

Научно-прикладная ценность набора из десяти камертонов отца Аристарха Израилева

Иногда доводится слышать некорректные слова в адрес замечательного российского акустика протоиерея Аристарха Израилева. Даже весьма уважаемые в современном русском колокольном мире люди считают своим долгом высказаться в адрес протоиерея такими эпитетами, как «дилетант», «слон в посудной лавке», говорят о том, что он принес «более вреда, чем пользы» отечественной campanологии. Ценность его работ по акустике подвергается сомнению и нападкам, рассматривается как «фантазия» современных ученых и журналистов. В этой связи было бы интересно оценить с точки зрения современной науки значение набора из десяти камертонов, которые отец Аристарх подарил Ростовскому музею в 1884 г.

Набор представляет собой десять стальных вилок-камертонов разного размера, закрепленных на деревянных коробках-резонаторах. Размеры их, как и издаваемый тон, зафиксированы и опубликованы автором с достаточно высокой точностью: до сотых долей дюйма и Герца соответственно (ил. 1). Набор повторял доминирующие частоты некоторых колоколов Успенского собора Ростова Великого и создавался по замыслу автора

— для служения «охраною и поддержкою Ростовских соборных колоколов»¹, то есть для фиксации их основных тонов;

— для камерного воспроизведения ростовских звонов.

¹ Протоиерей Аристарх Израилев (1817–1901). Труды. Публикации. Исследования. М., 2001. С. 196.

Камертоны выполнены и обработаны на высоком техническом уровне, на внутренней стороне каждого из них надписана частота, подобным образом и на деревянных ящиках имеется указанная нота и ее точная частота, а также приклеен ярлык с изображением полученных на выставках наград. Следует отметить, что награды, указанные на ярлыках, относятся к более ранним достижениям автора² — сохранившийся набор не являлся на момент создания ни первым, ни единственным. Указанные награды были получены не столько за сами камертоны, сколько за усовершенствованный метод их настройки и его исключительную точность. Обратим на это внимание. Камертоны и ящики 5 и 6 были перепутаны между собой в прежние годы. Неизвестный правдолюбец даже счел необходимым шариковой ручкой внести исправления в написании ноты на ярлыках резонаторов 5 и 6.

Сейчас трудно сказать точно, как создавались и как настраивались камертоны. Высокое качество изготовления вилок и резонаторов вызывает у некоторых исследователей впечатление заводской работы. С другой стороны, непонятно, как могли изготовить на заводе камертоны с нестандартными частотами, настраивая их с точностью до сотых долей Герца. Кроме того, сам метод исследования звука, предложенный отцом Аристархом, подразумевает регулярную процедуру настройки новых камертонов на конкретную частоту. Этот факт может означать, что протоиерей был не чужд навыков качественной обработки изделий из металла. Трудно также чем-либо иным, как не большим опытом слесарного дела объяснить изобретение им прибора и особого стенда для настройки новых камертонов в любую необходимую частоту (ил. 2), а также успешные опыты

№ камертонов.	Материал вилок, из которых по ноте изготовлены камертоны.	В. вилочки	Название ноты.	Данные в Английской единице дюймов.			Длина, ширина и высота вилок и шпунта резонаторного ящика, в котором удерживался камертон.		
				Высота вилок от центра.	Высота камертона от центра.	Число зубцов, число вилок, ширина вилок.	Длина.	Ширина.	Высота.
1	Стекло	бессовая.	C (до)	10,30	14,28	261	22,36	10,21	4,70
2	Полиэтилен	тоже.	E (ми)	8,75	12,64	325,25	17,63	8,10	3,99
3	Ледь	тоже.	F (фа)	8,08	11,38	391,50	14,94	7,21	3,60
4	—	тоже.	G (соль)	7,25	11	480,375	11,77	6,36	2,64
5	5-й большой.	сварганизован.	C (до)	7,25	10,93	522	11,19	5,10	2,37
6	6-й большой.	тоже.	D (ре)	6,68	10,26	587,25	10,06	4,57	2,18
7	—	тоже.	E (ми)	6,10	9,69	652,50	8,94	4,07	1,92
8	Звонили 2.	тоже.	F (фа)	4,72	6,70	733	7,47	3,45	1,74
9	—	тоже.	G (соль)	4,13	6,11	978,75	6,96	3,08	1,56
10	Язык	тоже.	C (до)	3,90	5,53	1044	5,64	2,80	1,34

