

Колокола соборной звонницы Ростова Великого

Иеродиакон Роман (Огрызков)

В июле-августе 2012 г. на звоннице Успенского собора Ростова Великого, а также в ГМЗРК был проведен комплекс работ по исследованию колоколов ансамбля соборной звонницы. Они коснулись, прежде всего, исторической основы — колоколов XVII в. Таким образом, были исследованы колокола «Полиелейный», «Лебедь», «Баран», «Красный», четыре «Безымянных», два «Зазвонных». Ввиду дефицита времени колокол «Сысой» был обследован неполно. Так как существует гипотеза, что перелитый колокол «Козел» сохранил прежнюю геометрию, его основные геометрические и акустические параметры также были сняты.

В процессе работ были получены данные и материалы о каждом объекте:

- фотофиксация;
- геометрические параметры колокола;
- композиционные размеры декоративного оформления колокола;
- точный профиль колокола;
- геометрия маточника и шаблоны ушей колокола;
- силиконовые негативы наиболее характерных фрагментов орнамента;
- образцы металла;
- звукозапись звучания колокола;
- видеозапись работы колокола при звоне;
- оценка состояния, износа колокола;
- характеристики системы закрепления колокола на балке;
- особенности системы управления ансамблем;
- звукозапись звучания камертонов отца А. Израилева;
- фотографии надписей на резонаторах упомянутых камертонов.

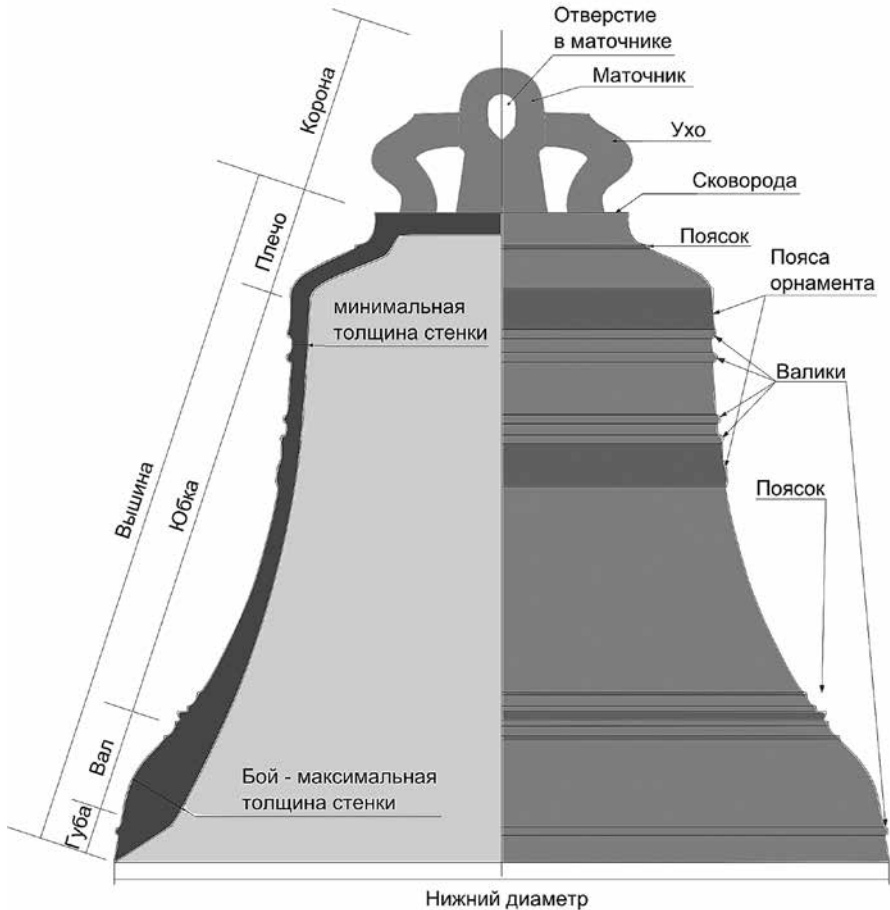
Собранные материалы обрабатывались и использовались для дальнейшего изучения ростовского ансамбля колоколов в различных научных направлениях.

Для получения необходимых результатов использовались методы анализа, сопоставления, стилистического анализа, компьютерного звукового спектрального анализа (программы Sonic Visualiser, Audacity), компьютерного 2D и 3D моделирования, частотного анализа (программы Gimp, Inkscape, Ansys), рентгеновский электронный спектральный химический анализ.

В рамках данной статьи, в целях соответствия регламенту, будут тезисно приведены лишь самые любопытные и актуальные результаты упомянутых исследований. Как ожидается, полное описание выйдет отдельным изданием.

Основные физические параметры

В процессе работ производились замеры ростовских колоколов. Изучение их геометрии явилось самым трудоемким этапом работ. Фиксировались 12 основных и множество дополнительных параметров: размеры колокола, короны, закладного кольца, композиционные размеры рельефных украшений, шрифтов. В качестве инструментов для измерений использовались рулетка (II класс точности), лазерный дальномер, штангенциркуль с точностью до 0,1 мм, кронциркули для внутренних и внешних замеров, уровень, вспомогательные приспособления. Для получения более точных результатов каждый замер производился несколько раз. Определение кронциркулем внешних и внутренних диаметров на разной высоте дублировалось измерением длины окружности в тех же местах. Так как колокол имеет неровности и деформации, то снятие диаметров, толщины боя и некоторых других параметров производилось многократно по всему периметру юбки. Это помогло установить размеры деформаций



Ил. 1. Строение и основные размеры русского колокола

и литьевых дефектов, а также произвести оценку износа колоколов.

Погрешность измерений, таким образом, оказалась невысокой: не более 0,8% по площади профиля, она не превышает отклонений в геометрии колокола, связанных с процессом литья.

По окончании замеров производилось снятие профиля каждого колокола. В дальнейшем с готовых лекал и шаблонов были получены чертежи, которые сканировались и переводились в векторный формат. Затем уточнялась геометрия всего полученного профиля по предварительно сделанным замерам. Форма маточника и ушей воспроизводилась по сканированным шаблонам и обмерам. На этом этапе также проводилась некоторая аппроксимация незначительных отклонений геометрии, связанных с процессом литья. Полученный профиль обсчитывался на 3D модели колокола в специализированных программах, силами привлеченных специалистов. Сперва определялся объем колокола.

Исходя из значений веса «Зазвонных» и «Безымянных» колоколов, полученных в ходе обследования В. Г. Шарикова и А. Б. Хадорича в 1999 г., вычислялась плотность металла. Средняя расчетная плотность, полученная таким путем оказалась около 8 600 кг/м³. Данное значение использовалось как для определения веса более крупных колоколов, для которых был установлен при моделировании объем, так и для частотного анализа.

Сравнение данных частотного анализа с картиной реального звучания колокола, полученной по спектрограмме в программе Audacity, позволило проверить точность воссозданной геометрии и получить расчетный модуль упругости материала. Он оказался довольно высоким, варьируется от $0,9 \cdot 10^{11}$ до $1 \cdot 10^{11}$ Па.

Индивидуальные особенности ростовских колоколов

«Сысой»

Колокол был отлит в 1689 г. мастером Флором Терентьевым. Указанный в надписи вес: 2 000 пудов (32 760 кг). Нижний диаметр: 3625–3640 мм. Отношение вышины к диаметру: 0,87, отношение нижнего диаметра к толщине боя: 11,2. Язык колокола в настоящее время для достижения оптимального места удара требует коррекции положения по высоте. Интересен следующий факт: ни один из трех больших благовестников ростовского ансамбля не сходен с другим по пропорциям. Выскажем предположение, что, подбирая индивидуальные геометрические параметры для каждого гиганта, мастера должны были иметь экспериментальное представление о том, какие высотно-тембровые звуковые качества будут получены с применением той или иной модели колокольной формы.

