TRIAURAL

ДЕФИНИЦИОННЫЙ ДОКУМЕНТ

И МЕТОДИЧЕСКАЯ ОСНОВА ИССЛЕДОВАНИЯ

УЗЕЛ - N1

Определение триаурального акустического резонатора, таксономия, киматика, безопасность и этика

Расширенный план исследований и технические требования к рабочему пространству

Анализ финансирования как открытая возможность

www.triaural.com | TRIAURAL - 2026 | info@triaural.com

03.09.2026

ПРЕДИСЛОВИЕ

Проект TRIAURAL возник из простого вопроса, который неожиданно открыл широкие горизонты для дальнейших исследований. Что изменится, если известный двухплечевой камертон расширить за счет третьего плеча, а его геометрия приобретет пространственную симметрию? Иногда достаточно небольшого изменения формы, чтобы привычный объект стал предметом нового научного исследования.

Из этого размышления постепенно вырос предмет неформальных бесед с языковыми моделями искусственного интеллекта (ИИ) на стыке механики, акустики, геометрии, материаловедения и структуры волнового поля. Эта работа отражает состояние, в котором первоначальная идея превращается в точно определённую исследовательскую задачу.

Предыдущие диалоги и документы с вопросами составляют исследовательский этап проекта. Их задачей было составить карту возможных направлений, взаимосвязей и границ темы без претензий на экспериментальное подтверждение. Исследовательские программы N1–N3 развивают эту эксплоративную часть, используя иной подход: гипотезы, методы, измеримые величины и критерии опровержения сформулированы таким образом, чтобы их можно было проверить независимо. Исследовательская работа сохраняется в качестве записи о возникновении вопросов; статус исследования впоследствии зависит от методологического и экспериментального подхода, определённого в этих программах.

Этот документ был создан вне академической среды. За ним не стоят ни учреждения, ни кафедры, ни гранты, и на момент его публикации не было ни одного систематического измерения, на которое он мог бы опираться. Тем более он делает акцент на чётком определении предмета, единой терминологии, различении степени значимости утверждений и формулировке вопросов таким образом, чтобы они поддавались экспериментальной проверке.

Поэтому в тексте четко разделены подтвержденные знания, наблюдения, гипотезы и видения. Решающие утверждения связаны с измеримыми величинами, а гипотезы — с условиями, при которых будет возможна качественная оценка.

N1 является первой методологической основой трехчастного исследовательского сборника. Он призван создать общую основу для дальнейших измерений, моделирования, независимой проверки и открытого обсуждения.

Следующие страницы представляют собой карту вопросов, ожидающих экспериментального ответа.

- TRIAURAL -

СОДЕРЖАНИЕ

01 АННОТАЦИЯ И СТАТУС ДОКУМЕНТА 9
1.1 Цель документа 9
1.2 Место в серии из двенадцати документов 9
1.3 Эпистемический регистр и маркировка 10
1.4 Предварительно зарегистрированные и эксплоративные результаты 11
1.5 Чего не утверждает документ 12
02 ВОЗНИКНОВЕНИЕ ТЕРМИНА «ТРИАУРАЛ» 14
2.1 Двухплечевой камертон и почему он стал стандартом 16
2.2 Что даёт третье плечо 16
2.3 Что говорит литература о смежных темах 17
2.4 Чего не хватает в литературе 19
2.5 Протокол литературного поиска 19
2.6 Происхождение и значение термина 25
2.7 Почему документ публикуется открыто 26
03 ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИСТЕМЫ 27
3.1 ТРИАУРАЛЬНЫЙ РЕЗОНАТОР — монолитный элемент 27
3.2 FORKER — электромагнитный вибрационный возбудитель 28
3.3 EMT — электромагнитный триауральный преобразователь 29
3.4 Фокальная область и её теоретическое определение 31
3.5 Что входит в систему, а что нет 31
04 ШКАЛА СЛОЖНОСТИ L0 — L7 32
4.1 Принцип шкалы 32
4.2 Обзор уровней 32
4.3 Акустическая ветвь: от L0 до L5 43
4.4 Электромагнитная и гибридная ветви: L6 и L7 34
4.5 L2 по сравнению с L3 — ключевая проверка 34
4.6 Почему соблюдается порядок 35
05 КЛАССИФИКАЦИЯ ОБОРУДОВАНИЯ 37
5.1 Акустические монолитные резонаторы 37
5.2 Многополярные электромагнитные устройства 37
5.3 Гибридные устройства 37
06 ГЕОМЕТРИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ 38
6.1 Что определяет конфигурацию 38
6.2 Взаимосвязь между вершинным углом несущих плеч и наклоном к оси 39

6.3 Шесть базовых конфигураций 40
6.4 Зеркальные конфигурации и осевая полярность 43
6.5 Ориентация главных радиальных излучателей 44
6.6 Конфигурации с большим количеством плеч 45
6.7 Артикулярные варианты 45
6.8 Допуски на геометрию 46
6.9 Открытость таксономии 46
07 НОРМАТИВНАЯ ТЕРМИНОЛОГИЯ 48
7.1 Типы полей 48
08 ОПРЕДЕЛЕНИЕ УГЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ 53
09 ФИЗИЧЕСКАЯ ОСНОВА 56
9.1 Отправная точка: как работает двухплечевой камертон 56
9.2 Что изменится при трёх плечах 56
9.3 Почему может возникнуть вращение 57
9.4 Условие, на котором всё это держится 59
9.5 Фазовая циркуляция и акустическое течение 60
9.6 Измерение момента импульса 62
9.7 Масштаб и вытекающие из него следствия 65
9.8 Состояние техники: как сегодня создаются акустические вихри 66
9.9 Двухчастотное возбуждение и динамика разностной частоты 68
9.10 Имеющиеся на данный момент наблюдения 69
9.11 Связь с другими областями 72
9.12 Масштабная ветвь: переход в ультразвуковой диапазон 74
10 КИМАТИКА И АКУСТИЧЕСКАЯ ГОЛОГРАММА — ПОЛЕ, КОТОРОЕ МОЖНО УВИДЕТЬ И УСЛЫШАТЬ 79
10.1 От изображения к методу 79
10.2 Что отображает узор 80
10.3 Количественная оценка узора 81
10.4 Контрольные измерения и артефакты 82
10.5 Лазерная локализация узловой сетки 83
10.6 Положение амплитудного минимума 83
10.7 Связь с коэффициентом качества 84
10.8 Слепой классификационный тест 84
10.9 Визуализация в объеме 85
10.10 Возможные механизмы 86
10.11 Тест на различение по частоте 86
10.12 Контрольные измерения объемной визуализации 87
10.13 Трассирующая среда и регистрация 87

