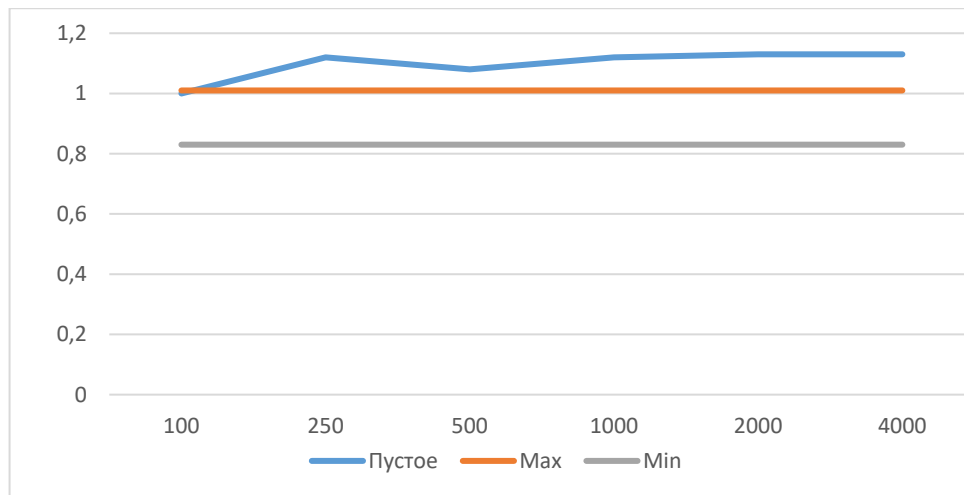


Рис. 15. Измерение времени стандартной реверберации относительно задания.

Для расчета времени стандартной реверберации с учетом исполнителей и их инвентаря на полу студии был выделен участок площадью $\sim 25 \text{ м}^2$, на котором размещается материал стульев для исполнителей и $\sim 25 \text{ м}^2$, для размещения материала стульев для слушателей (рис 16-21), примерно соответствующий звукопоглощению исполнителей и инвентаря.

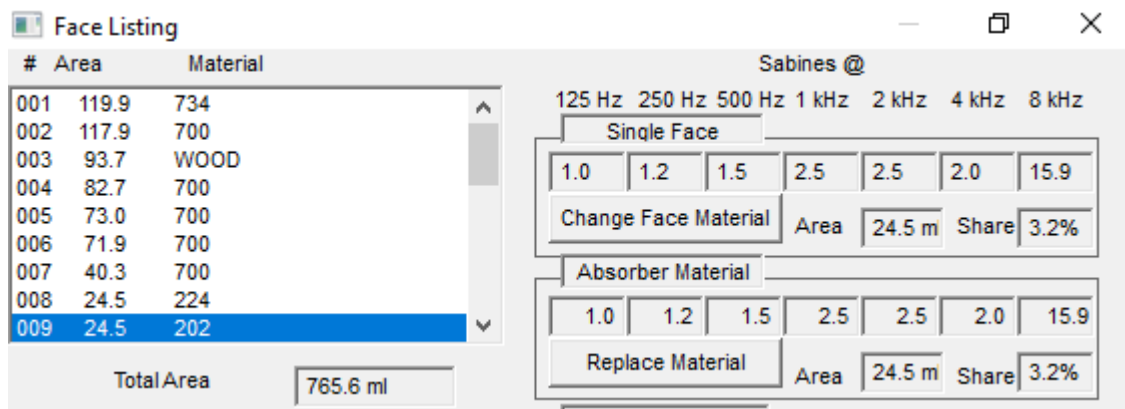


Рис. 16. Стулья исполнителей (пустые).

