

УДК 534.84

АКУСТИКА СОБОРОВ МОСКОВСКОГО КРЕМЛЯ

© 1998 г. М. Ю. Ланэ, А. Н. Чесноков*, Х. А. Щиржецкий*

Всероссийский научно-исследовательский институт телевидения и радиовещания
123859 Москва, 3-я Хорошевская ул., 12

* Научно-исследовательский институт строительной физики
127238 Москва, Локомотивный пр., 21

Поступила в редакцию 15.01.96 г.

Выполнено акустическое обследование Успенского, Архангельского и Благовещенского соборов Московского Кремля. Получены данные о времени реверберации, энергетических критериях акустического качества, структурах импульсного отклика и разборчивости речи во всех трех памятниках. Предложены рекомендации по оптимальности реверберации православных храмов в зависимости от их объема.

Соборная площадь, архитектурный облик которой сложился к XVI столетию и в целом сохранился до настоящего времени, является историческим центром Московского Кремля. Расположенные на площади Успенский, Архангельский и Благовещенский соборы (соответственно УС, АС и БС) вместе с Грановитой палатой и колокольней Ивана Великого создают неповторимый архитектурный ансамбль, который в течение многих веков является символом не только Москвы, но и всей России. Все три собора на площади были построены на месте более древних, не сохранившихся храмов. Изучение акустики соборов представляется целесообразным по двум причинам. Во-первых, это позволяет получить объективные данные об условиях слышимости в этих памятниках, акустическое обследование которых, по нашим сведениям, никогда ранее не проводилось. Вторая причина связана с тем, что соборы Московского Кремля в течение ряда веков служили образцом для строительства храмов по всей России, поэтому данные об их акустике весьма важны для изучения акустики русских православных церквей в целом.

Все измерения проводились в пустых соборах. Оценка разборчивости речи производилась с помощью быстрого метода определения индекса речи (RASTI) согласно стандарту Международной электротехнической комиссии (МЭК) IEC 268-16. При измерениях использовался комплект аппаратуры типа 3361 фирмы Брюль и Кьер. Остальная программа измерений включала определение времени реверберации T_{60} , индексов четкости D_{50} и прозрачности C_{80} (согласно стандарту Международной организации по стандартизации ISO/DIS 3382). Кроме того были получены и проанализированы структуры звуковых отражений соборов в течение первых 250 мс после прихода прямого звука. Эти параметры оп-

ределялись при использовании в качестве тестового сигнала выстрелов из стартового пистолета. Для каждой комбинации точки размещения источника звука и точки размещения приемника (ненаправленного микрофона) сигналы импульсного отклика записывались на профессиональный магнитофон. Вся последующая обработка производилась позднее в лабораторных условиях. При этом записанные в соборах сигналы импульсных откликов вводились в процессорное устройство, с помощью которого вычислялись T_{60} , D_{50} , C_{80} , а также структуры звуковых отражений в форме кривых энергия–время (energy time curves–ETC).

Строительство УС проводилось в 1475–1479 гг. под руководством Аристотеля Фиораванти. С тех пор УС являлся главным храмом Москвы и служил для проведения важнейших государственных церемоний России [1, 2]. План УС показан на рис. 1а. Объем храма 11500 м³. Внутренние поверхности стен и перекрытий покрыты фресковой живописью, пол вымощен установленными в XIX в. чугунными плитами. С учетом симметрии собора относительно продольной оси измерения проводились в одной его половине. Было выбрано два положения источника звука (S_1 , S_2) и 12 точек размещения микрофона, положение которых отмечено на рис. 1а. Измеренные значения T_{60} пустого собора представлены на рис. 2 (кривая 1). Для оценки значений T_{60} при заполнении помещения публикой использовался следующий подход. Максимальная площадь пола, на которой могут разместиться посетители собора, составляет 400 м². Были вычислены ожидаемые значения T_{60} при нахождении в соборе 800 человек (плотность размещения 2 чел./м²) и 1600 человек (4 чел./м²). Они отмечены соответственно кривыми 2 и 3 на рис. 2. Таким образом, кривая 2 соответствует

Таблица 1. Значения RASTI в УС

Положение микрофона	RASTI	Положение микрофона	RASTI
Источник в S1, нет экранировки прямого звука		Источник в S2, нет экранировки прямого звука	
1	0.59	1	0.34
2	0.43	5	0.56
3	0.37	6	0.45
4	0.32	7	0.39
5	0.36	8	0.36
8	0.31	9	0.34
9	0.30	10	0.35
10	0.38	12	0.37
12	0.35	—	—
В среднем	0.37	В среднем	0.39
Источник в S1, прямой звук экранируется		Источник в S2, прямой звук экранируется	
6	0.29	2	0.28
7	0.25	3	0.31
11	0.28	4	0.26
—	—	11	0.31
В среднем	0.27	В среднем	0.29

Таблица 2. Значения C_{80} и D_{50} в УС

Положение микрофона	C_{80} , дБ	D_{50} , дБ	Положение микрофона	C_{80} , дБ	D_{50} , дБ
Источник в S1, нет экранировки прямого звука			Источник в S2, нет экранировки прямого звука		
1	-0.4	-3.4	1	-3.6	-5.6
2	-1.8	-5.1	5	4.4	-1.7
3	-1.8	-4.8	7	-2.3	-5.2
4	-3.0	-5.2	9	-1.9	-4.6
5	-0.8	-4.0	—	—	—
9	-4.6	-6.7	—	—	—
В среднем	-2.1	-4.8	В среднем	0.85	-4.3
Источник в S1, прямой звук экранируется			Источник в S2, прямой звук экранируется		
7	-7.4	-9.4	2	-6.2	-8.5
—	—	—	3	-6.2	-8.6
—	—	—	4	-5.3	-7.4
—	—	—	В среднем	-5.9	-8.2

случаю полного заполнения храма, что достаточно типично для знаменитого кафедрального собора, а кривая 3 – случаю максимально возможного заполнения. При проведении этих расчетов

использовались данные о коэффициентах звукопоглощения стоящих людей, полученные в реверберационной камере Научно-исследовательского института строительной физики (НИИСФ). Изме-