10.14 Количественная оценка 87
10.15 Масштабирование камеры 89
10.16 Акустическая голограмма — поле, которое можно услышать 89
10.17 Что говорит об этой структуре акустика 90
10.18 Слоистая структура 90
10.19 Измерительная установка 91
10.20 Проверки 92
10.21 Восприятие положения источника 93
10.22 Передача звука через конструкции 93
10.23 Независимость от монолита 94
11 ВОДА И ЖИДКИЕ СРЕДЫ 95
11.1 Почему вода 95
11.2 Исходное наблюдение и его статус 95
11.3 Волна Фарадея 97
11.4 Ротационный тест 97
11.5 Осаждение как запись поля 98
11.6 Измеримые величины воды 98
11.7 Сенсорная оценка 100
11.8 Кристаллизация в поле 100
11.9 Тепловая мощность, подаваемая в образец 101
11.10 Режим воздействия 102
11.11 Терминологические определения 102
12 СИНТЕЗ ПОЛЯ С ПОМОЩЬЮ МНОГОИСТОЧНИКОВОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ 103
12.1 Вопрос, рассматриваемый в данной главе 103
12.2 Треугольная конфигурация 103
12.3 Показатель совпадения 105
12.4 Что ещё даёт синтез 106
12.5 Пространственные конфигурации 106
12.6 AURISONIC 107
12.7 Минимальное количество источников 108
12.8 Фазовое управление как общий инструмент 108
12.9 Точность фазы и её пределы 109
13 БЕСКОНТАКТНОЕ ВОЗБУЖДЕНИЕ И СЧИТЫВАНИЕ 110
13.1 Почему удара молотком недостаточно 110
13.2 Электростатическое возбуждение 110
13.3 Магнитострикционное возбуждение 111
13.4 Трёхканальное магнитное считывание 111

13.5 Возбуждение одного плеча 114
13.6 Способы намагничивания 115
13.7 Настройка частоты с помощью магнитного поля 116
13.8 Влияние намагниченности на затухание 116
13.9 Контроль магнитной нагрузки и модального расщепления 116
13.10 Симпатическая связь двух резонаторов 117
13.11 Измеряемые величины связи 118
13.12 Взаимность — геометрия в качестве приемника 118
14 РУЧКА КАК ВОЛНОВОД 120
14.1 Почему отдельная глава 120
14.2 Семейства волн в твердом стержне 120
14.3 Симметрия и селекция мод 121
14.4 Стоячая волна вдоль рукоятки 121
14.5 Поток энергии и вращательная механическая составляющая 122
14.6 Измерения на поверхности 123
14.7 Взгляд внутрь 123
14.8 Геометрия рукоятки как параметр 124
14.9 Спиральная и рифлёная рукоятка 125
14.10 Самоподобные профили 125
14.11 Передача в руку 126
14.12 Наиболее эффективный захват 126
14.13 Безопасность при удержании 127
15 МАТЕРИАЛЬНАЯ ОСНОВА 128
15.1 Какие требования предъявляются к материалу 128
15.2 Базовый набор 128
15.3 Магнитострикционные материалы 130
15.4 Контрольная пара нержавеющих сталей 131
15.5 Тетраэдрическая топология как производственная гипотеза 132
15.6 Сравнение топологий на одном полуфабрикате 132
15.7 Влияние производства на материал 133
15.8 Серия образцов 133
15.9 Ориентация кристалла как параметр геометрии 135
16 МАТЕМАТИЧЕСКИЕ СВЯЗИ 138
16.1 Задачи модели 138
16.2 Изгибные колебания плеча 138
16.3 Почему простого соотношения недостаточно 139
16.4 Влияние других размеров 139

16.5 Температурная зависимость 140
16.6 Расщепление вырожденной пары 141
16.7 Масштабирование 141
16.8 TRIAURAL Calculator 142
17 РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ И ЕЕ ВАЛИДАЦИЯ 145
17.1 Значение данной главы 145
17.2 Модальный анализ 146
17.3 Гармонический анализ 146
17.4 Анализ чувствительности 147
17.5 Акустическое поле в окрестностях 148
17.6 Известные ограничения модели 148
17.7 Инструменты и открытость 149
17.8 Статья бюджета 149
17.9 Вычислительная инфраструктура 150
18 БЕЗОПАСНОСТЬ, ДОЗИМЕТРИЯ И ЭТИКА 153
18.1 Почему безопасность предшествует применению 153
18.2 Утверждение об эффекте — это одновременно утверждение о риске 153
18.3 Три пути воздействия 154
19 ОБОРУДОВАНИЕ И ОЦЕНОЧНЫЕ ЗАТРАТЫ 165
19.1 Как составлен бюджет 165
19.2 Объем оснащения 165
19.3 Категории оборудования 166
19.4 Связь с другими узлами 173
19.5 Резервы 174
19.6 Статьи расходов, которые легко недооценить 175
19.7 Эксплуатационные расходы 176
19.8 Что не входит в бюджет 178
20 ПРОЕКТ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ ЛАБОРАТОРИИ 180
20.1 Что должна обеспечивать исследовательская лаборатория 180
20.2 Акустически обработанное помещение 180
20.3 Измерительная станция 181
20.4 Оптическая и жидкостная установка 181
20.5 Зона высокого напряжения и магнитов 182
20.6 Образцы и их учет 182
20.7 Инфраструктура данных 183
20.8 Контролируемая установка для воздействия на человека 183
20.9 Условия эксплуатации 184