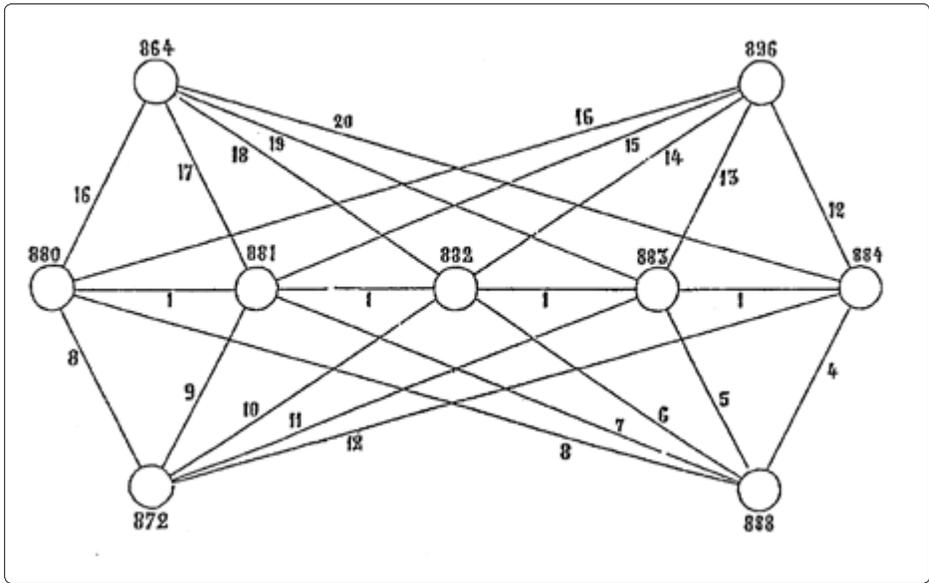
Ил. 1. Таблица изготовителя камертонов с их физическими данными

² Самая ранняя из них была получена еще на Московской политехнической выставке 1872 г!





Набор камертонов Аристарха Израилева в Белой палате Ростовского кремля



Ил. 2. Схема стэнда отца Аристарха для настройки камертонов в любую частоту

по настройке колоколов подточкой. Наконец, в протоколе заседания Русского Физико-Химического Общества от 29 ноября 1883 г. прямо сказано, что протоиерей представил коллекцию 56 камертонов, «изготовленную им самим»³. Возможно, он изготавливал требуемый камертон, уменьшая высоту заводской заготовки. Размеры в дюймах, приведенные в описании набора, наталкивают на мысль о западном происхождении таких камертонов-заготовок.

Теперь перейдем к описанию того прибора, которым отец Аристарх определял высоту исследуемого звука. Собственно, он усовершенствовал существующий метод определения частоты звучащего тела по биениям. Биения — циклические изменения амплитуды звука при добавлении другого звука, близкого по частоте. При наложении близких по частоте звуков возникает резонанс, то есть заметное усиление амплитуды, там, где фаза звучания частот совпадает, и значительное снижение амплитуды там, где фаза двух звуков противоположна (ил. 3). Количество биений в секунду, легко определяемое на слух, равно разности двух частот. Если хорошо известна добавленная частота и определена частота разностного тона, то легко получить искомую. Подобным образом западные акустики, имея наборы камертонов, определяли частоту с точностью до одного Герца. Отец Аристарх изобрел прибор, который позволял получить

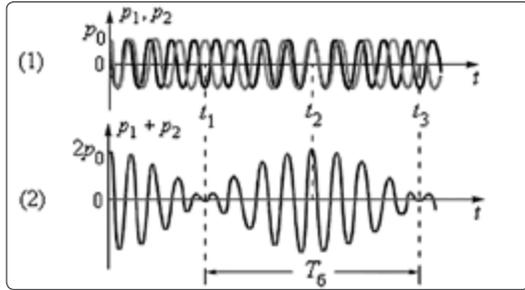
³ Цит. по: Протоиерей Аристарх Израилев. Труды ... С. 109.