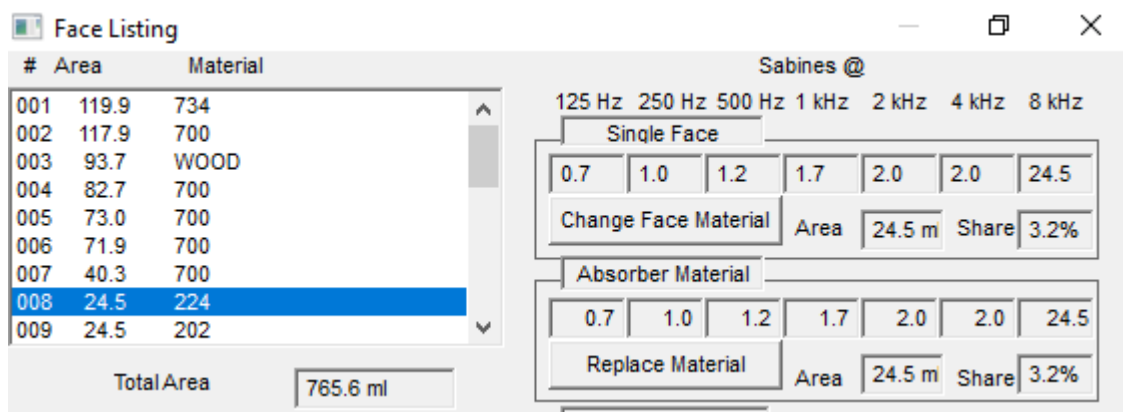


Рис. 17. Стулья слушателей (пустые).

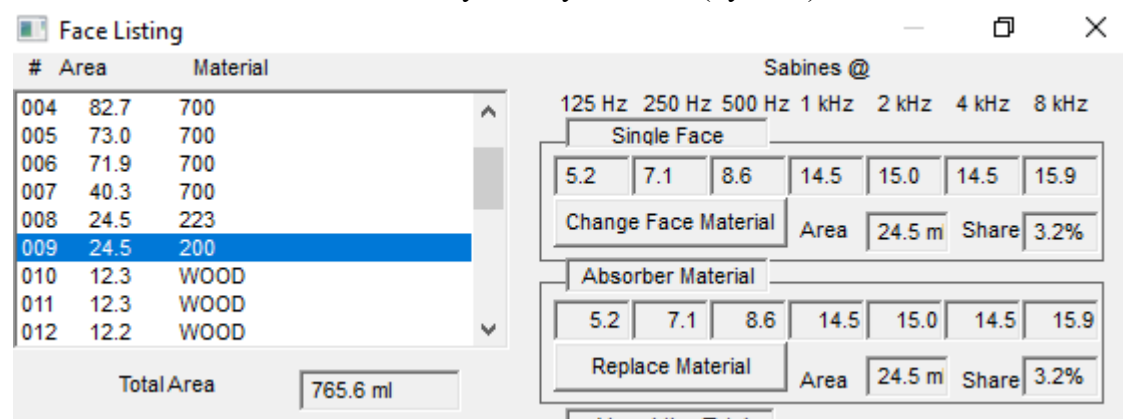


Рис. 18. Стулья исполнителей (заполненность 2/3).

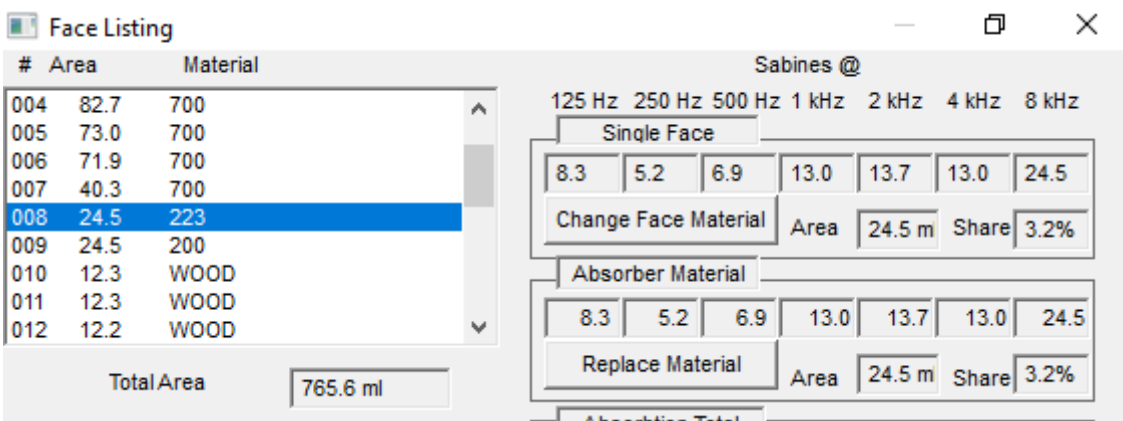


Рис. 19. Стулья слушателей (заполненность 2/3).