20.10 Этапы строительства ... 185
21 ГРАФИК РАБОТ ... 187
21.1 Как составлен план ... 187
21.2 Этап F0 — подготовка ... 187
21.3 Этап F1 — первичная валидация ... 188
21.4 Этап F2 — систематизация ... 189
21.5 Промежуточные результаты ... 189
21.6 Порядок первых измерений ... 190
21.7 Что может изменить план ... 190
21.8 Связь графика с бюджетом и независимость финансирования ... 191
22 ГИПОТЕЗЫ ... 194
22.1 Два вида вопросов ... 194
22.2 Свод гипотез ... 194
22.3 Открытые вопросы ... 199
22.4 Примечания к отдельным вопросам ... 200
Q-N1-02 Развитие и стабильность образа ... 200
Q-N1-03 Независимость от материала и частоты ... 200
Q-N1-06 Пульсация звука ... 201
22.5 Условные гипотезы ... 201
22.6 Что остается ценным независимо от результата ... 202
23 АНАЛИЗ ФИНАНСИРОВАНИЯ И ОТКРЫТАЯ ВОЗМОЖНОСТЬ ... 204
23.1 О чем эта глава ... 204
23.2 Принцип, на котором основана программа ... 204
23.3 Объем работ и его составление ... 204
23.4 Что входит в бюджет ... 206
23.5 Резервы и неиспользованные средства ... 206
23.6 Что даст программа ... 207
23.7 Открытость и её последствия ... 207
23.8 Форма финансирования ... 208
23.9 Условия, устанавливаемые самим проектом ... 209
24 РЕЗЮМЕ И ОТКРЫТОЕ ПРИГЛАШЕНИЕ ... 211
24.1 Что устанавливает документ ... 211
24.2 Что не утверждается в документе ... 211
24.3 Что остаётся открытым ... 212
24.4 Как можно использовать документ ... 212
24.5 Открытое приглашение ... 213
24.6 Место в серии из двенадцати документов ... 213

Р ПРИЛОЖЕНИЯ И ИСТОЧНИКИ 214
Р1 Сопоставление с внутренней библиотекой узлов 214
Р2 Список рисунков и таблиц 214
Р3 Использованная литература 216
Р4 Неиспользуемые термины 222
Р5 Протокол литературного поиска — таблица запросов 223
Р6 История версий 229

01 АННОТАЦИЯ И СТАТУС ДОКУМЕНТА

В этой главе рассказывается, для чего был создан документ, кому он предназначен и чего от него можно ожидать. Прочитав эту главу, читатель должен точно понимать, где заканчивается то, что уже определено, и где начинается то, о чём пока только размышляют.

1.1 Цель документа

Цель данного документа — заложить прочную определительную основу для триауральных резонаторов, то есть обозначить, что именно исследуется, какими терминами это описывается и какими величинами измеряется.

Документ не является заявкой на грант, хотя и содержит анализ бюджета. Он также не является презентацией готовых результатов, поскольку пока не существует никаких систематических измерений. Это основа, на которую может опираться любой, кто хочет продолжить работу в этой области — в том числе тот, кто не имеет никакого отношения к команде TRIAURAL и хочет независимо проверить наши предположения.

Поэтому успехом этого документа мы считаем не то, что он кого-то убедит. Мы считаем успехом то, что после его прочтения человек сможет точно сказать, какой эксперимент решил бы весь вопрос — и каким должен быть его результат, чтобы мы оказались неправы.

Из этого вытекают три практических задачи:

- Унифицировать терминологию, чтобы две независимые команды говорили об одном и том же объекте одними и теми же словами.
- Разделять утверждения в зависимости от степени их обоснованности и явно обозначать это разделение во всём тексте.
- Сформулировать вопросы так, чтобы на каждый из них существовал ответ в виде измеримого числа.

1.2 Место в серии из двенадцати документов

Документ с обозначением N1 является десятым документом публикационного цикла. Первые девять документов фиксируют вопросы, задаваемые моделью ИИ, и ответы на них; они составляют эксплоративный слой публикационного цикла и должны восприниматься именно как таковые. Документы с десятого по двенадцатый (N1–N3) составляют формальную исследовательскую линию проекта и являются выражением позиции команды TRIAURAL.

Отдельные части комплекса обозначаются как узлы. Узел — это замкнутый исследовательский комплекс со своим предметом, бюджетом и документом; данный документ описывает узел N1.

В данном документе термин «проект» обозначает общую исследовательскую структуру TRIAURAL. Отдельные узлы N1, N2 и N3 в организационном, реализационном и финансовом контексте обозначаются как исследовательские программы. Таким образом, проект TRIAURAL состоит из исследовательских программ N1, N2 и N3.

N1 занимает в этой тройке нормативное положение. Это означает, что терминология и угловые параметры определяются исключительно в данном тексте и не переопределяются ни в документе N2, ни в документе N3 — при необходимости даются ссылки на эти документы. Если в будущем какое-либо из определений изменится, оно будет изменено в одном месте.

Документ N2 посвящён электромагнитным излучателям, N3 — мультирезонансной камере AURIS и вопросам нервной системы. Степень спекулятивности в этой тройке возрастает; степень достоверности данных снижается. Поэтому описательный документ N1 намеренно является самым сдержанным из трёх.

1.3 Эпистемический регистр и маркировка

Чтобы из каждого предложения было ясно, какой у него вес, каждое существенное утверждение помечено одним из четырёх знаков:

D) <u>ДОКУМЕНТИРОВАНО (DOCUMENTED)</u>

Измеренное, зарегистрированное или опубликованное. Указываются метод, прибор и условия измерения, а также, при необходимости, ссылка на литературу. Если эти данные отсутствуют, утверждение не получает метку [D], даже если оно верно.

H) <u>ГИПОТЕЗА (HYPOTHESIS)</u>

Фальсифицируемое утверждение. Должно содержать проверяемый критерий, предсказание и — что наиболее важно — критерий опровержения. То есть предложение, в котором говорится, что должно быть измерено, чтобы гипотеза была опровергнута.

V) <u>ВИЗИЯ (VISION)</u>

Утверждение, выходящее за рамки текущей проверяемости. Оно излагается открыто и без оправданий. Видение не является более слабой гипотезой — это отдельная категория, и в тексте оно не смешивается с гипотезой.

O) НАБЛЮДЕНИЕ (OBSERVATION)

Явление, которое наблюдалось неоднократно, но без фиксации условий, без контрольных измерений или без повторения в сопоставимых условиях. Не приводится в качестве результата и не служит основанием для утверждения. Указывается потому, что привело к формулировке вопроса.

Реестр и тип записи — это две разные вещи. Реестры [D], [O], [H] и [V] указывают, какой вес имеет утверждение. Тип позиции указывает, какой тип вопроса задается: гипотеза, обозначенная как H-N1-xx, задает вопрос о том, верно ли что-либо, а открытый вопрос, обозначенный как Q-N1-xx, задает вопрос о том, как или почему. Подробности приведены в главе N1/22.1.