результат на два порядка точнее! Такой результат с легкостью конкурирует с качеством современных измерителей.

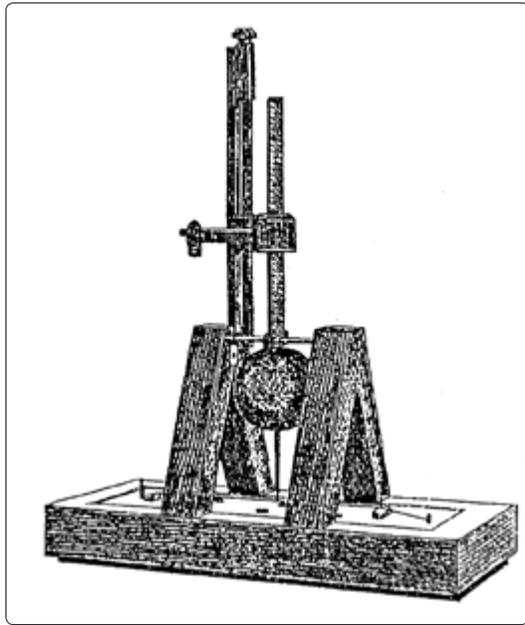
Он использовал набор из 56 камертонов, настроенных им самим в частоты от 220 Гц до 440 Гц с шагом в 4 Гц. Подбирая к тому или иному звуку наиболее близкие по частоте два камертона, нужно было выбрать тот из них, который имел разность с исследуемым звуком от 2 Гц до 4 Гц. Именно в этом диапазоне определение биений наиболее удобно на слух. Далее устанавливалось точное значение разности между тонами на приборе, который представлял собой подобие метронома (ил. 4). Маятник прибора ударял по нити с частотой, которая настраивалась по шкале, имеющей деления до сотых долей Герца. Частота ударов по нити выравнивалась с частотой биений изменением длины плеча до грузика-противовеса на оси маятника.

Затем путем вычитания или прибавлением полученного значения к частоте использованного камертона получали результат.

Чтобы оценить точность подобных измерений, был проведено сравнение указанных на камертонах частот с их реальным звучанием в настоящее время. Записанный с высоким разрешением звук их был проанализирован в программе SpectraPLUS. Приведенные в таблице 1 данные показывают, что погрешности в определении частоты при методе отца Аристарха составляют лишь сотые доли процента. Поэтому результаты его измерений заслуживают самого серьезного отношения.



Ил. 3. Образование акустических биений



Ил. 4. Прибор для измерения частоты звучащего тела отца Аристарха Израилева

Таблица 1. Сравнение надписанной частоты камертона с реальной (измерялась с разрешением до 0,04 Гц)

№ камертона	Частота, указанная на камертоне, Гц	Измерено по совр. звукозаписи, Гц	Отклонение, %
1	130,500	130,51	0,01
2	163,125	163,21	0,05
3	195,750	195,86	0,06
4	244,690	244,90	0,09
5	261,000	261,12	0,05
6	293,625	293,90	0,09
7	326,250	326,42	0,05
8	391,500	391,56	0,02
9	489,375	489,41	0,01
10	522,000	521,97	0,01