«Полиелейный»

Отлит в 1683 г. Филиппом Андреевым. Вес, указанный в надписи: 1000 пудов. Нижний диаметр: 2 862 мм. Отношение нижнего диаметра к боевой части равно 11,5 — колокол толстостенный. Он также имеет ярко выраженную

вертикальную пропорцию: отношение вышины к нижнему диаметру приближается к 1,0. В процессе трехмерного моделирования было рассчитано, что вес колокола находится в рамках от 16900 до 17300 кг, что заметно больше указанного веса (1000 пудов = 16380 кг). Можно предположить, что вес колокола увеличился в процессе литья: форма под давлением массы расплавленного металла деформировалась при заливке. Изменения претерпели внутренняя и внешняя части формы, что хорошо заметно на воссозданном профиле.

Филипп Андреев на двух ростовских благовестниках дорабатывает шрифт, который использовали чуть ранее братья Василий и Яков Леонтьевы. Его достоинство — высокая декоративность. Изящные формы букв различны по геометрии, некоторые имеют два или несколько начертаний, например «К», «О», «Е», «С», «Х», «Ъ». Широко использованы разнообразные надстрочные знаки — выносные буквы и титла.

«Лебедь»

Отливался в 1682 г. Филиппом Андреевым. Заявленный вес: 500 пудов, нижний диаметр: 2271 мм. Профиль толстостенный, отношение нижнего диаметра к толщине боя составляет 12,4, соотношение вышины к нижнему диаметру 0,86. Для «Лебедя» характерен широкий раструб юбки. Расчетный вес весьма близок к заявленному и, по результатам моделирования, составляет около 8100 кг.

На внутренней поверхности есть глухое высверленное отверстие диаметром около 3 мм. Подобные отверстия есть еще на нескольких колоколах звонницы. По утверждению соборных звонарей это следы забора металла для «мокрого» химического анализа сплава, который производился Т. Б. Шашкиной в 1980–90 гг. К огромному сожалению, данные о составе, если они и были получены, остались в неизвестности. Примечательная форма придана языку колокола: его ударная часть напоминает сильно вытянутую грушу.

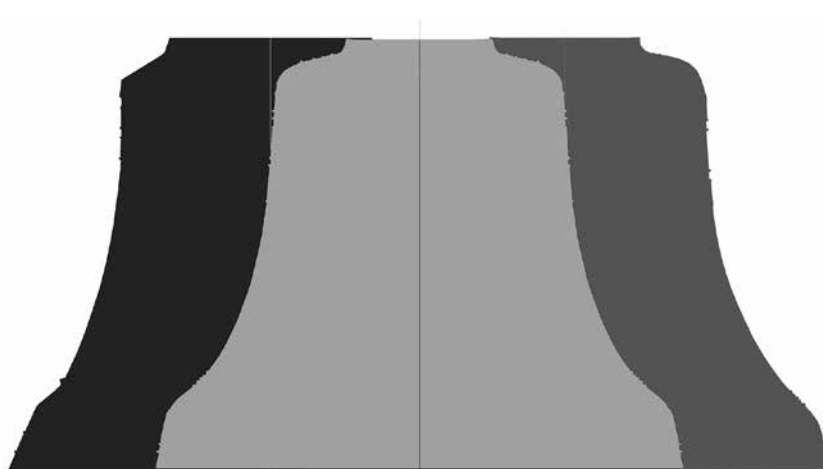
Хочется отметить здесь две особенности известных нам колоколов Филиппа Андреева. Первое: все его колокола, как правило, толстостенны. Второе: почти все они неряшливы в плане финишной обработки и качества литья. Его работы имеют наплывы, заусенцы, заметные усадочные раковины. Декоративные рельефы зачастую плохо очищены, залиты металлом.

«Баран»

Отливался в 1654 г. мастером Емельяном Даниловым. Указанный вес: 80 пудов. Это единственный сохранившийся подписной колокол указанного мастера. Нижний диаметр: 1257 мм. Колокол имеет гармоничные пропорции и является редким крупным образцом литья середины XVII в. — переходного периода, когда мастера Пушечного двора начали осваивать самобытные колокольные профили и формы. Московские мастера второй половины XVI — первой половины XVII вв. предпочитали в своем творчестве использовать шаблоны, которые придавали колоколу грубоватую форму, названную современными исследователями «ведро». Модели такого типа характеризовались угловатыми

очертаниями в месте переходов от сковороды к плечу, от плеча к юбке, внизу от юбки к валу, на валу к губе. Переходы оформлялись либо скруглениями малого радиуса, либо углом. Поверхности плеча, юбки и нижней части вала с губой выполнялись практически прямыми в профиле, или имели незначительные изгибы. Таковы сохранившиеся работы Нестора Иванова, Андрея Чохова, Кирилла Самойлова, Никифора Баранова. Однако в указанный же период появляются и другие модели, в которых литейщики пытаются смягчить углы формы и придать плоским участкам выразительный изгиб. В подобном стиле стал работать приехавший в Россию немец Иоганн Фальк. Чуть позднее, в 1650–60 гг., в России происходит повсеместный переход к колокольной форме с плавно изогнутыми очертаниями. Совершенно очевидно, что Емельян Данилов был одним из пионеров этого движения. Его «Баран» сочетает черты того и другого типа колокольной геометрии. Он снабжает профиль изящными, осторожными изгибами юбки и плеча, скругляет место перехода от плеча к сковороде, от юбки к валу и сам вал. Но нижняя часть вала, как и в прежние времена, остается на профиле прямой, и с удлиненной губой. Характерными внедряемыми типовыми деталями являются также набор поясков на плече, фигурный поясок в месте перехода юбки в вал. Двойной же поясок на губе колокола представляет собой стандартное оформление предыдущего периода. Пропорции колокола выверены с большой эстетикой. Стенка умеренно толстая, отношение нижнего диаметра к толщине боя составляет 12,4. Расчетный вес практически сошелся с приведенным в надписи: 1250–1280 кг. Отношение вышины к нижнему диаметру: 0,88. Толщина стенки колокола имеет большой перепад: в месте боя в 4 раза больше чем у плеча. Впрочем, такое соотношение характерно для целого ряда русских профилей середины XVII в.

В настоящий момент в месте удара языка образовалась внушительных размеров выбоина. Толщина боя в этом месте уменьшилась на 8%. Таков результат



Ил. 2. Эволюция формы русского колокола в XVII в.: наложение силуэтов колоколов К. Самойлова (1629), «Баран» (1654), М. Ладыгина (1690)

постоянной эксплуатации без перевески колокола. Он все еще находится вне опасности, но все-таки необходимо задуматься о неблагоприятных последствиях дальнейшей эксплуатации в таком положении. Целесообразно было бы развернуть колокол на 180° для смены места удара.

«Красный»

Отлит без надписей, поэтому его дата литья, вес и автор до сих пор точно не были установлены. Таким образом, он представляет особый интерес для исследователя, тем более что является одним из наиболее красивых по звуку колоколов ростовской соборной звонницы. Практически во всех источниках колокол приводится с весом 30 пудов, что неверно. При моделировании расчетный вес оказался 900 ± 15 кг — на 83% больше, чем по документам! Нижний диаметр «Красного» 1070 мм, он отлит с достаточно толстой стенкой: отношение нижнего диаметра к толщине боя — 12,4. Соотношение вышины к нижнему диаметру — 0,91.