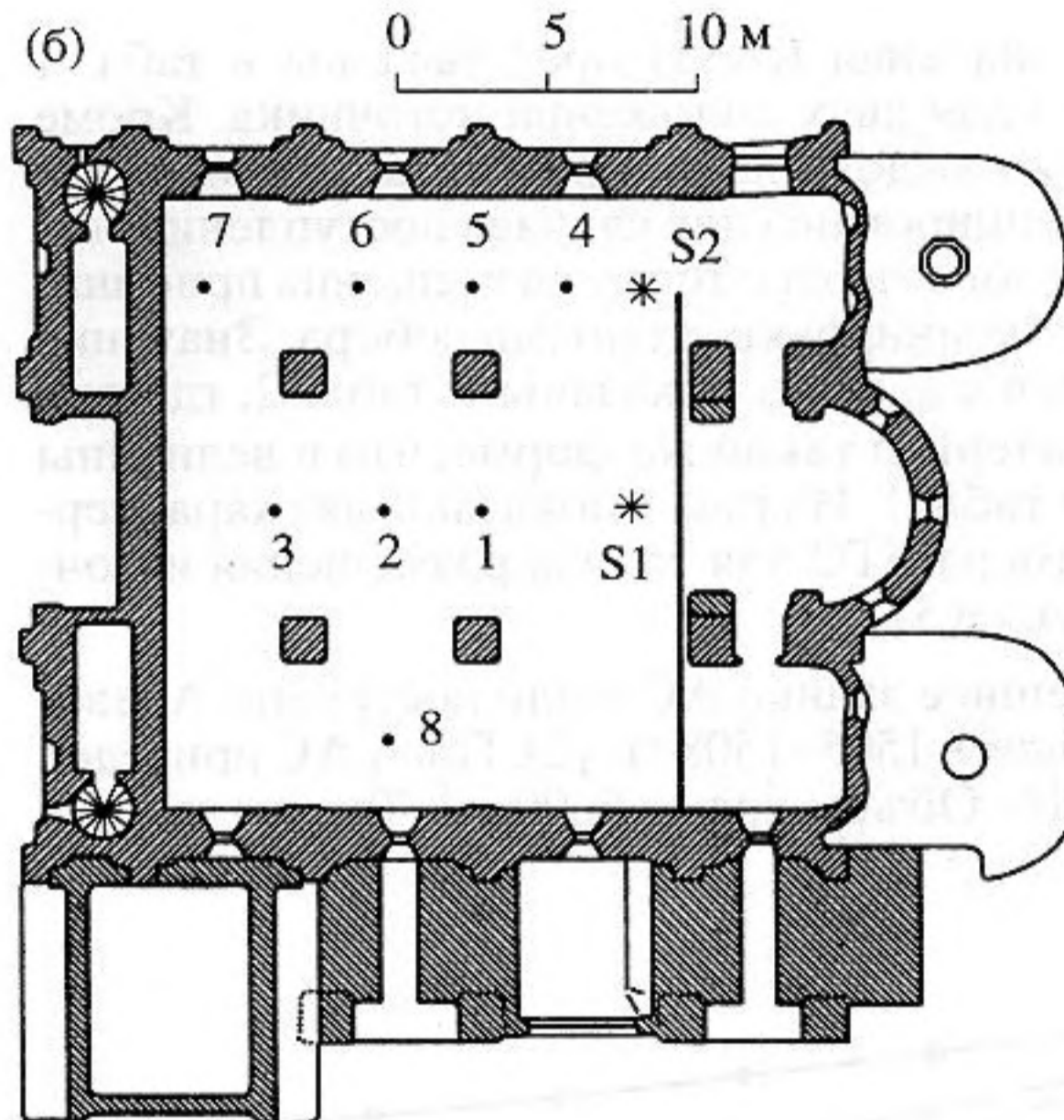
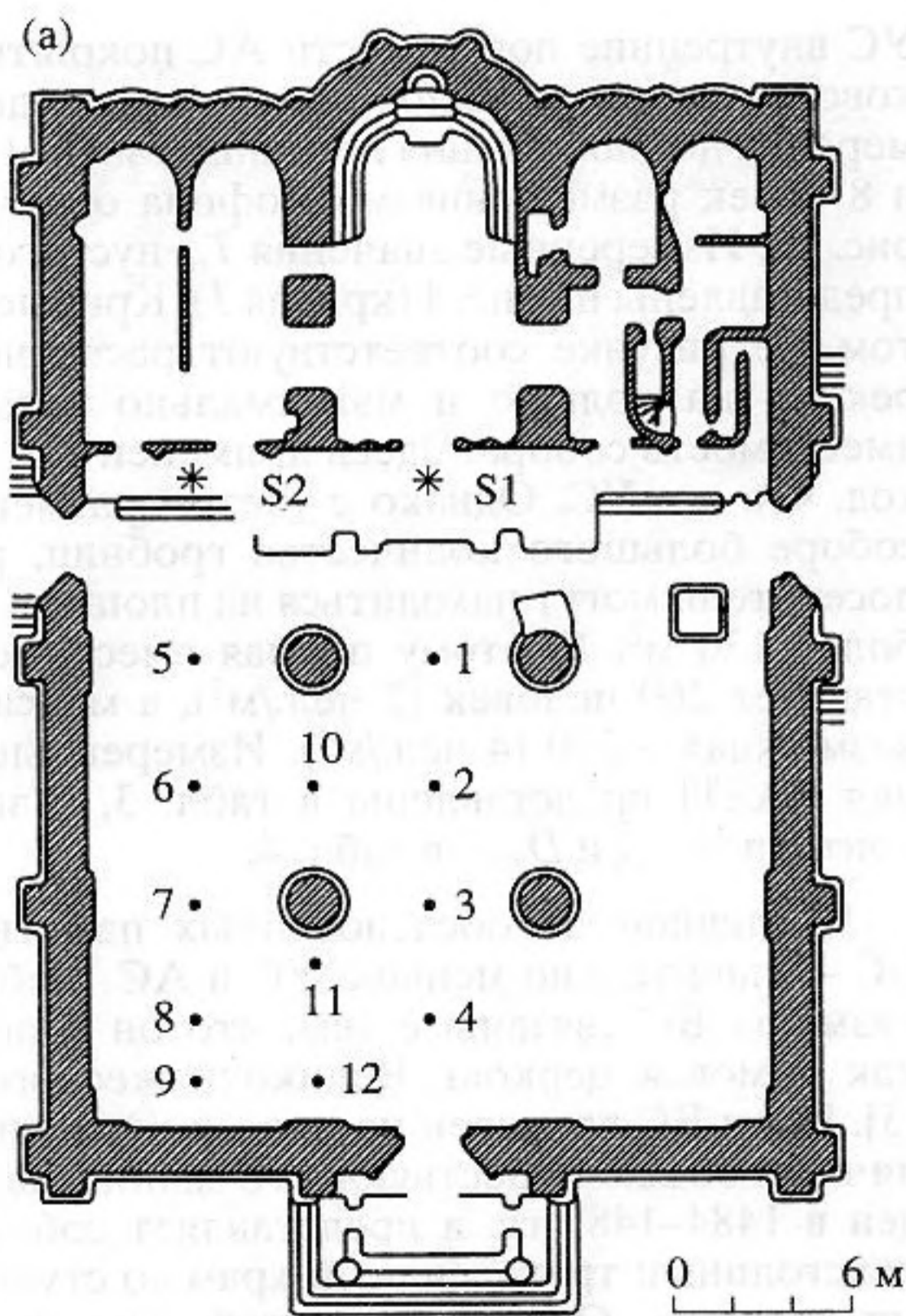