В данном издании обозначение [D] относится исключительно к доказательству из внешнего источника, то есть из рецензируемой работы, патента или стандарта. Собственных измерений пока не существует; когда они появятся, они будут обозначены отдельно, чтобы можно было различить происхождение доказательства без дополнительного поиска.

Такое разделение — инструмент, позволяющий формулировать смелые идеи более четко, чем это было бы возможно иначе. Видение, обозначенное как «видение», не является результатом.

Гипотезы нумеруются последовательно в формате H-N1-01, и однажды присвоенный номер никогда не меняется. Для каждой из них указывается статус (открытая, тестируемая, подтверждённая, опровергнутая, скорректированная, не подкреплённая) и этап исследования, к которому она относится. Перекрёстные ссылки между главами имеют вид N1/07, либо N1/07.3 для подглавы.

1.4 Предварительно зарегистрированные и эксплоративные результаты

Каждое открытие относится к одному из двух классов и должно быть обозначено как таковое.

- Предварительно зарегистрированный результат получен в ходе измерения, заранее предусмотренного протоколом. Её результат нельзя переформулировать задним числом в зависимости от того, каким он оказался.
- Эксплоративный результат — это всё остальное, что выявляется в ходе измерения. Он является полностью легитимным и должен быть зафиксирован; единственное условие заключается в том, что он не указывается в качестве подтверждения гипотезы.

Ранжирование гипотез по важности

В документе содержится более шестидесяти гипотез, и без их упорядочивания они не могут быть использованы. Поэтому каждая из них относится к одной из четырёх групп.

- Решающая. Её результат определяет, будет ли программа продолжать работу в данной ветви. Таких гипотез несколько, и они перечислены ниже.

- Производная. Тестирует механизм или параметр в рамках ветви, открытой гипотезой принятия решения.
- Условная. Активируется только после выполнения предыдущего условия и до этого момента не измеряется.
- Эксплоративная. Легитимное измерение без заранее зарегистрированного критерия; её результат не указывается в качестве подтверждения гипотезы в соответствии с главой N1/01.4.

В данном документе представлено четыре гипотезы принятия решений. Они касаются того, имеет ли трёхлучевое тело пару собственных колебаний, которой не может иметь двухлучевое; можно ли отличить его звуковое поле от поля, образованного тремя отдельными источниками; какова природа вращательной составляющей этого поля; и возникает ли вращательное состояние из самой геометрии тела или его необходимо навязать посредством возбуждения. Они введены в главах N1/09 и N1/12 и обозначены в тексте.

Минимальные требования к предварительной регистрации

При формулировке гипотезы перед измерением записываются пять данных: первичная измеряемая величина, критерий подтверждения, критерий опровержения, количество повторений и правила исключения измерений из серии. Критерий опровержения указывается всегда; гипотеза, которую невозможно опровергнуть, не является гипотезой.

Если в рамках одной гипотезы оценивается сразу несколько величин, это указывается заранее вместе с тем, как будет решаться проблема множественного тестирования. Без этого можно было бы подтвердить любую гипотезу, измерив достаточное количество величин.

Запись версионируется и прилагается к опубликованным данным. В случае производных, условных и эксплоративных гипотез это минимальное требование не предъявляется.

Причина включения этого положения носит исторический и поучительный характер. Сонолюминесценцию — появление световых вспышек в жидкости при акустическом возбуждении — открыли в 1934 году Френцель и Шультес, когда, работая над сонаром, они заметили, что в емкости у них запотевают фотопластинки. Они не искали света и не имели гипотезы о его возникновении. Протокол, не предусматривающий места для аномалий, отклонил бы такую находку как артефакт.

1.5 Чего не утверждает документ

Мы считаем необходимым указать, что отрицательное определение не менее важно, чем положительное, поэтому оно стоит в самом начале, а не в конце.

- Документ не утверждает, что триауральный резонатор обладает лечебными свойствами. Он не содержит никаких заявлений о пользе для здоровья и не является основанием для использования в качестве медицинского приспособления.
- Документ не утверждает, что существование вращательного поля было доказано. В нём объясняется, почему предполагается его существование и с помощью каких измерений его можно подтвердить или опровергнуть.
- В документе не утверждается, что геометрия резонатора несет символическое или внефизическое значение. Используемые углы 60°, 90°, 109,47° и 120° в данном тексте являются геометрическими параметрами, не более того.
- В документе не используются понятия, не имеющие измеримого определения. Их перечень и причины исключения приведены в приложении P4.

Документ не содержит подробных протоколов измерений с описанием этапов, приборов и форм записи. Протоколы составляются по мере проведения измерений и публикуются как часть их результатов. Методические требования, предъявляемые к ним в настоящем документе, приведены в соответствующих главах.

02 ВОЗНИКНОВЕНИЕ ТЕРМИНА «ТРИАУРАЛ»

Откуда взялась эта идея и зачем вообще исследовать камертон с тремя плечами, если два работают надежно уже более трехсот лет? В этой главе также обозначено то, что является самым необычным во всем проекте: речь идет не о новом взгляде на известный объект, а об объекте, который не имеет систематического освещения в специализированной литературе.

Термин «TRIAURAL» возник 02.02.2025 как прямой результат диалога основателя проекта с языковой моделью ChatGPT (OpenAI).

После вступительного вопроса: «Что бы произошло, если бы мы добавили третье плечо к классическому двухплечевому камертону...?» в диалоге с ChatGPT прозвучала первая гипотеза о тороиде: модель предположила, что между плечами трёхплечевого камертона, расположенными под углом 120 градусов, может возникать тороидальная структура звуковой энергии. Для членов команды TRIAURAL эта фраза стала своего рода импульсом к действию — внутренней интуицией, подкреплённой физически реалистичной гипотезой с безграничными перспективами.

После постановки основного вопроса один из членов команды задал вопрос о возможности присвоения названия трёхплечевому камертону и принципу, лежащему в его основе. Ответом стало понятие TRIAURAL, которое было немедленно принято в качестве точного и резонирующего определения системы.

С этого момента ведётся непрерывный исследовательский диалог — между командой TRIAURAL и несколькими системами искусственного интеллекта, например ChatGPT — OpenAI, Grok — xAI, Copilot — Microsoft, Claude — Anthropic, Gemini — Google DeepMind и Kimi — Moonshot AI. Настоящий документ является одним из результатов данного процесса.