Следующим этапом было выполнено сравнение двух списков частот, с целью определить насколько набор камертонов соответствовал первой из заявленных изготовителем задач. Частоты всех подписанных названием колокола камертонов были сравнены с частотами, зафиксированными отцом Аристархом в 1884 г. Здесь выяснилось, что акустик при создании камертонов удвоил частоту звучания трех больших благовестников (вероятно, в целях удобства прослушивания камертонов), назвав ее «верхней октавой». Поэтому значения для первых трех благовестников при сравнении были нами транспонированы на октаву выше. По итогам анализа (таблица 2) можно сказать, что наибольшее отклонение в данном случае составило 14% (более одного тона по высоте) — для колокола «Зазвонный-2». Камертоны 1, 2, 3, 6, соответствующие колоколам «Сысой», «Полиелейный», «Лебедь», «Безымянный-2», имеют минимальные отклонения, от 0,1% до 0,3%. Камертон 5 («Безымянный-1») отличается от найденного протоиереем значения на 4%. Камертон 10 («Ясак») совершенно не имеет отклонений по частоте от оригинала, что неудивительно, так как Ясак подбирался отцом Аристархом в ансамбль лично. Отсюда видно, что шесть из семи подписанных камертонов достаточно хорошо соответствуют поставленной задаче фиксации высоты тона колоколов. Что, впрочем, не так уж много для набора из 13 колоколов. В то же время очевидно, что выявленные отклонения были до-

Таблица 2. Соответствие частот камертонов найденное о. Аристархом в 1884 г. частотам ростовских колоколов

№ камертона	Соответствующий колокол	Частота камертона, Гц	Частота, зафиксированная о. Аристархом в 1884 г., Гц	Отклонение частоты камертона от найденной 1884 г.,%
1	«Сысой»	130,500	65,46	0,3*
2	«Полиелейный»	163,125	81,64	0,1*
3	«Лебедь»	195,750	98,00	0,1*
5	«Безымянный-1»	261,000	251,00	4,0
6	«Безымянный-2»	293,625	294,00	0,1
8	«Зазвонный-2»	489,375	429,14	14,0
10	«Ясак»	522,000	522,00	0,0

* Частота камертона была транспонирована на октаву вниз

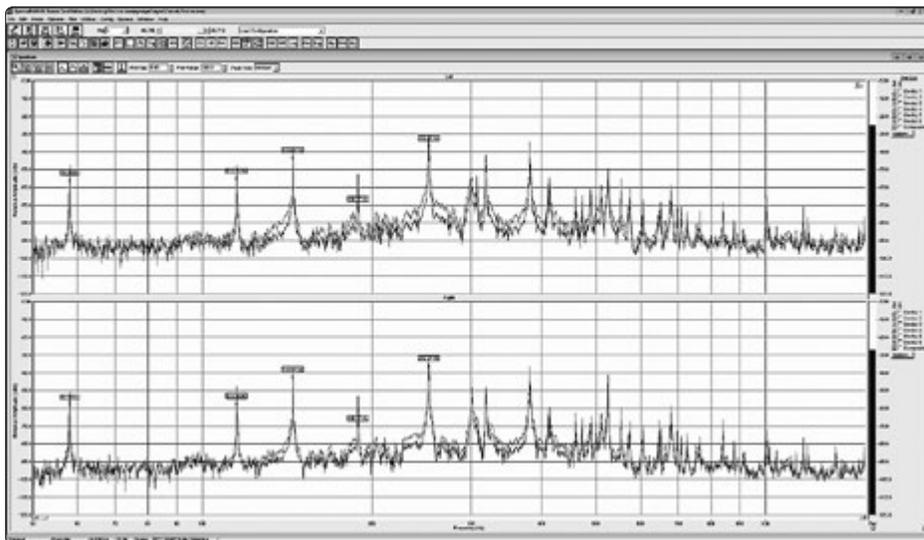
пущены изобретателем намеренно, чтобы набор камертонов идеально соответствовал второй поставленной задаче — использованию в качестве музыкального инструмента для проигрывания звонов. Выверенные до сотых долей Герца звуки в аккордах не давали биений, а значения интервалов получались математически точными. Так, по мнению автора, достигалась гармония звонов древних ростовских колоколов «во всем ее совершенстве»⁴. Очевидно, что он допустил отклонение от первой заявленной задачи в пользу второй, прикладной.