Рис. 1. Планы соборов: а – УС, б – АС, в – БС. S1 и S2 – точки расположения источников звука; 1, 2 – точки расположения приемников звука.

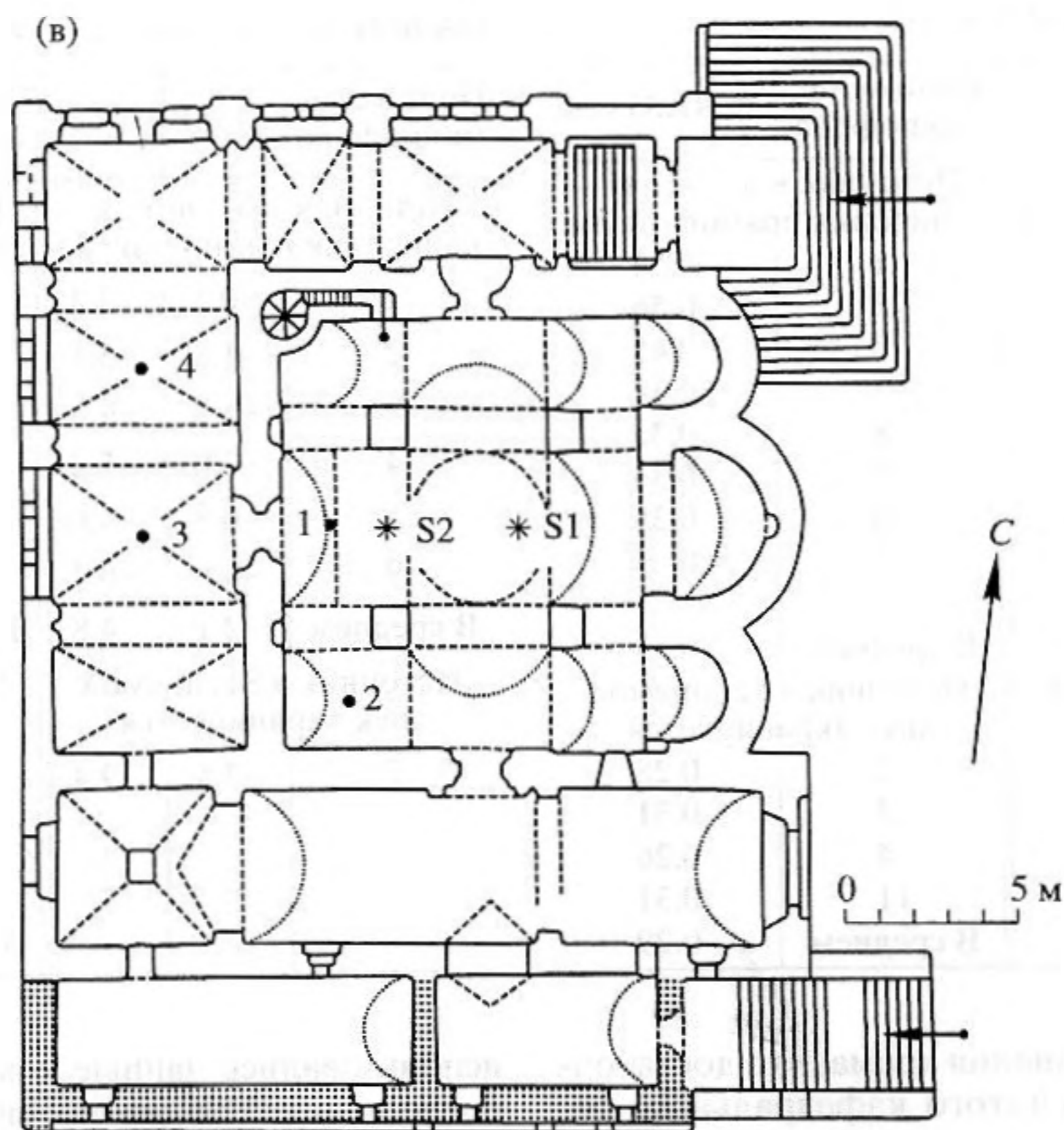


Рис. 1. Окончание.

ренные значения RASTI представлены в табл. 1 отдельно для двух положений источника. Кроме того, для каждого из них результаты измерений дифференцированы для случаев поступления сигнала прямого звука в точку размещения приемника и его экранировки столбами собора. Значения критериев C_{80} и D_{50} показаны в табл. 2, где они представлены в такой же форме, что и величины RASTI в табл. 1. На рис. 3 показаны два характерные примера ETC для случая размещения источника звука в S2.

Нынешнее здание АС было построено Алевизом Новым в 1505–1508 гг. [2]. План АС приведен на рис. 1б. Объем храма 6600 м³. Так же как и в

УС внутренние поверхности АС покрыты фресковой живописью. Выбранные для проведения измерений два положения источника звука (S-1, S-2) и 8 точек размещения микрофона отмечены на рис. 1б. Измеренные значения T_{60} пустого собора представлены на рис. 4 (кривая 1). Кривые 2 и 3 на том же рисунке соответствуют расчетной коррекции на полную и максимально возможную вместимость собора. Здесь применен тот же подход, что и в УС. Однако с учетом размещения в соборе большого количества гробниц, реально посетители могут находиться на площади пола не более 130 м². Поэтому полная вместимость составляет 260 человек (2 чел./м²), а максимально возможная – 520 (4 чел./м²). Измеренные значения RASTI представлены в табл. 3, а значения критериев C_{80} и D_{50} – в табл. 4.