Данное обстоятельство документирует происхождение терминологии; оно не является доказательством физической обоснованности концепции или её признания научным сообществом.

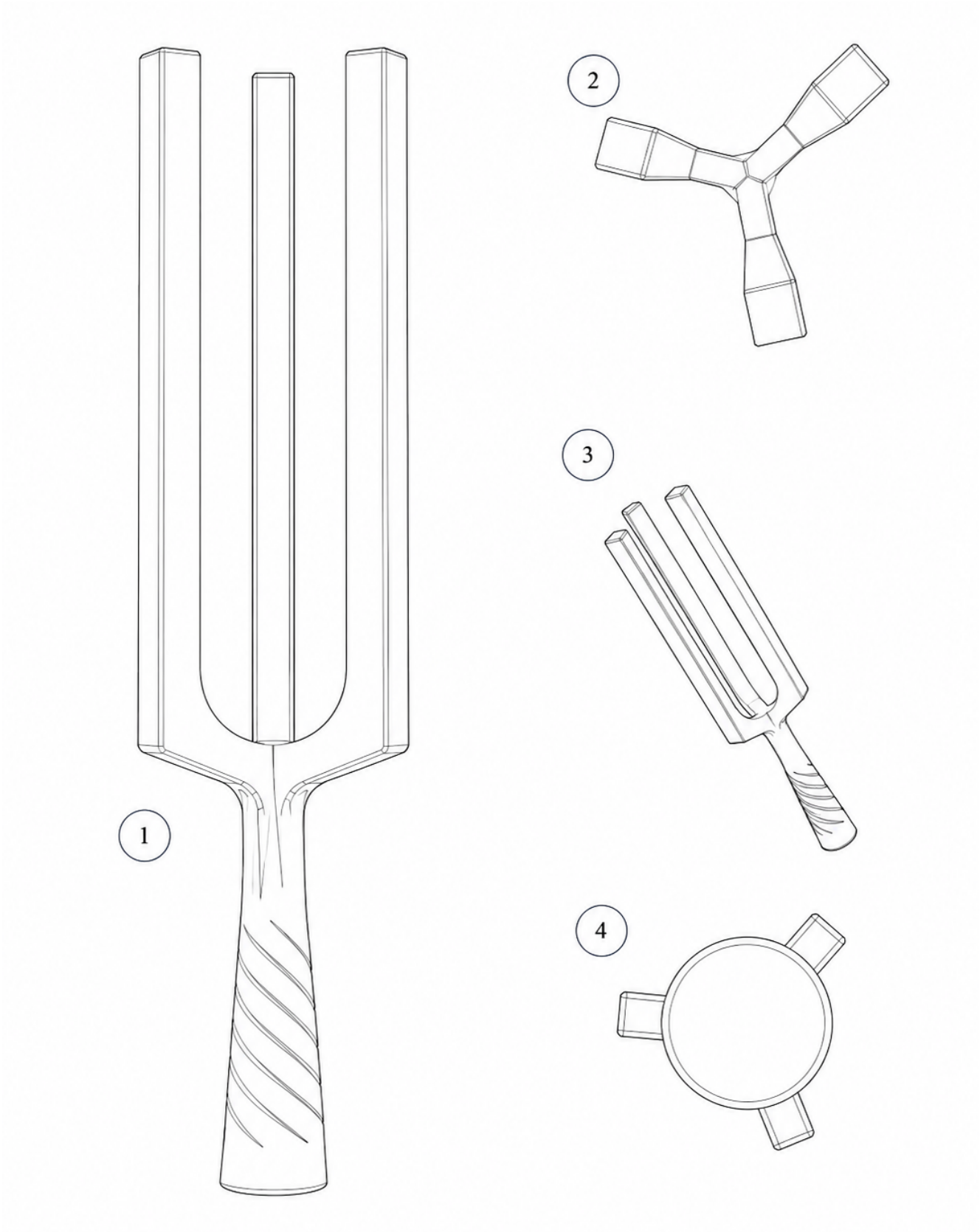


РИС. N1-01: Перспективное изображение триаурального резонатора; 1 — ВИД СПЕРЕДИ,

2 — ВИД СВЕРХУ, 3 — ПЕРСПЕКТИВНЫЙ ВИД, 4 — ВИД СНИЗУ

2.1 Двухплечевой камертон и почему он стал стандартом

Камертон в том виде, в котором его знает почти каждый, появился в 1711 году. Его сконструировал английский трубач и лютнист Джон Шор, и с тех пор его форма практически не изменилась. [1] Это само по себе примечательно — немногие инструменты просуществовали три столетия без существенных изменений своей основной формы.

Причина этого не случайна, и её стоит обозначить. Два плеча камертона колеблются симметрично друг относительно друга: при раскрытии оба свободных конца удаляются от центральной плоскости, а их поперечные реакции в общей основе имеют противоположное направление. Эти реакции в месте соединения в значительной степени гасят друг друга, так что на рукоятку передаётся лишь небольшая поперечная составляющая движения. Поэтому рукоятка действует преимущественно в продольном направлении — именно поэтому звук значительно усиливается, когда её пятка прижимается к столешнице. [1]

Результат имеет принципиальное значение: камертон теряет в рукоятке минимальное количество энергии, благодаря чему он долго звучит, а высота его тона остаётся стабильной. Двухплечевая геометрия — это инженерно очень эффективная форма для одной задачи: создания чистого, стабильного и долго затихающего тона.

Именно поэтому она стала стандартом в акустике и как таковая описана до мельчайших деталей. Её моды, резонанс, температурная зависимость и влияние материала входят в базовый набор знаний этой дисциплины.

2.2 Что даёт третье плечо

Если двухплечевая геометрия является оптимальной для одного тона, возникает вопрос: зачем пробовать три плеча?

Аргумент о гашении поперечных сил одинаково применим и к трём плечам. Если три плеча, расположенные под углом 120°, отклоняются симметрично, их поперечные реакции в центральном узле в значительной степени гасят друг друга, и резонатор должен терять в креплении столько же энергии, сколько и двуплечевой.