Оформление состоит из поясов трилистника и херувимов с жемчужником¹, стандартного для колоколов второй половины XVII в. фигурного пояска в месте перехода юбки к валу. Обточка на токарном оборудовании не проводилась. Некоторыми исследователями высказывалось мнение, что «Красный» мог быть отлит в середине XVII в. Здесь надо отметить, что его профиль плохо соответствует образцам литья этого времени. Плавные скругления плеча, юбки, вала, форма вала, размер подвесного кольца для языка, соотношение толщины стенки в месте боя и у плеча характерны для более поздних моделей. На русских колоколах подобного веса высокие рельефы не известны нам ранее 1666 г., а орнаментальные фризы ангельских сил — ранее 1677 г. С другой стороны, использованный тип херувимов, форма трилистника и нарочитая толстостенность не встречаются позднее начала 1690-х гг. Отсюда вытекает, что колокол мог отливаться в период с 1660 по 1680-е гг. Вероятно, он изготавливался артелью, в которой работал Федор Моторин. Такое предположение позволяет сделать сравнение профиля «Красного» с его работами.

В настоящее время место удара на боевом кольце колокола сильно изношено: язык проклепал нишу, уменьшив толщину стенки на 11%, что является серьезным износом. В ближайшее время было бы весьма важно озаботиться перевеской этого колокола с разворотом на 180° и изменением схемы закрепления. Колокол необходимо подвесить за новые оси, продетые в парных ушах.

«Красный» характерен еще одной особенностью. Он вытянулся в нижнем диаметре по направлению ударов на 1% и приобрел форму эллипса. Подобное изменение геометрии — результат эксплуатации без изменения положения колокола. Металлы и неметаллы имеют свойство, которое называется ползучесть. Оно проявляется при постоянной или периодической нагрузке, приложенной в одном и том же месте, в одном и том же направлении. Благодаря ползучести материалов происходит в нашем быту масса полезных вещей: например, изнашивается одежда, обувь. В результате таких деформаций уменьшается концентрация опасных напряжений, конструкция подстраивается под нагрузку.

«Козел»

Перелит в 1911 г. Указанный вес — 18 пудов 22 фунта. Однако нас интересовал исторический оригинал. Именно он подбирался в ансамбль, который сохранился сейчас практически полностью. Его основные геометрические параметры приводит отец Аристарх Израилев в своей работе «Ростовские колокола и звоны». По проведенным расчетам выяснилось, что оригинальный колокол весил не 20 пудов, а около 30 пудов. Впоследствии же, очевидно, был перелит на заводе «П.И. Оловянишникова Сыновей» в вес и ноту, близкие к тем, которые были известны заказчику по вышеприведенному источнику. Таким образом, линейка весов всего ансамбля к началу XVIII в. выглядела следующим образом (в пудах): 2000—1000—500—140²—80—55—30—10,8—8,6—4,9—4,3—4,7—2,6.

Исследователи обращают свое внимание на необычный внешний вид колокола. Он не имеет абсолютно никаких украшений, рельефных поясков на юбке. Литая надпись проходит только по нижней части вала колокола. Отсюда делается вывод, что колокол отливался особо, с учетом рекомендаций отца Аристарха Израилева и с повтором геометрии оригинального колокола. Не исключено, что изготовитель использует гладкую поверхность на колоколе по совету известного акустика, но хочется обратить внимание еще на одну сторону вопроса. Начало XX в. — время модерна в церковном искусстве России. Одним из лидеров в изготовлении церковной утвари и колоколов в указанном стиле являлось «Товарищество П.И. Оловянишникова Сыновей». Колокола фабрики, следуя новым вкусам, нередко исполнялись совершенно «лысыми», некоторые сохранились и поныне. Вполне естественно будет заключить, что колокол для ростовского ансамбля, отлитый в 1911 г., не являлся исключением. Но вместе с тем, его пропорции серьезно отличаются от других, современных



Ил. 3. Колокол «Козел» (1911) и колокол завода Оловянишниковых (1910) из коллекции ГАБТ

ему стандартных моделей завода. Сравнение параметров оригинала и его замены дает высокую вероятность гипотезе, что ярославские мастера изготовили новый колокол, придерживаясь геометрии исторического. Хотя, радиус изгиба юбки и форма вала не соответствуют образцам XVII в. Можно все же заключить, что звучание нынешнего «Козла» в какой-то мере напоминает своеобразный голос предшественника.

«Безымянные» колокола

Отдельного внимания заслуживает группа колоколов, которые в описаниях XIX в. указаны как «Безымянные». Группа состоит из четырех колоколов, отлитых по всей видимости в XVII в., весом: 177, 141, 81 и 71 кг³, без надписей. Они значительно отличаются между собой по геометрии, оформлению, качеству литья и обработки, представляя особый интерес для исследователя. При самом поверхностном взгляде становится понятно, что колокола 1 и 4⁴ имеют одинаковое оформление — пояс растительного цветочного орнамента (т.н. «крины») с жемчужником, а колокола 2 и 3 оформлены одинаковым трилистником. Кроме того, колокола 1 и 4 обрабатывались шлифовкой абразивами, а 2 и 3 — токарным методом. На этом, впрочем, их общие черты заканчиваются.

«Безымянный 1»

Нижний диаметр: 633 мм, отношение нижнего диаметра к толщине боя 11,8 — он толстостенный. Отношение вышины к нижнему диаметру: 0,89. Обращает на себя внимание значительный перепад толщины стенки. Соотношение между толщиной боя и толщиной у изгиба плеча составляет 3,7. Колокол отлит не очень качественно. Снизу на сковороде, на внутренней поверхности губы колокола заметны наслоения металла, натёки, каверны и несплошности. Маточник колокола пролит плохо, верхняя его часть не удалась из-за недостатка металла. Железное кольцо для языка выполнено некрупным. Необычна форма колокола. Переход от плеча к юбке выполнен с малым радиусом скругления и смотрится угловато. Переход от юбки к валу сведен на нет изгибом большого радиуса. Вал выглядит также угловатым из-за малого радиуса скругления. Нижняя часть его отклоняется от вертикали на очень малый угол. Язык имеет вытянутую каплевидную форму.

«Безымянный 2»

Нижний диаметр: 631 мм, отношение нижнего диаметра к толщине боя: 15 — колокол тонкостенный. По этой причине его звук был ниже, чем у «Безымянного 1», несмотря на близкий диаметр и меньший вес. Отношение вышины к нижнему диаметру: 0,87. В настоящее время он находится в фондах музея и не участвует в звонах из-за полученного в процессе использования повреждения: отбита часть нижнего края, трещины пошли в разных направлениях. Тонкая стенка колокола послужила причиной непродолжительного ресурса колокола. Изгибы профиля не отличаются большим изяществом, скругления плеча и вала имеют сравнительно небольшие радиусы. Сложный рельефный

пояс в месте перехода юбки в вал сформирован в виде осторожных уступов. Переход от юбки к валу выполнен изгибом большого радиуса. Язык имеет форму расширяющегося книзу стержня с выступающей ударной частью — яблоком. Заканчивается коротким закругленным хвостовиком с отверстием для кольца.

«Безымянный 3»

Нижний диаметр: 505 мм, отношение нижнего диаметра к толщине боя: 13,4. Отношение вышины к нижнему диаметру: 0,9. Внешний вид, форма колокола стандартны для образцов литья 1670–90-х гг. Оформление: два пояса трилистников в верхней части юбки, разделенных четырьмя валиками, пояс-уголок на плече, сложный пояс в месте перехода юбки в вал, валик на губе. По всем указанным параметрам «Безымянный 3» может быть назван классической моделью русского колокола последней четверти XVII в. Особенностью данного экземпляра является прямое в профиле плечо, которое роднит его с некоторыми образцами конца 1670-х — начала 1680-х гг. Изгибы профиля вполне изящны. Фигурный пояс в месте перехода юбки в вал своеобразен: центральный выступ его дерзко заострен и на профиле выглядит как шип, тогда как остальные выступы пояса выполнены в низком рельефе. Колокол отлит с достаточно высоким качеством, обработка готового изделия проводилась на токарном оборудовании. Язык имеет вытянутую каплевидную форму.