Последний из обследованных памятников – БС – значительно меньше УС и АС. Небольшие размеры БС связаны с тем, что он сооружался как домовая церковь Великокняжеского двора [3]. План БС приведен на рис. 1в. Основной кирпичный объем существующего здания был возведен в 1484–1489 гг. и представляет собой четырехстолпный трехапсидный храм со ступенчатыми сводами. Объем открытой для посещения основной части храма, ограниченной с востока высоким 9-метровым иконостасом, составляет

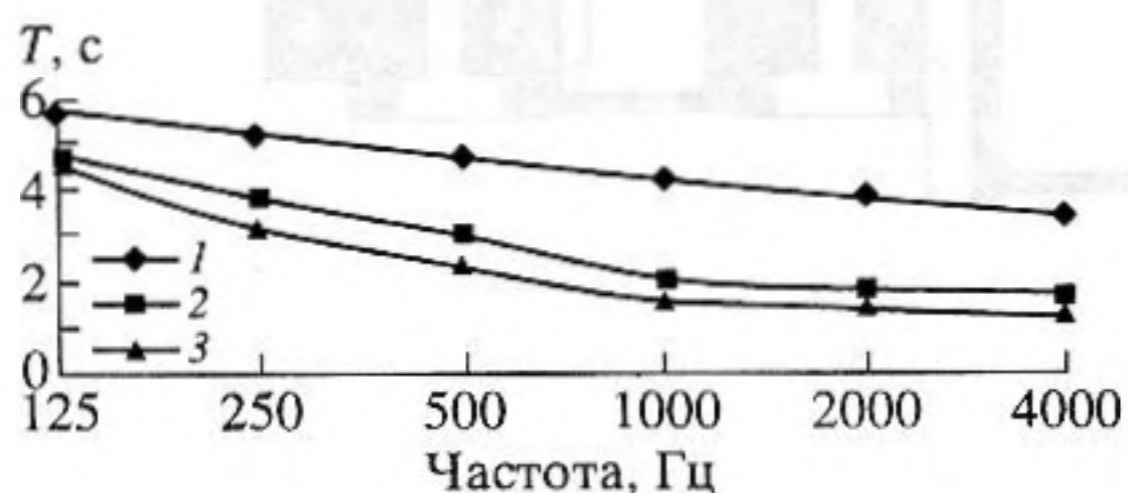


Рис. 2. Частотные характеристики времени реверберации УС. 1 – измерено в пустом соборе; 2 – коррекция на присутствие 800 человек; 3 – коррекция на присутствие 1600 человек.

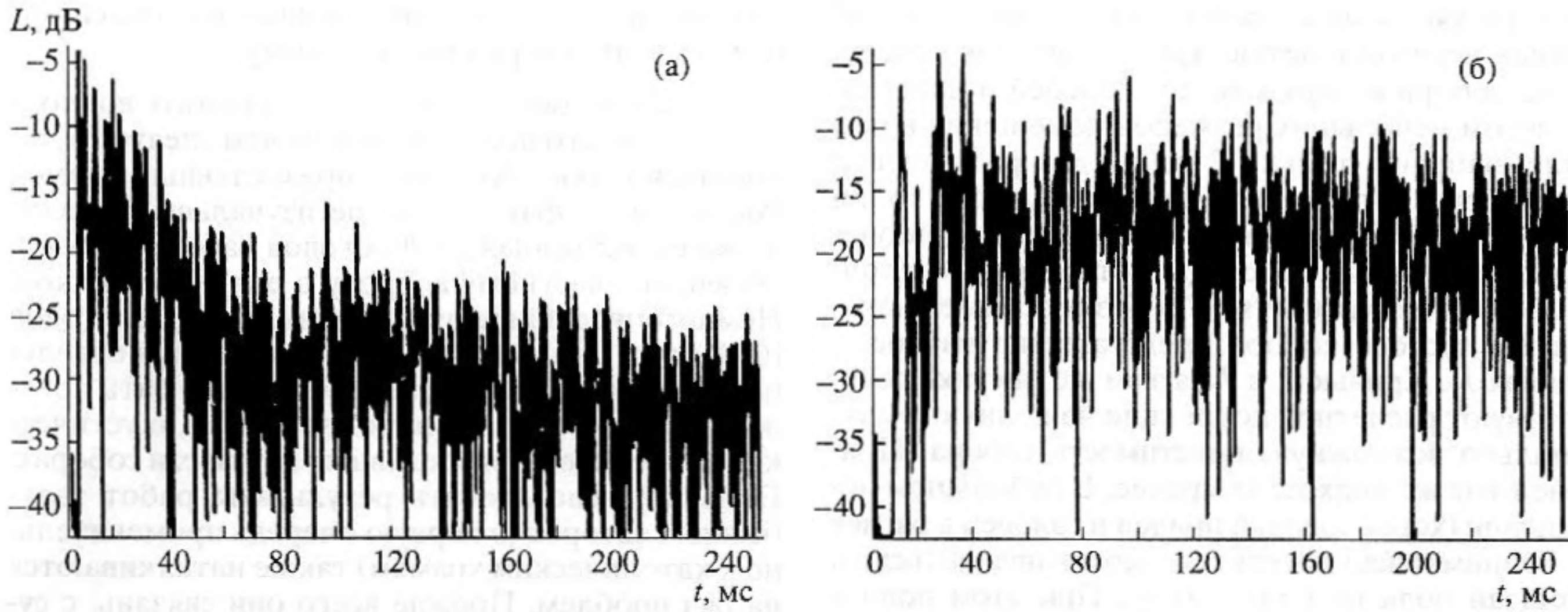


Рис. 3. ЕТС в УС: а – источник в S2, микрофон в точке 5; б – источник в S2, микрофон в точке 2.