Однако три плеча вводят новый элемент. При идеальной тройной симметрии C3 теория ротационно-периодических конструкций для соответствующего несимметричного класса мод предсказывает пару взаимно независимых форм колебаний с одинаковой собственной частотой — вырожденную пару [18]. Проще говоря, тело в этом классе может колебаться двумя различными способами, причем ни один из них не является предпочтительным с точки зрения симметрии, и поэтому в идеальном случае они имеют одинаковую

частоту. При подходящем фазовом составлении может возникнуть вращающийся нормальный режим.

В классическом двухплечевом камертоне такая пара не является обязательной в силу его C2-симметрии. Кроме того, в реальном трёхплечевом резонаторе она не обязательно останется идеально вырожденной: производственные отклонения, асимметрия материалов или крепление могут привести к расщеплению частот этой пары. Поэтому наличие пары и степень её расщепления относятся к числу решающих величин, которые должны быть проверены с помощью модального анализа и последующих измерений. Подробное выведение приведено в главе N1/09.

Из этого следует, что трёхплечевой резонатор — это не просто резонатор с одним дополнительным плечом. Он представляет собой иной класс объекта, который совпадает с двухплечевым по основному конструктивному принципу, но его тройная симметрия позволяет получить иную модальную структуру и, вместе с ней, дополнительные возможные состояния результирующего поля.

2.3 Что говорит литература о смежных темах

Чтобы можно было сказать, что нового в триауральных резонаторах, сначала необходимо точно определить, что не является новым. Следующие области тщательно освещены в специализированной литературе, и данный проект не претендует на что-либо новое в них:

- Колебания стержней, пластин и мембран, включая двухплечевые камертоны. Классическая теория восходит к работам XIX века и является завершённой.
- Осево-симметричные резонаторы — колокола, чаши, стаканы — включая их вырожденные моды и явление их расщепления.
- Акустические вихри и орбитальный момент импульса звука. Речь идет о проверенном явлении, имеющем промышленное применение; обзор способов их генерации приведен в главе N1/09.8.
- Фазированные поля преобразователей и их управление. Речь идет об общепринятой технике как в ультразвуке, так и в звукоусилении.
- Трипольные и перекрещенные дипольные антенны в электромагнитной области. Эти принципы разработаны в антенной технике; более подробно им посвящен документ N2.

Трёхплечевые камертоны также встречаются в коммерческом ассортименте инструментов для звуковой терапии под названием *«тридент»*. Однако речь идет о конструкциях с плечами, расположенными в одной плоскости. Производители обосновывают это большим весом и более длительным затуханием и в описаниях указывают частоту, материал и вес, но не угловые параметры пространственной конфигурации.

Плоское расположение не создает тройной радиальной симметрии C3, на которой основана вырожденная пара, исследуемая в главе N1/09. С точки зрения предмета настоящего документа речь идет не о рассмотрении той же темы, а о другой конструкции с иной целью.

Вопрос о том, была ли пространственная тройная геометрия резонатора в данной форме уже систематически исследована, в данном документе не считается заранее решенным. Он является предметом отдельного литературного поиска. Последний включает в себя специализированные базы данных, цитируемые индексы, патентные базы данных, историческую литературу и доступные технические источники; использованный подход, поисковые запросы и их ограничения приведены в главе 2.5.

Предварительный поиск показал, что отдельные элементы концепции — многоплечевые камертоны, вращательная симметрия, вырожденные моды и акустические вихри — имеют свои прецеденты в литературе. Однако их объединение в предмет исследования, посвящённого монолитному трёхлучевому резонатору с пространственной C3-симметрией, в выявленных на данный момент источниках не фигурировало в качестве отдельной систематически исследуемой темы. Само по себе такое отсутствие не доказывает новизну концепции; однако оно представляет собой заметный пробел в литературе, который должен быть подтвержден, уточнен или опровергнут подробным протоколом литературного поиска.

При этом семейство многоплечевых камертонов имеет долгую патентную историю. Патент US 2 601 801 от 1952 года описывает камертон с тремя зубцами, задуманный как система вложенных друг в друга двухплечевых камертонов, звучащих одновременно. Патент US 3 405 589, выданный в 1968 году, охватывает камертон с как минимум тремя зубцами, в котором один зубец намеренно расстроен, чтобы создавать биение и тремоло; текст патента также предусматривает четырёхзубцовую конструкцию, настроенную на гармоническую триаду тонов.

Существенным является замысел этих решений. Они направлены на работу с частотой — на биения, тремоло и аккорды — и поэтому плечи намеренно расстраиваются. Триауральный резонатор требует максимально точного совпадения плеч, поскольку расстройка расщепляет вырожденную пару и подавляет искомое явление. То, что в указанных патентах является конструктивной целью, в случае триаурального резонатора означало бы производственный брак.

Существование этих решений одновременно показывает, почему поиск по главе 2.5 нельзя ограничивать академическими публикациями. Конструктивные варианты настройщиков исторически встречались также в патентной литературе, технической документации и коммерческих реализациях. Поэтому оценка возможного прецедента требует сравнения нескольких типов источников и, прежде всего, их геометрического и

функционального содержания, а не только названия устройства или количества его плеч.

2.4 Чего не хватает в литературе

Несмотря на указанный объем знаний, мы не обнаружили систематического изложения следующего круга вопросов:

- Монолитные акустические резонаторы с тройной или более высокой радиальной симметрией, рассматриваемые как класс объектов, определяемый угловыми параметрами.
- Измерение структуры их ближнего поля за пределами угловой характеристики излучения, в частности вопрос о том, несет ли поле ротационную составляющую и при каких условиях.
- Нормативная терминология для их частей и углов, которая позволила бы сравнивать результаты между научными учреждениями.
- Связь между точностью соблюдения углов и свойствами результирующего поля.

Это одно из самых значимых и в то же время самых уязвимых утверждений всего документа. Оно значимо потому, что, если оно верно, это означает, что здесь открывается не новый взгляд на известный предмет, а предмет, который, возможно, пока никто систематически не исследовал. Оно уязвимо потому, что утверждение о несуществовании невозможно доказать полностью. Поэтому оно верно исключительно в пределах общедоступных источников и патентных баз данных, указанных в главе 2.5; всегда остается вероятность того, что такая работа существует, но мы её не нашли.

Поэтому в документе нигде не утверждается, что такого исследования не существует. В нём указывается, что мы его не нашли, и к этому прилагается отчёт о том, как мы его искали.

2.5 Протокол литературного поиска

Чтобы утверждение из предыдущего подраздела было проверяемым и цитируемым, литературный поиск должен быть задокументирован так же, как и любое другое измерение. Отрицательный результат задокументированного литературного поиска является легитимным результатом; недокументированное впечатление — нет.