Теперь предстояло разобраться, как выявленные протоиереем на новом приборе частоты относятся к звукам одноименных ростовских колоколов. Звук колокола — сложное акустическое явление. Это целая атмосфера различных по громкости призывков (ил. 5). Какой из них был выделен отцом Аристархом в качестве основного? Чтобы ответить на этот вопрос, его эксперимент по измерению частоты основного тона ростовских колоколов был воспроизведен с применением компьютерных программ.

В рамках исследования на записанные с минимальным искажением звуки ростовских колоколов⁵ программным методом накладывался сгенерированный тон, соответствующий ближайшему из числа 56 к приведенному протоиереем

⁴ Протоиерей Аристарх Израилев. Труды... С. 196.

⁵ Записан в программе Spectra PLUS через внешнюю звуковую карту Roland Quad-Capture с частотой дискретизации 192 000 Гц и разрядностью 24 бита с использованием измерительного микрофона Earthworks SR 71.

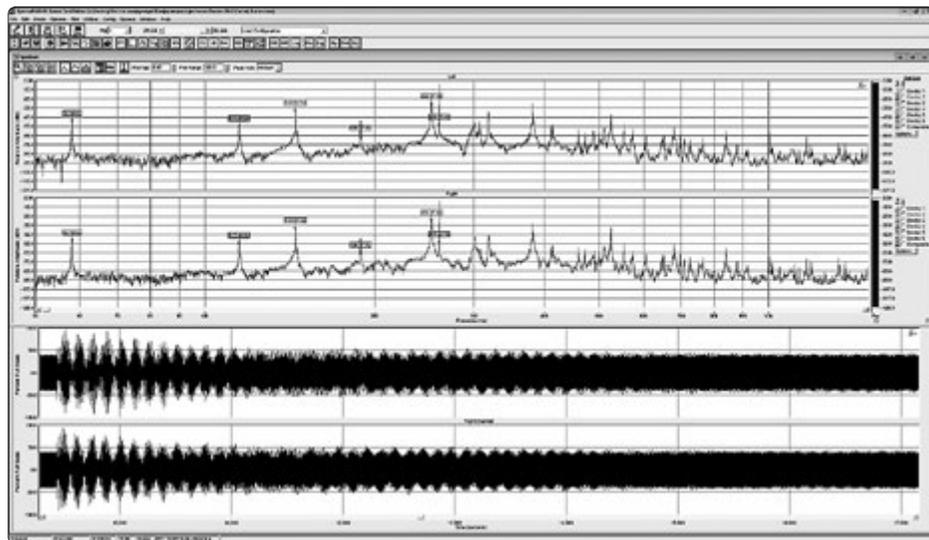


Ил. 5. Спектр звучания «Сыося». Выделены пики пяти низших, самых сильных частот

значению камертону⁶. При этом возникали слышимые на слух и отчетливо заметные визуально на кривой звукозаписи биения (ил. 6). Вычисление частоты велось с точностью до 0,5 Гц. В одном случае определение частоты биений было сильно затруднено. Так, не удалось измерить частоту колокола Ясак, поскольку его звук имел свои биения. Не проводилось также исследование звука колоколов «Козел», который был перелит в 1911 г., и колокола «Безымянный-2», который был выведен из строя в XX в.

Результаты эксперимента оказались весьма интересны, приведем их в таблице 3. Прежде всего, надо заметить, что далеко не все значения оказались близки к найденным в 1884 г. В некоторых случаях даже пришлось менять добавленную частоту, поскольку биения были весьма частыми, неудобными для оценки. Критически большая разница была получена между современным и старым значениями частоты тона «Безымянного-1» — около 27% (соответствует интервалу большой терции). Такое расхождение труднообъяснимо. Больше половины значений имеют условную разницу — от 0,1% до 0,5%. Четыре колокола стали звучать ниже на измеренной частоте в ощутимом на слух диапазоне — от 2% до 6% (разница в 6% по частоте соответствует интервалу малой секунды). При-

⁶ Значения для четырех больших колоколов до «Голодаря» включительно были транспонированы на две октавы вверх, а для двух следующих, — «Барана» и «Красного», — на октаву вверх. Только при этом условии полученные частоты попадали в рабочий диапазон прибора отца Аристарха (220–440 Гц).