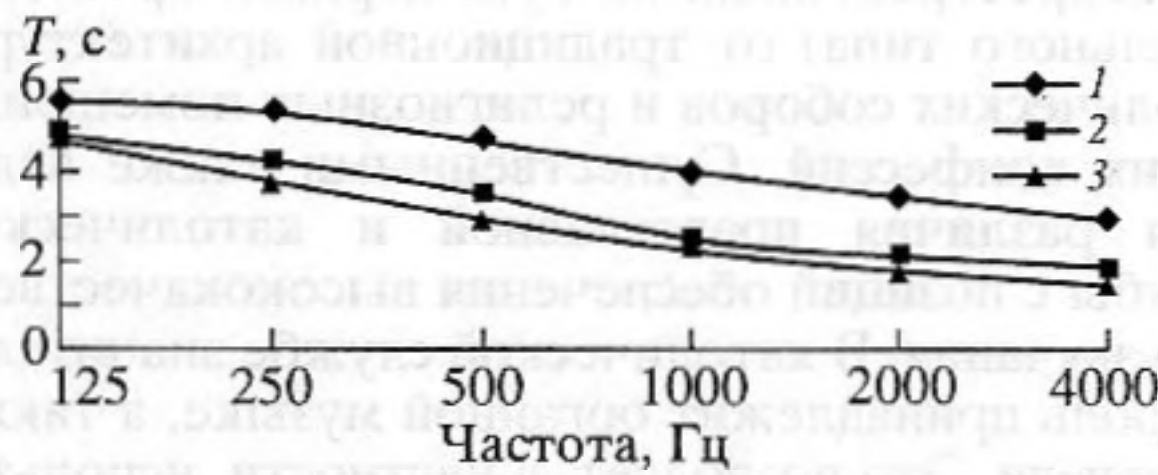


Рис. 4. Частотные характеристики времени реверберации АС: 1 – измерено в пустом соборе; 2 – коррекция на присутствие 260 человек; 3 – коррекция на присутствие 520 человек.

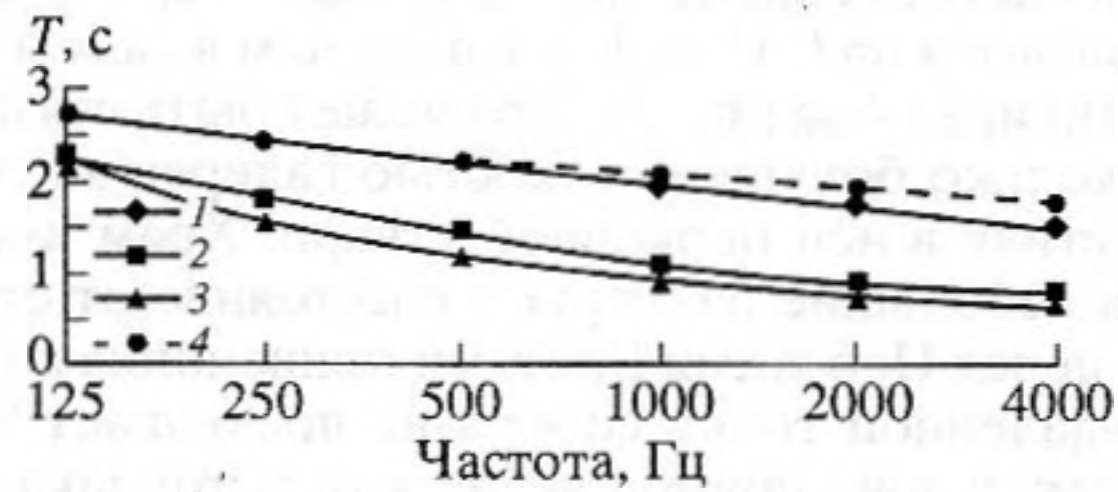


Рис. 5. Частотные характеристики времени реверберации ВС: 1 – измерено в пустом соборе; 2 – коррекция на присутствие 120 человек; 3 – коррекция на присутствие 240 человек; 4 – измерено в пустой галерее.

1010 м³. Стены и перекрытия ВС покрыты фресковой живописью, пол каменный из яшмы. В отличие от УС и АС в ВС имеются расположенные с западной стороны широкие хоры, площадь ко-

торых равна примерно половине площади самого храма. Другой особенностью ВС являются окружающие его с севера и запада галереи, а с юга дополнительный придел. В современном виде храм

Таблица 3. Значения RASTI в АС

Положение микрофона	RASTI	Положение микрофона	RASTI
Источник в S1, нет экранировки прямого звука		Источник в S2, нет экранировки прямого звука	
1	0.54	1	0.36
2	0.49	4	0.59
3	0.32	5	0.49
4	0.40	6	0.39
5	0.38	7	0.33
В среднем	0.43	В среднем	0.43
Источник в S1, прямой звук экранируется		Источник в S2, прямой звук экранируется	
6	0.33	2	0.31
7	0.28	3	0.29
8	0.31	8	0.32
В среднем	0.31	В среднем	0.31

Таблица 4. Значения C₈₀ и D₅₀ в АС

Положение микрофона	C ₈₀ , дБ	D ₅₀ , дБ	Положение микрофона	C ₈₀ , дБ	D ₅₀ , дБ
Источник в S1, нет экранировки прямого звука			Источник в S2, нет экранировки прямого звука		
1	-1.8	-4.6	1	-2.7	-5.4
2	-1.0	-3.9	4	-0.3	-3.1
3	-2.9	-5.3	5	-0.5	-4.0
4	-0.7	-3.8	6	-1.5	-4.5
В среднем	-1.6	-4.4	В среднем	-1.3	-4.2
Источник в S1, прямой звук экранируется			Источник в S2, прямой звук экранируется		
6	-6.8	-9.3	3	-5.8	-8.9
8	-5.1	-8.4	8	-9.7	-13.0
В среднем	-5.9	-8.9	В среднем	-7.8	-10.9