«Безымянный 4»

Нижний диаметр: 471 мм, отношение нижнего диаметра к толщине боя: 14. Отношение вышины к нижнему диаметру: 0,89. Обладает достаточно изящной формой. Литье среднего качества, язык исполнен в форме стержня с прикованной на нем ударной частью — яблоком. Маточник отличен от других «Безымянных» колоколов. Верхняя его часть, наподобие более ранних моделей, обработана с верхней плоскостью, со скруглениями по бокам. Отверстие в нем имеет квадратную форму, утоплено между парными ушами. Уши более крупные и грубые по очертаниям, чем у соседей, без фасок. У колокола есть родной брат в Москве. В собрании колоколов Большого театра, приобретенных из московских церквей, находится один экземпляр, близкий по весу, практически идентичный по декоративному убранству, деталям профиля, короны



Ил. 4. Группа «Безымянных». Слева направо: 1, 2, 3, 4

и форме языка. Принадлежность руке одного и того же автора здесь не вызывает сомнений. Можно достаточно смело утверждать, что «Безымянный 4» отливался московским мастером.

Особую сложность представляет определение даты литья и автора каждого из «Безымянных» колоколов. При беглом осмотре создается впечатление, что колокола 1 и 4 могли быть отлиты Филиппом Андреевым, а 2 и 3 — иным мастером Пушечного Двора. Такой вывод напрашивается при сравнении декоративных рельефов с другими образцами литья указанного мастера и московскими колоколами последней четверти XVII в. Однако при ближайшем рассмотрении всех особенностей, возникает масса вопросов. Профили колоколов 1 и 4 плохо соответствуют шаблонам, с которыми работал Филипп Андреев. Кроме того, вообще затруднительно ответить, создавались ли они оба руками одного и того же человека. На сомнение наталкивает изучение особенностей профиля, короны и языка каждого из колоколов. «Безымянные» же 2 и 3 наверняка относятся к разным авторам. «Безымянный 2» имеет по своему профилю мало общего с «Безымянным 3». Последний, судя по некоторым элементам профиля, мог отливаться мастерами артели Моториных.

Чуть более определенно можно высказаться о времени литья «Безымянных». Пока остается загадкой, как вообще подбиралась эта группа. Вполне возможно, что колокола 3 и 4 так же, как и 1 и 2, появились в разное время, так как первые два создают неблагозвучный интервал между собой, а вторая пара имеет весьма близкие размеры. У колокола «Безымянный 1» весьма необычный профиль, который нигде более не встречается. При большой толщине боя он вылит со значительным перепадом толщины в стенке, что характерно для колоколов 40–50 гг. XVII в. К этому же периоду можно было бы смело отнести невысокое качество литья и малый размер кольца для языка. Вместе с тем, ярко выраженный изгиб юбки и покатое плечо относят его к более позднему периоду. Можно предположить, что колокол отливался в 60–70 гг. XVII в. «Безымянный 2» характерен своей тонкостенностью, которая вошла в моду к 90-м гг. XVII в. и была популярна у московских мастеров до конца XVIII столетия. Однако, конфигурация трилистника, согласно современным данным, не позволяет датировать его XVIII в. Вполне вероятно, что он отливался в конце 80-х — в 90-х гг. XVII в. Колокол 3 уместно отнести к изделиям конца 70-х — начала 80-х гг. XVII в. «Безымянный 4», учитывая сходность его формы и короны с колоколом Патриарха Никона 1666 г. и, вместе с тем, относительно тонкую стенку, можно датировать 60–80 гг. XVII в. Обобщая, можно сказать, что период, в который могли быть отлиты «Безымянные», распространяется с 1660 до 1700 г.

«Зазвонный 1»

Нижний диаметр: 492 мм, отношение нижнего диаметра к толщине боя: 12,5 — колокол умеренно толстостенный. Отношение вышины к нижнему диаметру: 0,83. Соотношение толщин в нижней и верхней части юбки большое: 3,9, вес 76,6 кг. Отлит без рельефных украшений, если не считать четырех

стандартных валиков в верхней части юбки, валика на губе и простого пояса-уголка в месте перехода юбки в вал. Весьма интересна модель: она сочетает в себе характеристики двух основных типов русских колоколов XVII в. Верхняя часть колокола, вплоть до вала, хорошо вписывается в стандарты первой половины XVII в.: плоское плечо, без поясков на нем; резкие, оформленные углом без скругления, переходы к сковороде и к юбке; незначительный изгиб юбки, переходящий в прямую в верхней ее части; простой угловатый поясок-шип в месте перехода юбки в вал. Нижняя же часть колокола, напротив, повторяет форму колоколов второй половины XVII в.: плавный изгиб вала, сравнительно небольшая губа с малым углом отклонения от вертикали, один валик на ней. Своеобразна форма короны: изогнутая часть ушей расположена достаточно высоко над сковородой, маточник характеризуют угловатые формы, прямоугольное навершие и квадратное в сечении отверстие. Язык имеет вытянутую каплевидную форму. Колокол хорошо обработан токарным методом: сверху на маточнике осталось конусное отверстие от шпинделя, которым колокол закреплялся на станке. Однако вместо режущего мастера использовали шлифовальный инструмент, возможно — бруски.

Описываемый колокол представляет исключительный интерес. Судя по всем приведенным данным, его достаточно смело можно датировать 1650—1660 гг. К такому выводу приводит анализ ряда особенностей: специфический профиль и оформление колокола переходного периода, соотношение толщин стенки, размер подвесного кольца. Уместно сравнить «Зазвонный 1» с 20-пудовым колоколом Высоко-Петровского монастыря, отлитым в 1653 г., и с 16-пудовым колоколом Николо-Угрешского монастыря 1655 г.⁵ С первым



Ил. 5. Наложение силуэтов «Зазвонного 1» (светлый) и колокола Высоко-Петровского монастыря (1653, темный). Справа — колокол Николо-Угрешского монастыря (1655)

его роднят идентичность формы и декоративных элементов, конфигурация маточника и размер подвесного кольца. Со вторым — плавный изгиб перехода от юбки к валу, форма вала, положение одинарного пояса на губе. Учитывая почти полное соответствие пропорций толщины боя к диаметру и перепада толщины стенки по высоте колоколу «Баран», «Зазвонный 1» с некоторой долей вероятности можно приписать руке Емельяна Данилова. Скорее всего, он являлся частью более раннего ансамбля колоколов Успенского собора.

«Зазвонный 2»