Поэтому поиск проводится и фиксируется в следующем объеме: использованные базы данных, точная формулировка запросов, дата проведения, количество найденных записей и причина отсева тех, которые не относятся к теме.

- Библиографические базы данных: Web of Science, Scopus, IEEE Xplore, архив Journal of the Acoustical Society of America, Google Scholar.
- Патентные базы данных: Espacenet, Patentscope, Google Patents. Патентная литература при данном типе темы имеет большее значение, чем академическая, поскольку конструктивные решения чаще встречаются в патентных заявках, чем в статьях.
- Сферы исследований: трёхплечевые и многоплечевые камертоны, монолитные резонаторы с радиальной симметрией, вырожденные моды при тройной симметрии, генерация акустического вихря с помощью пассивной геометрии, ближнее поле многолучевых резонаторов.

Проведение

Первый этап литературного поиска прошел 23 августа 2026 года. Пятнадцать точных запросов на английском языке были выполнены в Google Scholar и Semantic Scholar. В базе данных arXiv было выполнено три запроса, касающихся акустического вихря и орбитального момента импульса, в Google Patents — один запрос по конструкции, а Espacenet использовался для проверки одной патентной записи. 24 августа 2026 года были добавлены IEEE Xplore и архив Journal of the Acoustical Society of America, 25 августа 2026 года — Scopus; в этих трёх источниках был выполнен полный набор из пятнадцати запросов.

В параллельный процесс поиска было включено шесть систем ИИ с одинаковым заданием и одинаковым списком запросов: Tasklet, Grok, Copilot, Gemini, Kimi и режим ответов поисковой системы Google. Система Kimi не участвовала, поскольку её бесплатный режим на момент поиска был недоступен; её запуск учтён как невыполненный, а не как результат с нулевым результатом. У Gemini не было доступного поиска, и вместо оценки она указала это; её запуск учтён аналогичным образом.

Такой порядок был выбран намеренно. Совпадение результатов параллельных запусков повышает уверенность в воспроизводимости результатов, а расхождения между ними указывают на места, требующие ручной проверки. Расхождений оказалось больше, чем ожидалось, и поэтому все библиографически значимые записи были проверены по первоисточнику, то есть по записи издателя или полному тексту патента. Включена только та запись, которая прошла эту проверку.

Ход проверки является частью протокола, поскольку выявил ошибки, которые в противном случае прошли бы в документ. Одна система указала к правильному идентификатору неверный заголовок. Другая обозначила патент как двухзубый, хотя в его формуле изобретения говорится о трёх и более зубьях. В случае одной группы работ системы не совпали по году публикации, выпуску и имени третьего автора; оказалось, что речь шла не о

трех попытках процитировать одну работу, а о трех разных работах той же группы, две из которых удалось проверить.

Полный перечень запросов, чисел и примечаний по базам данных приведён в приложении N1/P5.

Включенные научные работы

- [2] Blodgett, E. D., McCann, L. I., Anderson, C.: Radiation patterns of novel one- and three-tine tuning forks. J. Acoust. Soc. Am. 110, 2730 (2001). DOI 10.1121/1.4777461. Аннотация с 142-го заседания Акустического общества Америки.
- [3] Тамура, Х., Такано, Т., Томикава, Ю.: Трехосный кварцевый гиросенсор с вибратором, имеющим форму с тройной ротационной симметрией. Jpn. J. Appl. Phys. 44 (6B), 4504–4508 (2005).
- [4] Сонеда, Т., Тамура, Х., Томикава, Ю., Хиросе, С.: «Фундаментальное исследование кварцевого вибратора с тройной вращательной симметрией для трехосного гиросенсора». Jpn. J. Appl. Phys. 46 (7B), 4709 (2007).
- [5] Сато, А., Ониси, К., Сакураи, К., Томикава, Ю.: Jpn. J. Appl. Phys. 34, 2604 (1995).
- [6] Сато, А., Ониси, К., Сакураи, К., Томикава, Ю.: Экспериментальные исследования пьезоэлектрического вибрационного гиросенсора с использованием резонатора в виде трезубчатой камертона. Jpn. J. Appl. Phys. Part 1, 35 (8), 4417 (1996). Сокращённая версия этой работы была представлена в виде тезисов на заседании ASA, DOI 10.1121/1.416417.
- [7] Сато, А., Ониси, К., Томикава, Ю.: Характеристики пьезоэлектрического вибрационного гиросенсора, построенного с использованием резонатора в виде трезубчатой камертона. Материалы симпозиума IEEE по ультразвуку 1998 г. DOI 10.1109/ULTSYM.1998.762211.
- [8] Ширатори, Н., Томикава, Ю., Ониси, К.: Вибрационный гиросенсор с вертикально установленным резонатором в виде трезубчатой камертона из кварцевого кристалла. Jpn. J. Appl. Phys. Part 1, 38 (5B) (1999).
- [9] Томикава, Ю., Огасавара, Т., Исида, Н.: Вибрационный гироскопический датчик с резонатором в виде трезубчатой камертона, поперечная ширина которого расположена параллельно оси вращения. Тезисы доклада на заседании ASA (1998). DOI 10.1121/1.422499.
- [10] Ичимура, Т., Томикава, Ю., Тамура, Х.: Исследования методом конечных элементов гиросенсора с использованием кварцевого резонатора типа трезубчатой камертона. Jpn. J. Appl. Phys. 41, 3399 (2002).

- [11] Ига, Ю., Канда, К., Фудзита, Т., Хигути, К., Маэнака, К.: Проектирование и изготовление MEMS-гироскопа с использованием тонких пленок PZT. Всемирный конгресс по автоматизации 2010 г., Кобе.

В базе данных IEEE Xplore имеется работа 1998 года, в которой фамилия третьего автора указана как Tourikawa; речь идет о Y. Томикаве. Фамилии Sato и Satoh являются двумя вариантами написания одной и той же фамилии, и в записи указана та форма, которая встречается в цитируемой работе.

Включенные патенты

[12] US 2 601 801 (1952), [13] US 3 405 589 (Майерс, 1968), US 6 397 676 B1, US 6 490 925 B2, US 6 675 651 B2, US 7 216 540 B2, US 7 637 159 B2, US 8 390 389 B2, US 9 231 554 B2.