представляет собой систему из акустически связанных через открытые проемы объемов собственно собора и окружающих галерей и придела. С учетом небольших размеров помещения в нем были выбраны только 2 точки для размещения микрофона, а также две дополнительные точки на галерее (см. рис. 1в). Источник звука поочередно размещался перед Царскими Вратами (точка $S1$) и на хорах (точка $S2$). Измеренные значения T_{60} пустого собора представлены на рис. 5 (кривая 1). Кривые 2 и 3 на том же рисунке соответствуют расчетной коррекции на полную и максимально возможную вместимость собора. Применен тот же подход, что ранее. В небольшом помещении (хоры, южный придел и галереи в расчет не принимались) посетители могут находиться на площади пола не более 60 м^2 . При этом полная вместимость составляет 120 человек (2 чел./м^2), а максимально возможная – 240 (4 чел./м^2). В галерее на частотах выше 500 Гц время реверберации оказывается на 0.15–0.20 с выше, чем в самом соборе (кривая 4 на рис. 5). Это может быть связано с несколько большей гулкостью галереи за счет отсутствия в ней церковной утвари. Храм имеет очень небольшие размеры и расстояние от стоящего перед Царскими Вратами священника до самой удаленной точки собора не превышает 8 м. Поэтому в зоне прямой видимости источника наблюдается явное превалирование прямого звука. Так, в точке 1, удаленной от положения источника $S1$ на 5.8 м, значение $RASTI$ составляет 0.59, а при смещении микрофона в точку 3 на галерее, которая по-прежнему находится в зоне прямой видимости источника, $RASTI$ падает до 0.48. В точках 2 и 4, где прямой звук экранируется, значения $RASTI$ много ниже и равны соответственно 0.30 и 0.27. Также низкие величины $RASTI$ были зафиксированы во всех четырех точках при размещении источника в $S2$ на хорах. Для точек 1, 2, 3 и 4 они соответственно были равны 0.32, 0.28, 0.28 и 0.26. Когда источник находился на хорах, величины D_{50} в точках 1 и 2 составляют -8.7 дБ и -7.1 дБ , а величины C_{80} соответственно -3.2 дБ и -3.15 дБ . Самые низкие значения как четкости, так и прозрачности были зафиксированы для случая нахождения источника на хорах, а приемника в точке 4 в боковой части галереи ($D_{50} = -11.1 \text{ дБ}$; $C_{80} = -7.3 \text{ дБ}$).

Очевидно, что достоверные выводы по полученным результатам можно сделать только на основании сравнения экспериментальных данных с известными оптимальными значениями, соответствующими хорошим условиям слышимости. Если применительно к театрально-концертным залам [4] и многим другим типам помещений (кинотеатры, студии звукозаписи и т.п.) подобные оптимальные значения акустических критериев известны и им посвящена обширная литература,

то применительно к православным храмам ситуация обстоит совершенно по-иному.

С учетом особой важности данного вопроса для настоящего исследования на нем следует остановиться особо. Акустика православных храмов России ранее фактически не изучалась. Практически единственная до 90-х годов работа [5] была посвящена частному вопросу о роли голосников. Немногочисленные публикации последних годов [6–9] были связаны с изучением акустики отдельных храмов и не ставили своей целью дать предложения по оптимальным значениям акустических критериев в православных церквях и соборах. Попытки использовать результаты работ зарубежных авторов (в первую очередь применительно к католическим храмам) также наталкиваются на ряд проблем. Прежде всего они связаны с существенным отличием объемно-планировочных решений православных храмов (особенно широко распространенных на Руси церквей крестовокупольного типа) от традиционной архитектуры католических соборов и религиозных помещений других конфессий. Существенными также являются различия православной и католической службы с позиций обеспечения высококачественного звучания. В католической службе значительная роль принадлежит органной музыке, а также проповеди. Это позволяет, в частности, использовать хорошо известные требования к оптимуму реверберации для органной музыки и речи. Кроме того возможно ориентироваться на конкретные значения таких критериев как $RASTI$, D_{50} и C_{80} . Интересное исследование акустики католических храмов Португалии [10], в рамках которого производилось сопоставление результатов акустических измерений с субъективной оценкой качества звучания, подтверждает эффективность такого подхода.

В православной службе отсутствует органная или оркестровая музыка. Что касается проповеди, то она не характерна для повседневной службы и читается достаточно редко, в основном, по самым крупным церковным праздникам. Наиболее характерными здесь являются распевы (речитатив) церковнослужителей, а также хор, поющий без музыкального сопровождения [11]. Таким образом, проблема акустики православных храмов может быть сформулирована как обеспечение высококачественного звучания хора и достижение хорошей разборчивости речи при ее вокализованном, распевном речитативном характере. Именно с этих позиций целесообразно рассмотреть полученные результаты.

Остановимся сначала на времени реверберации. Из рис. 2 и 4 следует, что значения T_{60} в пустых УС и АС практически совпадают, хотя объемы соборов отличаются почти вдвое (соответственно 11500 и 6600 м^3). Здесь следует отметить,

что в пустых пятиглавых православных храмах, где все стены, своды и купола оштукатурены и покрыты фресковой живописью, а пол также является звукоотражающим (камень или чугунные плиты как в УС) зависимость времени реверберации от объема, хотя и присутствует, но выражена не слишком отчетливо. В качестве иллюстрации этого положения на рис. 6 показаны значения T_{60} на частоте 1 кГц в ряде пятиглавых храмов с объемом в пределах 3250–52000 м³. Помимо УС и АС здесь представлены данные по Троицкому собору (ТС) Ипатьевского монастыря в Костроме [7], а также Казанскому (КС) и Троицко-Измайловскому (ТИС) соборам в Санкт-Петербурге (результаты измерений авторов).

Для наглядности на этом рисунке применен не традиционно используемый логарифмический, а линейный масштаб по оси абсцисс. Как видно, хотя объем ТИС в 7.8 раз превышает объем АС, но значения T_{60} в них отличаются всего на 1 с. Аналогично, значения T_{60} в КС и ТИС практически одинаковы (соответственно 5.05 и 5.00 с), хотя объем последнего на 12000 м³ больше.

На рис. 7 показаны зависимости оптимума реверберации от объема помещений для хоровой музыки (ораторий) и для речи. Эти данные заимствованы из [4] и хорошо согласуются с предложениями других авторов. Там же нанесены усредненные в области 500–1000 Гц значения времени реверберации соборов для их заполнения от полного (2 чел./м²) до максимального (4 чел./м²). Не вызывает сомнений, что заполняемость храма прихожанами оказывает определяющее влияние на его акустику, причем оно связано не только с обычным снижением гулкости помещения, но и с изменением формы частотной характеристики T_{60} , приводящей к подчеркиванию низкочастотной реверберации. Убранство интерьера православного храма (прежде всего иконостас) имеет малое звукопоглощение в области средних частот. Поэтому наличие публики, которая имеет наибольшее звукопоглощение в этой области спектра, приводит к снижению T_{60} , которое в меньшей степени выражено на низких частотах. Данные табл. 5 иллюстрируют зависимость от заполняемости соборов отношения $T_{60}(125-250 \text{ Гц})/(0.5-1 \text{ кГц})$ времен реверберации усредненных в низко- и среднечастотной области.