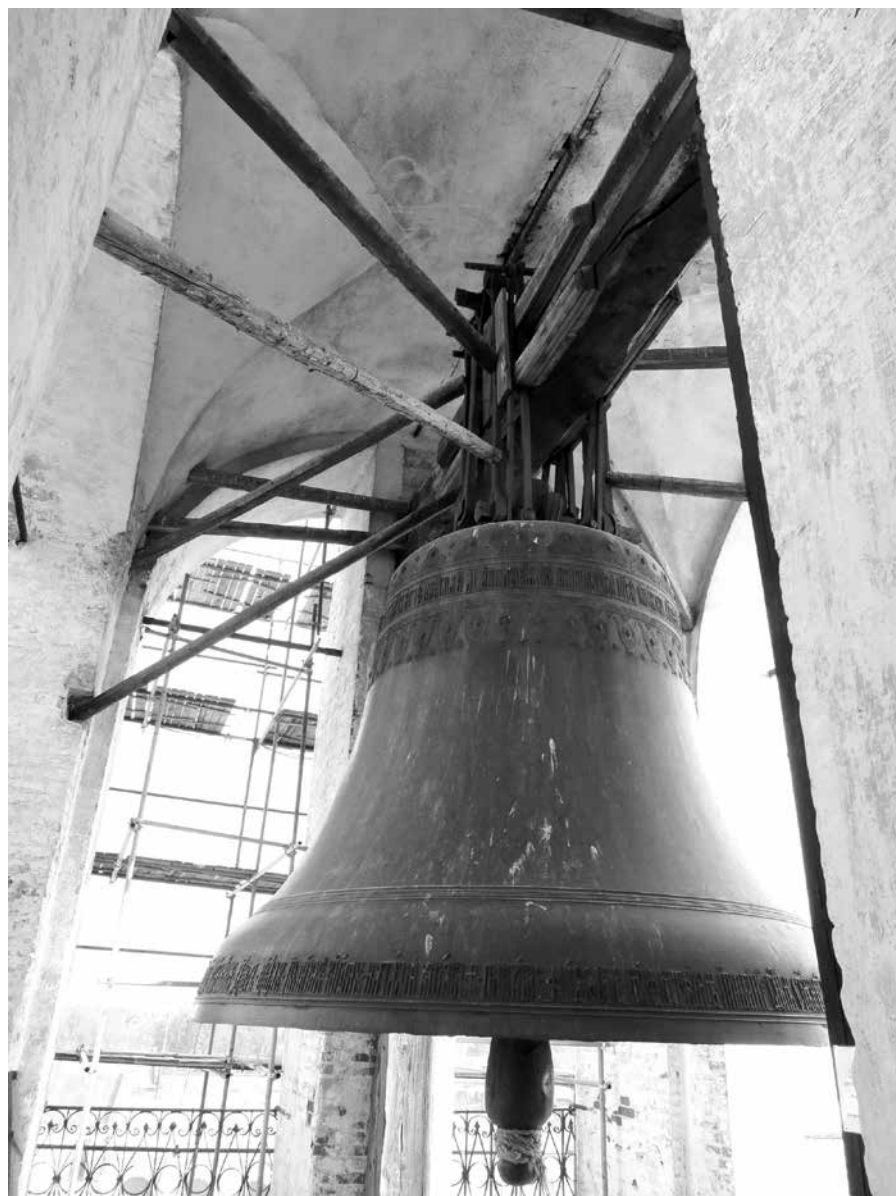
Нижний диаметр: 411 мм, отношение нижнего диаметра к толщине боя: 13,7. Отношение вышины к нижнему диаметру: 0,87, вес 41,85 кг. Декоративное убранство состоит из пояса трилистника характерной конфигурации, с мелким жемчужником, и орнамента из причудливого сплетения фантастических рыб-осетров и бутонов. Модель обладает весьма плавными изгибами, колокол является классическим образцом последней четверти XVII в. Мог быть отлит, судя по орнаменту и профилю, работниками артели Моториных в 1680–90 гг. Язык новый, не родной, плохо подобран по весу, так как имеет несоразмерно крупное яблоко. Такое несоответствие, при учете постоянного использования, внушает опасение за сохранность «Зазвонного 2». Весьма желательно предпринять усилия по замене языка и перевеске колокольчика с целью изменения места удара и способа закрепления.

Недостатки современной системы закрепления колоколов

Следует уделить особое внимание некоторым недостаткам системы закрепления колоколов на несущих балках. Они фиксируются железными кованными осями и хомутами на деревянных балках. В процессе звона, из-за усилий, направленных в поперечной по отношению к оси балки плоскости, некоторые из них испытывают деформации и серьезные нагрузки на кручение. Речь идет, прежде всего, о двух балках. Одна из них — та, на которой расположены колокола «Лебедь», «Красный», «Козел» и «Ионафановский». Неблагоприятный режим нагрузок создается здесь не только для балки — синхронным качанием в поперечной плоскости колоколов «Лебедь», «Красный» и «Козел» во время звона, но также и для двух последних колоколов — неудачным закреплением их. Они фиксируются на кованой оси, протетой в отверстие маточника, которая ориентирована поперек балки. Оба колокола страдают во время звона от нагрузок на излом в маточнике, в месте закрепления на оси. В большей степени — «Красный». По-видимому, здесь причина износа его места ударов языка и развитой эллипсоидности.

Наибольшую же озабоченность вызывает состояние несущей балки колокола «Сысой», представленной двумя расположенными один над другим деревянными брусьями. Брусья закреплены по оси север-юг в гнездах кирпичных столбов звонницы. Дополнительно, балка подперта возле гнезд соединенными с кирпичными столбами вертикальными деревянными опорами, которые сокращают ее длину и увеличивают площадь опоры. Колокол

зафиксирован хомутами на трех кованных осях, продетых в отверстия маточника и в двух одинарных ушах. Там же находится ряд страховочных кованных связей, которые должны ограничивать качание колокола и подхватывать его в случае прогиба любой из осей. Вероятно, некоторые из этих связей уже задействованы. Хомуты зафиксированы на балке от продольных (по оси север-юг) смещений деревянными плашками-стопорами, прибитыми к брусью балки



Ил. 6. Система закрепления колокола «Сысой»

между хомутами. Кроме того, перемещения колокола на хомутах и смещения балки в поперечном направлении во время звона предупреждаются системой восьми деревянных укосин и восьми перемычек, идущих от угловых арочных столбов палатки звонницы к хомутам и основной балке. Все детали подвесной системы, как видно, имеют исторические состав и расположение⁶. Основная балка и, скорее всего, система подпирющих деревянных деталей конструкции были заменены в 1987 г. Таким образом, на сегодняшний день деревянные несущие элементы подвесной конструкции «Сысой» находятся под статической и периодической циклической нагрузкой в течение 25 лет.

Обследовано, что нижний брус основной балки ослаблен значительными по величине и количеству трещинами, имеющими спиралевидный характер: до 700 мм длиной и до 20 мм шириной. Прогиб всей балки по верхней ее плоскости составляет по центру около 25 мм. Звон производится раскачиванием и ударами языка в оба или один край колокола под углом около 30° относительно основной балки. В процессе звона колокол совершает сложные маятниковые колебания и отклоняется в двух основных направлениях: параллельно основной балке и перпендикулярно относительно ее, то есть по осям север-юг и восток-запад. Перемещение колокола по двух указанным осям вызывается диагональным направлением ударов языка. При этом амплитуда смещения нижнего края колокола вдоль балки составляет 10–15 мм, в поперечном направлении — 30–40 мм. Увеличенное в 3–4 раза относительно продольного поперечное смещение колокола связано с жестким закреплением колокола по оси север-юг (три хомута, которые фиксируют колокол по оси основной балки), и с низкой жесткостью системы по оси восток-запад. Отсюда очевидно:

1. Упомянутые укосины и поперечины были добавлены в связи с необходимостью минимизировать раскачивание колокола в поперечном направлении и кручение балки по ее оси. Они явились удовлетворительными фиксаторами и демпферами поперечных колебаний колокола.
2. Характер растрескивания нижнего бруса основной несущей балки связан со значительными нагрузками на кручение. В настоящий момент нижняя балка работает как осевая пружина.
3. В нынешнем виде система гасит колебания колокола не вполне эффективно. По предварительной оценке, динамическая нагрузка при звоне составляет сейчас около 20–40% от статической⁷. Таким образом, несущие детали системы при звоне испытывают усилия, приблизительно равные весу 39–45 тонн.
4. Крутильные нагрузки для основной балки неблагоприятны априори, даже при учете самопроизвольной «подстройки» ее деталей под эту нагрузку (трещины на нижнем брус).
5. Решение вопроса минимизации поперечных колебаний колокола при звоне является приоритетным при укреплении или реконструкции подвесной системы колокола «Сысой».

Сейчас идут работы по реставрации звонницы⁸. Нам неизвестно, какое решение будет принято: сохранить старую систему балок или создать новую, из металла.

В первом случае надо иметь в виду:

- значительный износ деревянных балок;
- высокую вероятность того, что возникнет необходимость менять деревянные балки в ближайшее десятилетие;
- неотложную необходимость проведения обследования по соответствующим методикам деревянных элементов конструкции на запас прочности и износ для дальнейшего безопасного использования благовестника.