Ил. 6. Биения в звуке «Сыся» при добавлении частоты 260 Гц.

мечательно, что все значения в этой группе принадлежат благовестникам XVII в., два из которых, кроме всего прочего, озвучиваются ударами языка в оба края, то есть испытывают большую нагрузку при звоне. Изменение высоты звучания колоколов, которое выявляется в нашем случае благодаря точным измерениям отца Аристарха, — это отдельная тема для исследований. Однако стоит сказать, что подобное понижение звука скорее всего связано с усталостным износом металла, при котором в течение продолжительного времени образуются и растут микротрещины, снижающие прочность и жесткость материала⁷. Благовестники чаще других колоколов используются для звона, поэтому изнашиваются быстрее, особенно в случае со свободными ударами языка в два края.

Затем была сделана попытка разобраться, какому частичному тону соответствует полученное значение частоты. Данные, полученные в ходе эксперимента, были соотнесены с соответствующими пиками на диаграмме акустического спектра ростовских колоколов. Четыре первых замера точно соответствовали октаве (или номинальному тону, пятая низшая частота колокола), два последующих (колокола «Баран» и «Красный») — приме (или фундаментальному тону, вторая низшая частота), остальные пять — унтертону (первая низшая частота).

⁷ В частности, от жесткости материала изделия зависит частота его собственных колебаний. Усталостный износ проявляется только под действием длительных циклических нагрузок, в нашем случае от ударов языка при звоне, и приводит в итоге к разрушению изделия путем растрескивания.

Таблица 3. Анализ полученных методом Израилева значений частот для современных ростовских колоколов

Колокол	Частота, зафиксированная в XIX в., Гц	Частота тона, по современной звукозаписи колокола, Гц ($\pm 0,5$ Гц)	Отклонение тона, %	Положение тона в структуре звука колокола
«Сысой»	65,460	252,5	- 3,7*	номинальный
«Полиелейный»	81,640	308,0	- 6,0*	номинальный
«Лебедь»	98,000	375,5	- 4,4*	номинальный
«Голодарь»	100,690	403,0	+ 0,1*	номинальный
«Баран»	154,280	302,0	- 2,2*	прима
«Красный»	184,625	370,0	+ 0,2*	прима
«Козел»	203,355	—	—	—
«Безымянный-1»	251,000	290,0	+ 26,9	унтертон
«Безымянный-2»	294,000	—	—	—
«Безымянный-3»	327,810	328,5	+ 0,2	унтертон
«Безымянный-4»	364,525	362,5	- 0,6	унтертон
«Зазвонный-1»	379,250	379,5	+ 0,1	унтертон
«Зазвонный-2»	429,140	428,0	- 0,3	унтертон
«Ясак»	522,000	определение затруднено	—	—

* частота, определенная о. Аристархом была октавно транспонирована в диапазон измерений его прибора

Стал вырисовываться алгоритм исследования протоиерея-акустика. Отец Аристарх сперва на слух, по камертонам, определял приблизительную ноту и октаву звучания ударного тона колокола с погрешностью в 2–4 Гц, а затем определял частоту его с точностью до сотых долей Герца с использованием своего прибора-метронома. Для «Ясака», судя по всему, ему пришлось изготавливать дополнительный камертон на октаву ниже одной из доминирующих частот колокольчика и делать замер уже по нему.