Из этих данных видно увеличение доли низкочастотной реверберации всех соборов при росте их заполняемости. Причем это увеличение значительно превышает значение в 30%, рекомендованное для хоровой и классической музыки [4].

С учетом вышесказанного можно предварительно сформулировать рекомендации по оптимизации времени реверберации в православных храмах. Очевидно, что ориентируясь на методы "естественной" акустики обеспечить высококаче-

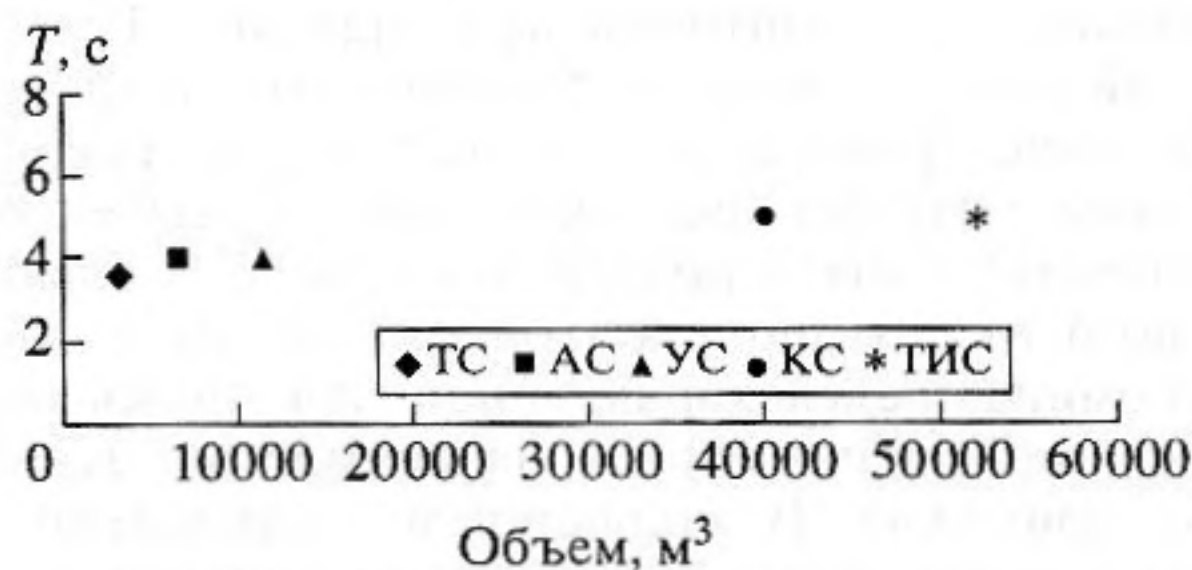


Рис. 6. Время реверберации пяти пустых соборов на частоте 1 кГц.

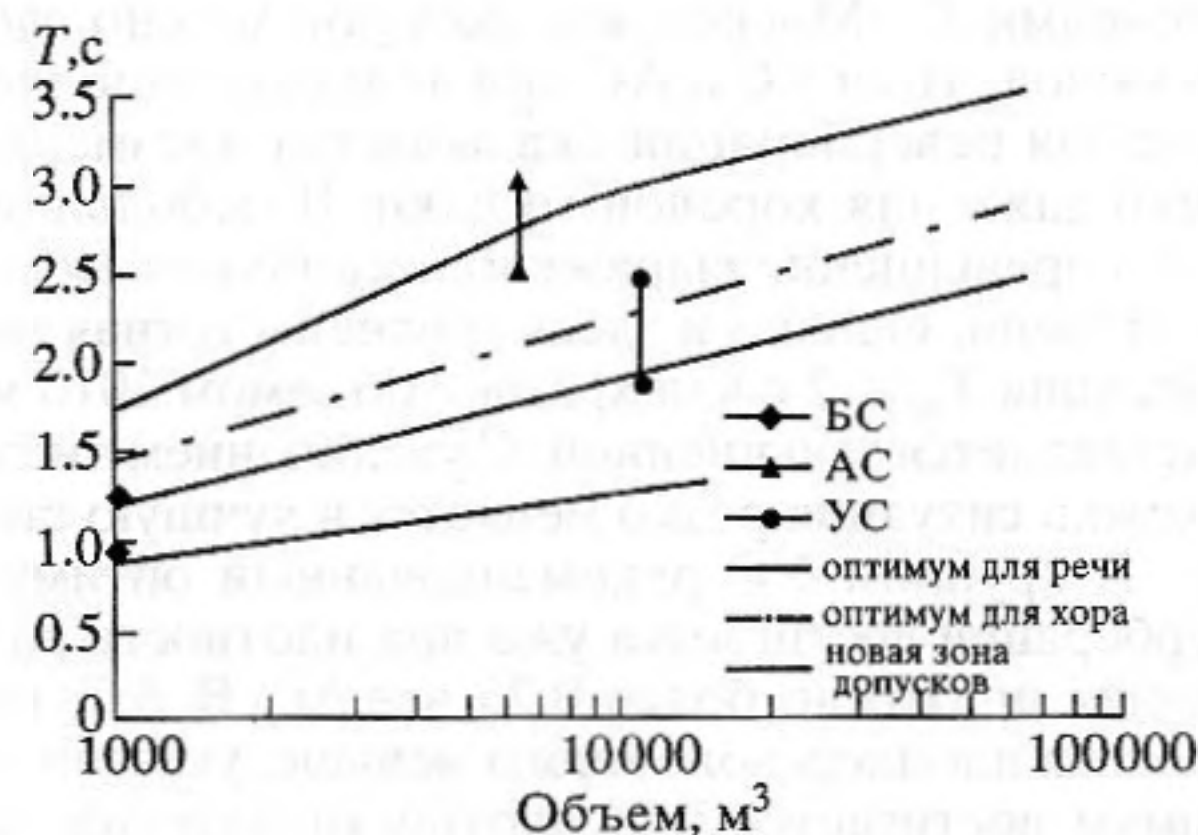


Рис. 7. Диапазон изменений T_{60} в соборах при их заполнении прихожанами с плотностью от 2 до 4 чел./м², а также зависимости оптимума реверберации для речи и хоровых выступлений по данным [4] и предложенная зона допусков.