В случае же замены несущей балки на металлическую надо учитывать:

- жесткое закрепление на металлических балках без эффективных демпферов и виброизоляторов приведет к ускоренному износу звонницы и колокола, ухудшит звучание колокола;
- без фиксации поперечных смещений колокола (по оси восток-запад) при звоне система будет вести себя нестабильно, что может привести к драматическим последствиям;
- новая система должна быть тщательно рассчитана специалистами на жесткость, прочность и ресурс с учетом динамических нагрузок;
- было бы весьма правильно задействовать свободные парные уши колокола для закрепления на воссозданных в металле диагональных фиксаторах — в целях предотвращения поперечных смещений колокола.

В любом случае, в процессе работ необходимо обратить внимание на правильную установку языка по высоте.

Акустические работы отца Аристарха Израилева и звучание ростовских колоколов

В 1884 г. вышел труд «Ростовские колокола и звоны» протоиерея Аристарха Израилева — самобытного акустика. В работе автор привел результаты акустического опыта: данные замеров высоты тона каждого колокола из ансамбля. В том же году им был изготовлен набор из десяти камертонов, который ныне хранится в Белой палате Ростовского кремля. Они, по замыслу автора, должны были служить «охраной и поддержкой Ростовских соборных колоколов»⁹. Оба объекта представляют исключительный интерес, им было посвящено внимание как минимум трех групп исследователей: В. И. Зинченко, А. Ю. Антомошкина и А. Б. Никанорова в 1989 г.; В. Г. Шарикова, А. Б. Хадорича и А. В. Горкиной в 1999 г.; К. А. Мишуrowsкого в 2007 г. Мнения исследователей противоречивы, поэтому рассмотрим вопрос глубже.

Наряду со звукозаписью каждого колокола летом 2012 г. автором было зафиксировано и звучание камертонов. Звукозапись производилась на устройство Sony MD R-10 и микрофон Sony ECM MS 709. В процессе исследования мы попытались выяснить:

1. насколько точно камертоны соответствуют частотам, которые на них указаны, и может ли набор в должной степени служить заявленной автором цели;
2. что и как замерял отец Аристарх, фиксируя частоты ростовских колоколов.

Прежде всего было проверено соответствие частоты каждого камертона заявленному значению. Отклонения оказались несущественными — менее

0,4%, и в какой-то степени связаны, вероятно, с погрешностью эталонного камертона, по которому определялась частота настоящих. Далее последовала попытка сравнения частот камертонов, указанных изготовителем на основаниях-резонаторах, и частот, указанных в описании ростовских колоколов, сделанном в том же 1884 г. Сразу оговоримся, что из десяти камертонов, как это справедливо заметил К. А. Мишуrowsкий, не все имеют прямое отношение к тонам ростовских колоколов. Ссылаясь на таблицу, составленную производителем, можно увидеть, что из десяти номеров сам акустик соотносит только семь со звуками колоколов ансамбля. Остальные были включены в набор, по видимому, из принципа восполнения звукоряда до-мажорной гаммы.

При сравнении частот семи подписных камертонов и частот, указанных в описании колоколов отца Аристарха, очевидна разница. Выясняется, что он при создании набора удвоил частоту звучания трех больших благовестников (в целях удобства изготовления и прослушивания камертонов), назвав ее «верхней октавой», и подкорректировал на свой манер частоты: до математически правильных значений интервалов. Наиболее близкими к определенным им же самим частотам колоколов оказались экземпляры для «Сысоа», «Полиелейного», «Лебеда», «Безымянных» 1 и 2 (камертоны 1–3, 5, 6 соответственно). Разница составляет максимум 0,3%. Камертон 8, который идентифицирован автором, как звук «Зазвонного 1», имеет большее расхождение с найденными протоиереем значениями частоты тона для самого колокола: 3,2%. Полное совпадение видим между частотой экземпляра 10 и колокола «Ясак», что не удивительно: ведь его подбирал в нужную частоту сам отец Аристарх.

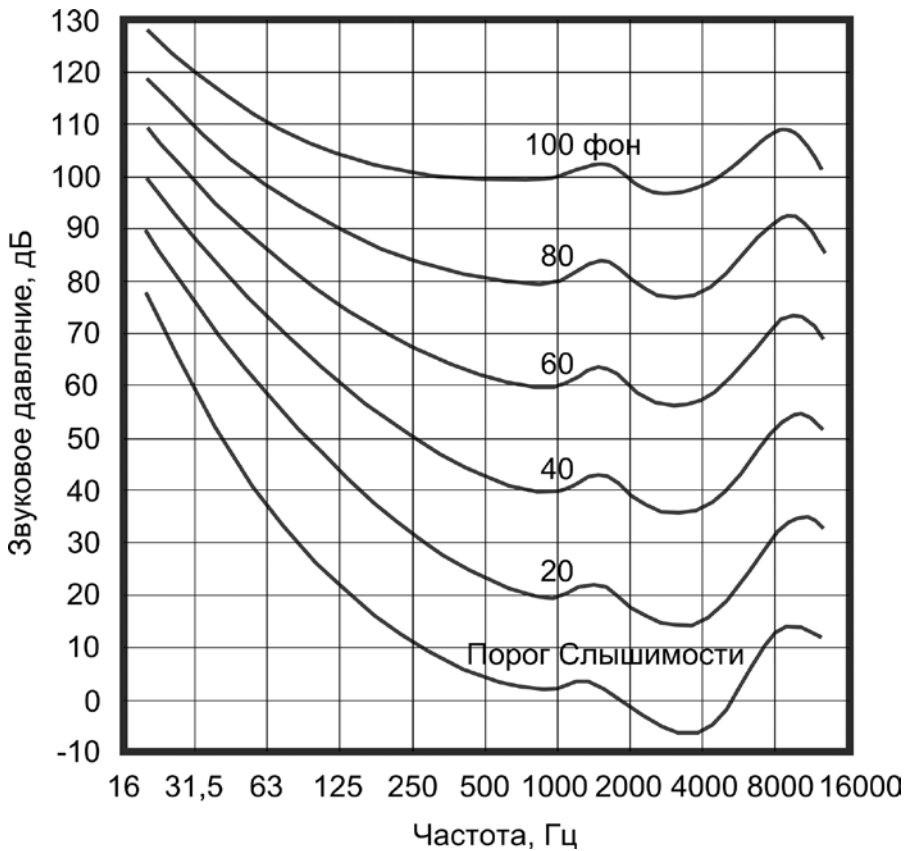
Сделаем вывод, что шесть из десяти камертонов набора, имея лишь незаметные на слух отклонения в частоте (не более 5 центов по высоте тона) могут служить вполне надежным памятником звучания тех частот в спектре соответствующих ростовских колоколов, которые зафиксировал отец Аристарх. Незначительная коррекция была необходима автору для совершенной, — без биений, — гармонии в аккордах исполняемых на камертонах звонов.

Высокая точность настройки камертонов заставляет отнести с доверием к методу, которым пользовался исследователь, и качеству проведенного эксперимента. Логично предположить, что значения высоты тона, приведенные в его описании колоколов, тоже точно соответствуют каким-то реальным частотам, зафиксированным отцом Аристархом в звучании колоколов на момент исследования. Отметим, что как частота изготавливаемых камертонов, так и частота тона ростовских колоколов определялась им по популярному методу биений, который широко использовали в XIX в. немецкие акустики¹⁰, с помощью набора точно калиброванных камертонов. Отцу Аристарху удалось еще и существенно усовершенствовать этот метод. И здесь главными становятся вопросы: почему почти все из 13 вычисленных в 1884 г. частот не могут быть найдены в современных звуковых спектрах колоколов ансамбля, и как вообще автор смог описать каждый колокол, звучание которого всегда сложный аккорд, одной нотой? Становится неясно, что вообще было зафиксировано:

субъективное ли впечатление акустика от звука колокола с приблизительной его высотой, или точный замер частоты унтертона, которая на нынешний момент серьезно изменилась?