Самым слабым местом в рассматриваемом методе является определение на слух основного тона звучащего тела, что особенно критично для сложного звука русского колокола. Какой из обертонов выбирал отец Аристарх, подыс-

кивая нужный камертон? Ответом на этот вопрос может служить таблица 3. Западные исследователи утверждают, что ударный тон колокола как правило находится в области прима и всегда вдвое меньше номинального тона⁸. Этому утверждению полностью соответствует результат, полученный в рамках эксперимента для больших колоколов — их ударный тон находится в малой октаве и ровно вдвое ниже чем номинальный. По причине попадания той или иной октавной частоты в звук колокола в основной диапазон слышимых частот, доминирующим тоном для большинства русских колоколов разного размера будет либо частота на октаву ниже номинального тона, либо прима, либо унтертон. Данные таблицы наглядно это отражают. Любопытно, что ударный тон малых колоколов обозначился в той же октаве, что и для средних. Определение октавы ударного тона малых колоколов считается затруднительным и в западной campanологии⁹.

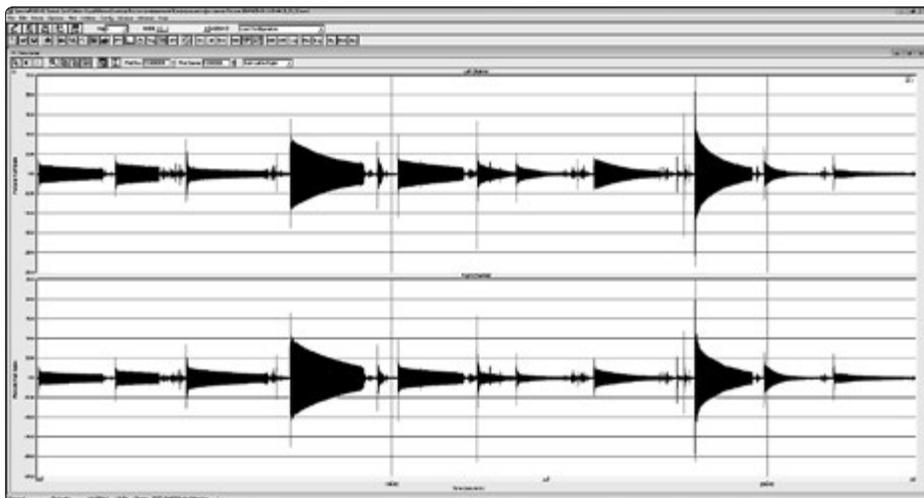
По статьям отца Аристарха заметно, что он недостаточно хорошо ориентируется в структуре колокольного звука, в классификации частичных тонов. Интересно отметить, что он указывает тон для больших колоколов в октаве унтертона, высоту которого на самом деле едва ли мог оценить¹⁰. Если взглянуть на список полученных им значений, то становится ясно, что на такой шаг его подтолкнула педантичная логическая необходимость привести в соответствие размер и основной тон колокола. Большему колоколу необходимо было сопоставить более низкий тон. О вольном отношении отца Аристарха к октаве, в которой фиксируется значение тона, пишет также профессор Уильямс¹¹. Одна из причин этого недостатка кроется в методе, которым пользовался исследователь. Его прибор позволял очень точно определить значение высоты звука в пределах октавы, однако в случае с анализом сложных звуков октаву, в которой находился измеряемый тон, определить можно было только субъективно, на слух. Сам автор описывает такую особенность, излагая правила пользования прибором. Для измерения звуков выше или ниже диапазона 56 камертонов он предлагает настраивать от-

⁸ См. например: *Lehr A., Dr. The designing of swinging bells and carillon bells in the past and present. The Netherlands. Asten, Athanasius Kircher Foundation. 1987. P. 23–24.*

⁹ *Fletcher N. H., Rossing T. D., The Physics of Musical Instruments. New York, NY, Springer Science+Business Media, Inc., Second Edition. P. 684.*

¹⁰ Унтертон низкой частоты в звуке большого колокола из-за физиологических особенностей нашего слуха заглушается более высокими обертонами и потому плохо различим в первые секунды после удара. Кроме того, человеческое ухо не способно точно определить высоту низких по частоте призвуков.