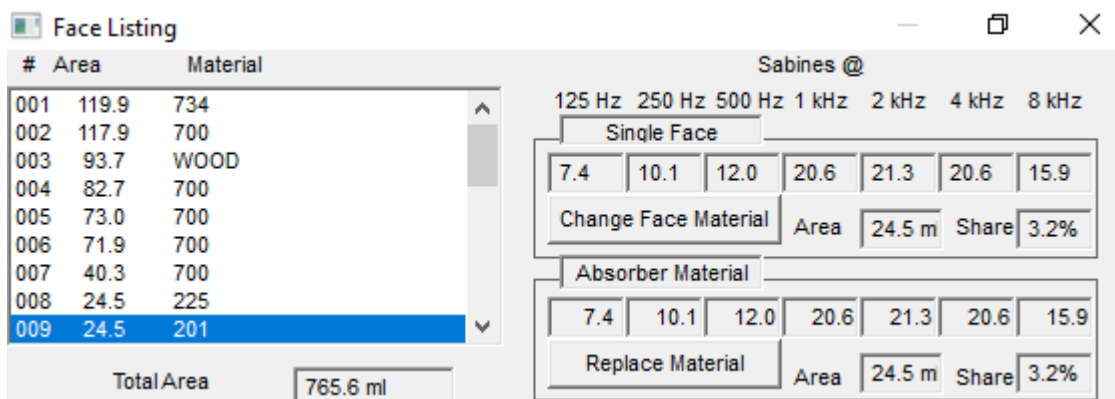


Рис. 20. Стулья исполнителей (заполненные полностью).

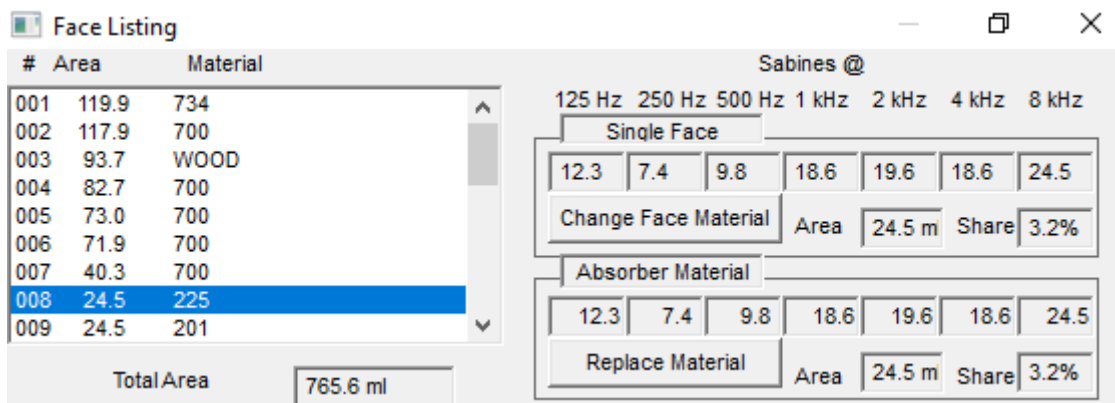


Рис. 21. Стулья слушателей (заполненные полностью).

Расчет будет проводится для пустой студии (со стульями), заполненной людьми на $\frac{2}{3}$, и полностью заполненной. Результаты расчета сведены в таблицу 9. Результаты расчета полностью заполненного помещения дополнительно показаны на рис. 22.

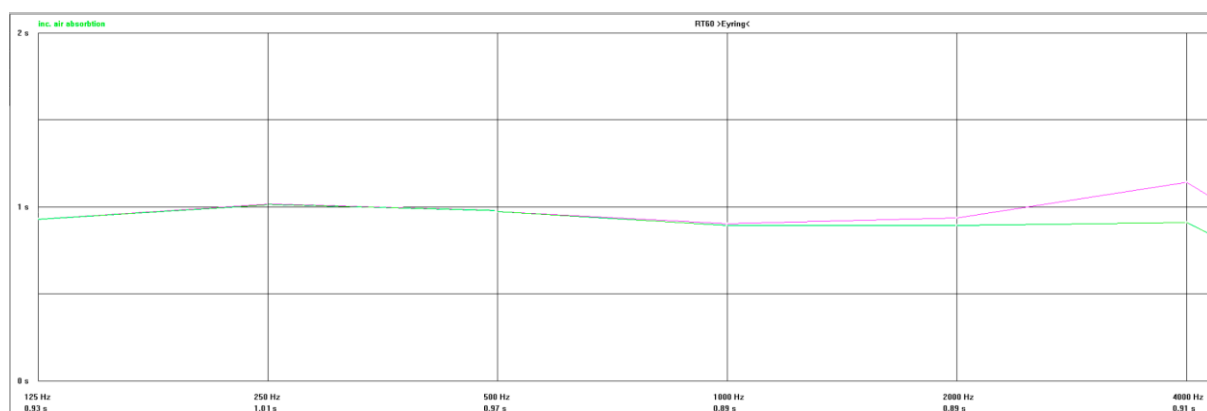


Рис. 22. Результаты расчета полностью заполненного помещения.