Позволим себе сделать некоторое отступление. В звуке колокола различают наиболее сильные, образующие тембр частоты. Это всегда низшие три-пять и более частот. Традиционно в кампанологии называют первый низший обертон — унтертон, второй, приблизительно через октаву — фундаментальный тон, далее через терцию от последнего — малая терция, четвертая низшая частота — квинта к фундаментальному, затем пятый, выше приблизительно на октаву фундаментального, — номинальный тон. Еще выше различают большую дециму, дуодециму, двойную или верхнюю октаву. Такая последовательность периодических по высоте призвуков у классических колоколов бывает достаточно точна, чтобы у слушателя, в силу особенностей слуха, создалось ощущение основного тона звучания колокола. Поэтому в кампанологии сформулировано понятие «ударного тона», доминирующего в первые секунды звучания колокола. Этот тон может иметь реальную или мнимую, виртуальную природу — в зависимости от размера колокола и интенсивности основных частот¹¹. Наше ухо воспринимает звук колокола не таким, каким мы видим его на диаграмме звукового спектра. Мы различаем частоты от 20 до 20 000 Гц, но настроены главным образом на восприятие частот от 500 Гц до 5 000 Гц. Чувствительность слуха максимальна именно в данном диапазоне частот. Нижняя и верхняя часть всего частотного диапазона, воспринимаемого человеческим ухом, при одной и той же силе звуковой вибрации слышится гораздо слабее, чем частоты средней его части. Таким образом, из двух звуков одинаковой интенсивности частотой 100 Гц и 1 000 Гц, первый будет восприниматься в 3–4 раза тише. Звук частотой 100 Гц будет просто заглушен вторым, более высоким. Причем, контраст будет усиливаться с уменьшением силы звука. Значит, изучая спектрограмму звучания колокола, мы должны сперва адаптировать ее под наш слух. Сделав это, мы с удивлением обнаружим, что, например, высоту унтертона в звучании гигантских (от 500 пудов и более) колоколов в первые 10 секунд после удара едва ли можно оценить невооруженным ухом на фоне массы более громких призвуков. Разница по громкости между ним и номинальным тоном колокола в начале звучания составит около 2 раз (разница в интенсивности звука на 10 дБ соответствует разности по громкости в 2 раза).

Исходя из таких закономерностей, для больших колоколов (от 150 пудов и более) ударным чаще всего становится достаточно высокий и сильный номинальный тон. Причем, из-за нелинейности нашего слуха, мы будем слышать его на октаву ниже — там, где расположен фундаментальный тон. Последний, как правило, совсем заглушается первым. У колоколов среднего размера номинальный или фундаментальный тон может оказаться ударным, поскольку оба окажутся в основном слышимом диапазоне. У малых же колоколов, с частотой унтертона от 350 Гц, мы будем слышать либо унтертон, либо фундаментальный тон в качестве ударного. Понятие ударного тона, с некоторыми оговорками, актуально не только для западных, но и для классических русских колоколов.



Ил. 7. Кривые равной громкости. Зависимость громкости звука от его частоты и интенсивности

Их конструкция, формы низших собственных колебаний и спектральная картина имеют не так много отличий. По этой причине, слушая сегодня звук ростовских колоколов, любой внимательный исследователь с легкостью определяет в качестве доминирующего тона для «Сысоя» мягко заниженную до малой октавы¹², которая является слышимой на октаву ниже пятой частотой в 252 Гц.

Судя по всему, отца Аристарха Израилева, знакомого с опытом западных акустиков, интересовал в процессе экспериментов именно ударный тон. Для уточнения такого предположения пришлось повторить его опыт с привлечением компьютерных технологий. Не описывая здесь результатов, скажем, что, в зависимости от веса колокола, это оказался тон либо с частотой номинального тона, либо с частотой фундаментального. Алгоритм действий протоиерея вырисовался в ходе воспроизведения его измерений. Сперва на слух, по камертонам в октавном диапазоне, он определял приблизительную ноту звучания ударного тона колокола с погрешностью до 2 Гц, а затем определял точную частоту и октаву его. Хотя с оценкой октавы звучания он далеко не всегда был

точен, — указывал ударный тон в 2 раза ниже фактического, в октаве унтертона. Таковы были издержки выбранного метода измерений и, возможно, нетренированности музыкального слуха.

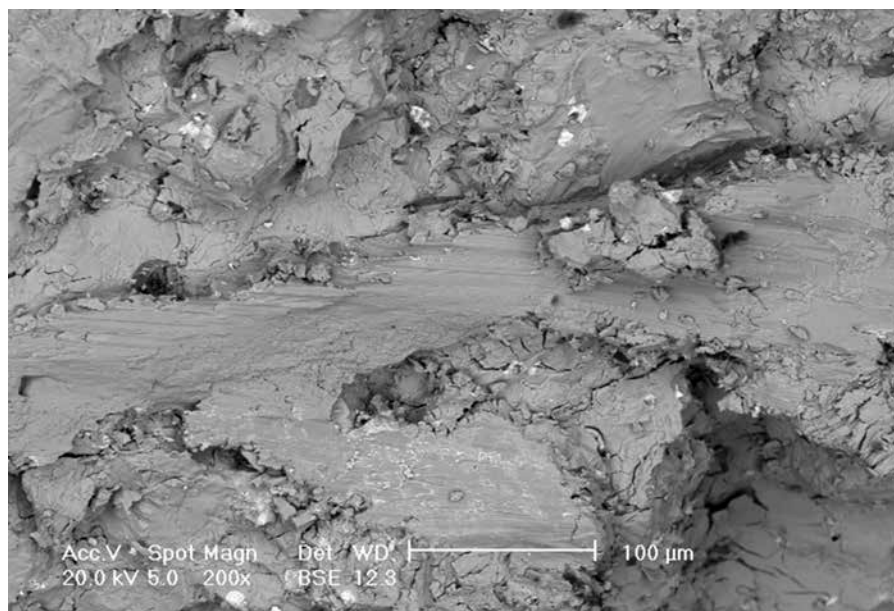
При анализе звука колоколов по методу отца Аристарха практически нигде, кроме «Красного», хорошего соответствия результатов не было получено. Для разных колоколов отклонения оказались различны, но подавляющее большинство значений 1884 г. лежат выше современной частоты ударного тона. Для объяснения такой закономерности надо сказать, что в ходе многолетнего использования колоколов происходят явления, которые накладывают свой отпечаток на их звучание. Прежде всего, это процессы старения металла и усталостного износа. Первый процесс для высокооловянистых бронз пока недостаточно изучен. Хотя, если принять во внимание данные по другим сплавам и технологию искусственного старения бронзы, можно сказать, какие структурные изменения происходят в металле. Происходит диффузия, которая приводит к изменению соотношения меди и олова в фазах. Кристаллы альфа-фазы, приближаясь к равновесному состоянию, теряют атомы олова, которые переходят в дельта-фазу эвтектики. Процесс сопровождается повышением твердости, хрупкости и модуля упругости сплава¹³. Трудно сказать, с какой скоростью он протекает в реальных погодных условиях. Судя по всему, если он и совершается, его скорость чрезвычайно низкая. Перемещения атомов олова, которые крупнее атомов меди, внутри кристаллической решетки едва ли возможны даже при температуре +40 °С. Представляется маловероятным с такой позиции мнение, что звук ростовских колоколов мог понизиться по причине разрыхления металла при старении. Модуль упругости, если и изменится, должен расти, а не падать.