¹¹ Исследователь в двух местах пишет о занижении протоиереем на октаву основного тона в описании наборов малых колоколов, см.: *Williams E. V. The Bells of Russia: History and Technology. Princeton, New Jersey: Princeton University Press, 1985. P. 89 and P. 90.*



Ил. 7. График волновой функции последовательной звукозаписи набора 10 камертонов

дельный камертон на октаву ниже высокого звука, или «не изготавливать дополнительный камертон», а подыскать из набора 56 стандартных в случае с низким звуком¹². Похоже, выбранный акустиком метод измерения высоты звучания был ограниченно эффективен в случае с колоколами. Впрочем, на уровне кампанологических знаний того времени картина могла выглядеть иначе.

Набор камертонов любопытен еще одной особенностью: наличием резонаторных ящиков. Ко времени изготовления набора Гемгольцем уже была выведена формула для определения частоты акустического резонанса незамкнутого объема. В данном случае идет речь о простейшем четвертьволновом резонаторе, усиливающем первый частичный тон¹³. Похоже, отец Аристарх знает соответствующую зависимость, выведенную Гемгольцем, и пытается использовать ее: каждый камертон устанавливается на индивидуальном ящичке, «настроенном в унисон»¹⁴. Усиление звука также необходимо для второй цели создания набора — проигрывания звонов в зале. Однако он допускает какую-то ошибку в расчетах и не попадает в резонанс: камертоны звучат тихо. Чтобы проверить соответствие резонансных частот и низших частот камертонов, был проведен расчетный эксперимент. Для ящиков 1, 6, 10 были найдены резонансные частоты с использованием двух методов: аналитического, по формуле, и конечно-эле-

¹² Цит. по: Протоиерей Аристарх Израилев. Труды... С. 107.

¹³ Размеры его рассчитываются по формуле:, где f_p — частота колебаний, Гц; c_0 — скорость звука в воздухе, = 340 м/с; a — длина ящика, м.

¹⁴ Протоиерей Аристарх Израилев. Труды... С. 197.

Таблица 4. Расчет акустических резонаторов камертонов № 1, 6, 10

№ резонатора	длина, м	ширина, м	высота, м	Расчетная частота незамкнутого объема f , Гц		частота соответствующего камертона, Гц
				По формуле	Метод КЭ	
1	0,568	0,279	0,142	150	149	130,5
6	0,255	0,136	0,075	333	333	293,6
10	0,143	0,091	0,051	594	595	522,0

ментного моделирования в программе ANSYS. Результаты расчетов, приведенные в таблице 4, показывают, что значения частот для этих ящичков лежат выше целевых. Всего лишь два из десяти ящичков незначительно усиливают звук камертонов, это хорошо заметно на графике волновой функции звукозаписи поочередных ударов в камертоны (ил. 7).

Признаем, что использованный отцом Аристархом Израилевым метод настройки наборов камертонов, подобных сохраненному в Ростовском музее, являлся ценным научно-прикладным изобретением для европейской акустики своего времени. Сама же реликвия представляет из себя уникальный акустический памятник, фиксирующий ударные тоны целого ряда ростовских колоколов на 1880-е гг. Прибор отца Аристарха для измерения частоты позволил не только с высокой точностью настроить наборы камертонов, но и определить значения доминирующих тонов исторических ростовских колоколов. Однако несмотря на то, что изготовитель из двух заявленных сделал акцент на вторую, чисто прикладную задачу, на сегодня научная ценность сохраненной реликвии значительно выше, чем утилитарная.

В завершение скажем, что как самобытный акустик отец Аристарх не заслуживает возводимых на него обвинений. Он явился первопроходцем в исследовании русских колоколов научными методами. До него и после в царской России никто не ставил на профессиональном уровне эксперименты по оценке точной частоты ударного тона русского колокола. Поэтому некоторыми недочетами метода здесь можно пренебречь. Спорными же можно считать лишь ряд нетрадиционных идей протоиерея на предмет развития колокольного и звонарского дела в России.