Таблица 9. Результаты расчета времени стандартной реверберации.

Параметр	Т, с					
	125 Гц	250 Гц	500 Гц	1000 Гц	2000 Гц	4000 Гц
Теоретический расчёт	0,87	0,93	0,89	0,9	0,9	0,96
Результат моделирования пустого помещения	1,04	1,15	1,1	1,11	1,12	1,12
Результат моделирования, с размещением пустых мест исполнителей и слушателей	1	1,12	1,08	1,12	1,13	1,13
Результат моделирования, с размещением, заполненных на 2/3, мест исполнителей и слушателей	0,96	1,07	1,01	0,96	0,96	0,97
Результат моделирования, с размещением заполненных мест исполнителей и слушателей	0,93	1,01	0,97	0,89	0,89	0,91

Расчеты зависимости времени стандартной реверберации от заполненности помещения исполнителями показаны на графике на рис. 23.

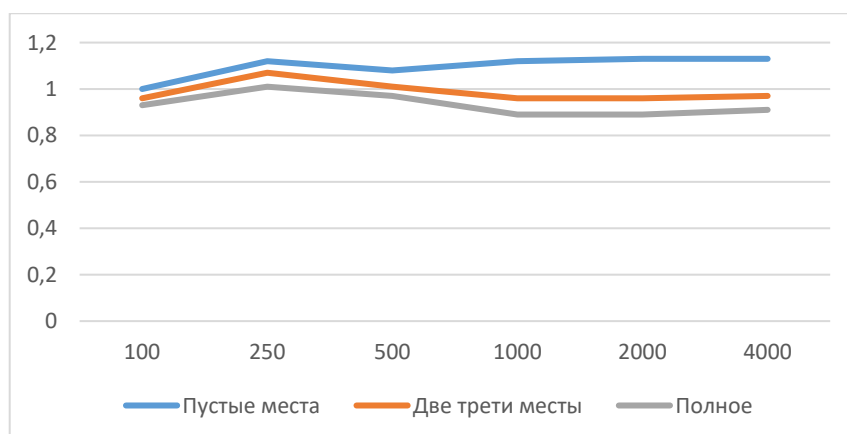


Рис. 23. Расчет зависимости времени стандартной реверберации от заполненности помещения исполнителями

Заключение

В ходе выполнения курсового проекта было определено необходимое количество звукопоглощающих элементов, исходя из заданной частотной зависимости времени стандартной реверберации. Также был осуществлён подбор подходящих звукопоглощающих материалов и выполнен расчёт звукоизоляции помещения студии звукозаписи.

Выбранные материалы обеспечивают соответствие времени реверберации заданным параметрам, а также проведённый расчёт звукоизоляции показал высокую эффективность защиты от воздушного шума.

С помощью программного комплекса Ulysses было выполнено моделирование акустических характеристик помещения. Рассчитанное время стандартной реверберации практически совпало с теоретическими значениями. Кроме того, были построены графики изменения времени реверберации в зависимости от заполненности пространства, что позволило оценить поведение акустической системы на разных частотах при изменении условий.

Результаты моделирования подтвердили корректность выбора как базовых, так и специализированных звукопоглощающих материалов — требуемый уровень реверберации достигается при полной загрузке студии.

В результате выполнения курсового проекта была получена ценная информация о реверберационных характеристиках помещения, которая может быть использована при проектировании студийных пространств, а также закрепить практические навыки работы с профессиональным программным обеспечением — Ulysses и Octave.

Список используемой литературы

1. Расчет аппаратно-студийного комплекса телерадиовещания и аудиотехники. Часть 1. Расчет акустического оформления студий. Ковалгин Ю.А., Свиньина О.А., Фадеев А.А., 2013 г.
2. Электроакустика и звуковое вещание: Учебное пособие для вузов / И.А. Алдошина, Э.И. Вологдин, А.П. Ефимов, и др.; Под ред. Ю.А. Ковалгина. – М.: Горячая линия – Телеком, Радио и связь, 2007. – 872 с.;
3. Акустика: Учебник для вузов / Ш.Я. Вахитов, Ю.А. Ковалгин, А.А. Фадеев, Ю.П. Щевьев; Под ред. профессора Ю.А. Ковалгина. — М.: Горячая линия Телеком, 2009. — 660 с.: ил.