К прямо противоположным результатам приводит другой процесс — усталостный износ металла. Он происходит только в условиях регулярной эксплуатации. С течением времени, от ударов языка по колоколу и многочисленных деформаций, вызванных этими ударами, в структуре металла зарождаются микротрещины. Они и снижают модуль упругости. Их последующее развитие завершается разрушением колокола. Так, в процессе звонов были выведены из строя колокола «Голодарь», «Козел» и «Безымянный 2». Весьма вероятно, что понижение частоты ударного тона, которое отмечается у целого ряда ростовских колоколов при сравнении замеров отца Аристарха с современными частотами, связано именно с усталостным износом металла. Изменения должны были одинаково затронуть всю частотную структуру звучания колокола, так как, теоретически, микротрещины появляются во всех частях конструкции колокола, которые подвергаются упругой деформации при ударе. Так что, скорее всего, структура звука колоколов не претерпела грубых искажений. Анализ отклонений ударного тона трех благовестников от состояния на 1884 г. позволяет вычислить среднее значение снижения модуля упругости. Оно составляет приблизительно 5% (около полутона по звуку). Не исключено, что в совокупности от момента литья разница может составить до 10% или около целого тона по высоте. Модуль упругости в таком случае мог упасть, к при-

меру, с отметки $1 \cdot 10^{11}$ Па до $0,9 \cdot 10^{11}$ Па. Подобное отклонение вовсе не кажется нереальным. Труднее объяснить в данном случае неравномерность изменений ударного тона различных колоколов ансамбля. С другой стороны, едва ли уместно говорить о катастрофическом снижении модуля упругости и высоты звучания ростовских колоколов, якобы имевшего место с момента литья.

Исследование образцов металла

В период работ на ростовской звоннице, среди прочих замеров и исследований, производился отбор фрагментов металла. Удалось получить образцы с колоколов Сысой, Полиелейный, Лебедь, Красный. Как правило, для забора использовались заусенцы на поверхности колоколов объемом около $20\text{--}30 \text{ мм}^3$, оставленные в процессе обработки колокола. Для получения более полной картины отбор велся сразу в нескольких частях колокола: в верхней части и в нижней части, с внутренней и внешней стороны. В случае с «Красным» колоколом был взят маленький фрагмент сплава, который отслоился в месте удара языка. Отбор фрагментов проводился в присутствии комиссии Ростовского музея. Несомненно, анализ металла, снятого с внешней поверхности колокола, предоставит не самые точные данные о сплаве в толще стенки колокола. Но в нашем случае альтернативы не было. Для достижения более объективных данных в ходе анализа образцы исследовались с внутренней части, которая граничила с телом колокола. Поверхность материала для исследования обрабатывалась методом соскоба, такой способ минимизировал инородные включения, полученные от инструмента. Анализ проводился лабораторно на растровом электронном микроскопе (РЭМ), оснащенный рентгеновским анализатором (РМА), с целью определить элементный состав сплава, включая примеси, а также получить микрофотографии участков излома для изучения кристаллической структуры. Состав рентгеновских спектров определялся по растру. Площадь для анализа выбиралась достаточно большой: 2 мм^2 — с целью получения более общей, характерной картины. Некоторые участки увеличивались и изучались отдельно, на площади 100 мкм^2 . К моменту составления доклада были получены лишь первые, предварительные результаты. Состав колоколов в разных точках оказался неоднороден, с содержанием олова от 15% до 23%. Наиболее интересным является тот факт, что в колоколах «Полиелейный», «Лебедь» и «Красный» найден в качестве 2–11% примеси свинец. Следует отметить, что в целом ряде русских колоколов XVII — XX вв. изготовления, автором при анализе были зафиксированы подобные же значения свинцовой составляющей. Это неслучайно. Об использовании литейщиками в колокольном сплаве легирующих добавок свинца и цинка упоминали некоторые ученые¹⁴. Есть другая гипотеза: свинец являлся примесью неочищенного олова, которую в прежние времена металлурги не умели отделять. Однако этот металл в достаточно большом проценте был найден автором и в русских колокольных отливках начала XX в., когда металлургия была уже на высоком



Ил. 8. Микрофотография фрагмента маточника колокола «Лебедь». Белые капельки – свинец. Состав: Cu – 71%, Sn – 21%, Pb – 4%, O – 4%

уровне. Кроме того, простейшие расчеты показывают, что 2–10% свинца в колокольной бронзе означают 10–30% свинца в исходном олове, что маловероятно. С позиции литейного дела, добавка легкоплавкого свинца позволяла достичь высокого качества литья из-за большей текучести расплава и низкой усадочной пористости¹⁵. Свинец практически нерастворим в меди, он не соединяется с другими химическими элементами сплава и, как стало видно на фотографиях образцов, локализуется в виде микроскопических капель в толще стенки. Вопрос о том, как влияет свинец на акустические свойства русского колокола, пока является открытым, это – предмет отдельного исследования.

Подводя итог, следует сказать, что колокола ростовской соборной звонницы заслуживают большего внимания в вопросах сохранения.

Прекрасно, что они продолжают жить, использоваться по назначению и своим пением наполнять сердца людей радостью и гармонией. Однако, сознавая уникальность ансамбля в национальных масштабах, необходимо бережно заботиться о сохранении каждого колокола. На данном этапе незамедлительного, деятельного внимания требует система закрепления колокола «Сысой»; несущая балка второго пролета звонницы; колокола «Красный», «Баран», «Зазвонный 2», «Козел».

Кроме того, проведенные работы позволяют теперь с высокой степенью приближения воссоздать поврежденный колокол «Безымянный 2», что необходимо для восстановления оригинального звучания ансамбля.

**

- ¹ Ожерелье из выпуклых полусфер малого диаметра, расположенное сверху или снизу орнамента.
- ² Вес первого «Голодаря», см.: Оловянишников Н. История колоколов и колоколотейное искусство. М., 1912. Изд. 2-е. С. 221.
- ³ Веса приведены по данным обследования В. Г. Шарикова и А. Б. Хадорича (1999).
- ⁴ Нумерация здесь и далее соответствует музейной, по убыванию веса.
- ⁵ Первый находится на колокольне московского Новодевичьего монастыря, второй — в экспозиции Московского государственного объединенного музея-заповедника «Коломенское».
- ⁶ См.: фото 1911 г. С. М. Прокудина-Горского: <http://Prokudin-Gorskiy.ru/image.php?ID=829>.
- ⁷ Для сравнения: в случае с установкой благовестников московского Данилова монастыря на особые подвесные устройства эти нагрузки были минимизированы до 5–7%.
- ⁸ Момент составления доклада: сентябрь–октябрь 2012 г.
- ⁹ Протоиерей Аристарх Израилев. Труды, публикации, исследования. Сб. М., 2001. С. 196.
- ¹⁰ См. Lehr A., Dr. The designing of swinging bells and carillon bells in the past and present. The Netherlands. Asten, Athanasius Kircher Foundation. 1987. § 2.1.
- ¹¹ См.: Terhardt E. <http://www.mmk.e-technik.tu-muenchen.de/persons/ter/top/strikenote.html>.
- ¹² Мишуровский К. А. Специфическое благозвучие колоколов большой ростовской соборной звонницы. // ИКРЗ. 2007. Ростов, 2008. С. 220.
- ¹³ См.: Ершов М. Ю., проф., Бурцев Д. С. Управление частотными характеристиками колоколов термической обработкой // Литейщик России. 2013. № 1. С. 29–30.
- ¹⁴ См.: Williams E. V. The Bells of Russia: History and Technology. Princeton, New Jersey: Princeton University Press, 1985. P. 102; Strafford K N, Newell R, Audy K, Audy J. Analysis of Bell Material from the Middle Ages to the Recent Time. Endeavour, Elsevier Science, 1996, 20 (1): 22–27.
- ¹⁵ Сучков Д. И. Медь и ее сплавы. М., 1966. С. 122–123.