ственное звучание хора и хорошую разборчивость речи не представляется возможным. Учитывая особую важность хора для эмоционального воздействия на прихожан, создающего "...эффект неземного, небесного звучания" [11, с. 246], представляется оправданным исходить из оптимума реверберации именно для хоровой музыки. В то же время вряд ли возможно традиционно формулировать требования к оптимуму реверберации на основе единой кривой типа $T_{60 \text{ опт}}(V)$. С учетом определяющего влияния заполняемости храма людьми на значение T_{60} предлагается использовать оп-

Таблица 5. Отношение T_{60} на низких и средних частотах

Собор	Отношение T_{60} (125–250 Гц)/(0.5–1 кГц)		
	Пустой собор	Полное заполнение (2чел./м ²)	Максимальное заполнение (4чел./м ²)
УС	1.24	1.71	2.05
АС	1.25	1.47	1.60
БС	1.30	1.68	2.00

ределенную зону оптимальных значений. Границы этой зоны должны соответствовать плотности размещения прихожан от 0.5 до 2.5 чел./м². Подобная зона оптимальных значений T_{60} выделена сплошным толстым контуром на рис. 7. Сравнительно большая ширина этой трубки обусловлена упоминавшейся характерной для православных храмов значительной зависимостью T_{60} от числа прихожан. В дальнейшем с накоплением новых данных об акустике русских церквей, возможно, потребуется определенная коррекция предложенной зоны оптимальных значений.

Сопоставляя предложенную зону допусков со значениями T_{60} Московских соборов можно сделать вывод, что в УС и АС при их малом заполнении время реверберации оказывается чрезмерно велико даже для хоровой музыки. В небольшом БС это превышение выражено несколько в меньшей степени. Однако и здесь среднечастотная реверберация $T_{60} \cong 2$ с для храма с объемом 1010 м³ представляется завышенной. С увеличением числа прихожан ситуация резко меняется в лучшую сторону. В крупном УС рекомендованный оптимум реверберации достигается уже при плотности размещения прихожан более 0.25 чел./м². В АС, где свободная площадь пола много меньше, указанный оптимум достигается при плотности размещения людей более 2.5 чел./м². Что касается небольшого БС, то при плотности размещения более 2 чел./м² его время реверберации оказывается даже несколько ниже рекомендованных для хорового пения значений. Известные субъективные отзывы о звучании хоров в храмах не противоречат этим выводам. Наилучшее качество звучания отмечается в АС при проведении в нем концертов духовной музыки. Эти концерты обычно проходят при большом количестве публики, близком к максимальному заполнению собора. Следует отметить, что именно в АС низкочастотный подъем времени реверберации выражен не столь значительно как в УС и БС.

Остановимся теперь на вопросе о структуре импульсного отклика соборов. Надо отметить, что форма сводов и радиусы кривизны куполов таковы, что не приводят в помещениях к нежелательной поздней концентрации звуковых отражений, проявляющейся как слышимое эхо. В то же время структуру звуковых отражений, особенно в крупных соборах (УС и АС) нельзя признать оптимальной. Последнее связано с большим запаздыванием потолочных отражений, а в центральной части помещений и с недостатком отражений от боковых стен. В итоге, структура импульсного отклика на его начальном участке оказывается обедненной отражениями высокого уровня (см. рис. 4). Более высокая плотность отражений за внутренними столбами соборов является кажущейся, так как из-за экранировки прямого звука относительный отсчет уровней отражений производится не

от него, а от наиболее интенсивного отражения. Недостаточное число ранних отражений является характерной особенностью объемно-планировочного решения русских пятиглавых крестовокупольных церквей и проявляется тем в большей степени, чем выше размеры, а соответственно и объем храма.

Применительно к индексу прозрачности C_{80} надо отметить, что, к сожалению, по организационным причинам у авторов не было возможности выполнить акустические измерения в заполненных соборах. С одной стороны наличие прихожан приведет к уменьшению реверберации помещения и соответственно к росту значений C_{80} . С другой стороны, на измеренные значения C_{80} значительное влияние (в сторону их увеличения) оказывают отражения от полов, которые в пустых соборах ярко выражены. При наличии прихожан эти отражения будут очень сильно ослаблены. В итоге можно сделать предположение, что при заполнении соборов людьми не следует ожидать заметного увеличения значений C_{80} по сравнению с результатами измерений в пустых помещениях. Во всяком случае не вызывает сомнений, что во всех Кремлевских соборах при любой степени их заполняемости публикой значение C_{80} не будет меньше величины в -5 дБ. Этот вывод не распространяется на зоны соборов, в которых происходит экранировка прямого звука внутренними столбами и где значения C_{80} будут ниже.

В отношении зон оптимумов C_{80} следует отметить, что в последние годы как критерии их поиска, так и количественные оценки подверглись существенным изменениям. Первоначально предлагалось дифференцировать оптимум C_{80} по зонам слушательских мест, затем, по мере накопления опыта было предложено использовать единую трубку оптимумов от $C_{80} = -1$ дБ до $C_{80} = 3$ дБ. В последнее время превалирует концепция о дифференцировании зон оптимумов C_{80} по типам музыкальных звучаний [12]. В этих рекомендациях, естественно, не учитывается специфика религиозной службы в православных соборах. Однако, сопоставляя эти данные и анализируя результаты наших измерений, можно сделать вывод, что границы зон оптимумов C_{80} в русских церквях должны находиться: для зон прямой видимости в пределах от -3 до +3 дБ; для зон экранировки прямого звука от 0 до -6 дБ. Оценивая с этих позиций результаты измерений C_{80} в Кремлевских соборах, можно прийти к выводу об их близости к указанным зонам оптимальных значений.

В заключение остановимся на вопросе о разборчивости речи. Ее оценка как по критерию RASTI, так и по значениям D_{50} приводит к сходным результатам. За исключением зон в непосредственной близости от источника звука разборчивость в соборах плохая (RASTI < 0.45). При