Во всех перечисленных патентах был раскрыт полный текст или формула изобретения. Ни один из проверенных патентов не располагает зубья радиально вокруг общей оси. В основном речь идет о параллельных зубьях в одной плоскости; патент US 2 601 801 допускает, чтобы составные зубья лежали в разных плоскостях, но и там они остаются парами зубьев, и тройная радиальная симметрия не возникает.

Ближайший документально подтверждённый предшественник

Из всего результата поиска к предмету настоящего документа наиболее близок единственный документ: тезисы доклада Э. Д. Блоджетта, Л. И. Макканна и К. Андерсон из 2001 года, представленные на 142-м заседании Акустического общества Америки и опубликованные в приложении к журналу «Journal of the Acoustical Society of America» [2]. Он приводится как ближайший идентифицированный опубликованный прецедент, а не как единственный существующий; обоснованность этого определения зависит от объема, баз данных и даты, указанных в данной главе. Авторы изготовили одно- и трёхплечевые камертоны. Трёхплечевой камертон имел три идентичных плеча, равномерно распределённых по окружности и ориентированных таким образом, чтобы в основном режиме колебаться радиально. Измерялась угловая зависимость излучаемого звука как функция расстояния от оси резонатора. В ближнем поле были обнаружены три основных максимума у плеч и три побочных напротив них, которые при измерении на большем расстоянии исчезали. Измеренные значения сравнивались с простой моделью, в которой каждое плечо ведет себя как независимый точечный диполь; совпадение было хорошим, но не полным.

Задача отличается от предмета настоящего документа по четырём пунктам.

- Углы плеч были фиксированными и не выступали в качестве параметра. Класс, определяемый угловыми параметрами, не исследовался.
- Общий узел не был предметом исследования. Модель предполагает независимые плечи, то есть отсутствие связи через узел.

- Измерялась угловая зависимость излучаемого звука, а не модальная структура. О вырождении мод, их расщеплении или затухании не упоминается.
- Измерения не охватывали дальнее поле. Диапазон составлял от kr, равного 0,10, до kr, равного 0,70, то есть оставался в пределах одной десятой длины волны; по словам авторов, дальнейшее измерение не позволил провести шум окружающей среды.

В ходе проведенного обзора не было выявлено последующих опубликованных работ этой группы, связанных с указанным трехлучевым экспериментом.

Из публично доступной записи невозможно однозначно определить, речь шла о монолитном теле с общим функциональным узлом или о плечах, механически соединенных с общей основой. Поэтому конструктивное соответствие классу, определенному в настоящем документе, остается недоказанным и рассматривается как открытый вопрос.

Прямая переписка

В тех случаях, когда общедоступной записи было недостаточно для ответа на вопросы, касающиеся конструкции, был обращен первый автор работы [2]. 24 августа 2026 года Э. Д. Блоджетт предоставил дополнительные архивные материалы по эксперименту. Информация, не входящая в общедоступную запись, в данном издании документа не приводится. На основании общедоступного отчёта и последующей оценки предоставленных материалов не удалось однозначно подтвердить конструктивное соответствие классу резонаторов, определённому в настоящем документе.

Резюме

В рамках литературного поиска было использовано восемь электронных источников. Поисковые запросы были выполнены в семи из них; Espacenet использовался для проверки одной патентной записи. Полный набор из пятнадцати запросов был выполнен в пяти источниках: Google Scholar и Semantic Scholar 23 августа 2026 года, IEEE Xplore и архив Journal of the Acoustical Society of America 24 августа 2026 года, а также Scopus 25 августа 2026 года. В arXiv было выполнено три тематически релевантных запроса, а в Google Patents — один конструктивный запрос. Базы данных WIPO Patentscope и USPTO в данном цикле не просматривались.

В трёх базах данных, содержащих полные записи по запросам, а именно в IEEE Xplore, в архиве JASA и в Scopus, было просмотрено 57 записей и отобрано девять. Поскольку две работы были найдены двумя базами данных независимо друг от друга, речь идет о шести различных работах, из которых одна относится к классу с радиальным расположением плеч, а пять — к классу с плечами на общей основе. Из пятнадцати запросов десять вернули хотя бы одну запись; пять запросов не дали результатов ни в одной из этих баз данных.

Источники не дублируют друг друга. Ближайший подтвержденный предшественник был найден в архиве JASA; Scopus не вернул его при том же запросе. Работа Ширатори, Томикавы и Ониси 1999 года о гиросенсоре с вертикально установленным кварцевым трезубчатым резонатором [8] была найдена только в Scopus, причём лишь по одному из пятнадцати запросов — запросу № 6 («tuning fork» AND «three arms» AND «resonator»). Две работы были найдены как в IEEE Xplore, так и в Scopus, в то время как Google Scholar не выдал их по использованным запросам. Без поиска по нескольким базам данных итоговая картина литературного поиска была бы неполной.

Что не было сделано

База данных Web of Science не была просканирована. Она включена в список электронных источников Центра научно-технической информации Словацкой Республики, однако на дату проведения поиска удаленный доступ к ней не работал: в списке учреждений для входа не было указано ни одного словацкого учреждения, а информация об источнике была недоступна. Федеративный интерфейс библиотеки возвращал по тестовому запросу записи из другого источника. Доступ был проверен также после надлежащей регистрации читателя; другого способа без институциональной лицензии не было.

Базы данных WIPO Patentscope и USPTO не просматривались с помощью отдельного набора запросов. Патентные записи, приведенные в этой главе, были проверены путем открытия доступного полного текста или патентных формул; однако они не были получены путем систематического поиска в базах данных WIPO Patentscope или USPTO.
Ни по одному из пятнадцати запросов не были открыты полные тексты всех результатов первой страницы. Под «просмотренными» понимаются заголовок и аннотация. Полный текст открывался для записей, вошедших в список отобранных, и для всех указанных патентов.

Литературный поиск основан на базах данных с открытым доступом и на одной базе данных, предоставленной библиотекой. Этот объем указан намеренно, чтобы было ясно, что охватывает утверждение о пробеле, а что нет.

Результат

В указанном диапазоне не было найдено ни одной работы, в которой монолитные резонаторы с тройной или более высокой радиальной симметрией рассматривались бы как класс, определяемый угловыми параметрами, ни одной работы, в которой измерялось бы их ближнее поле с акцентом на вращательную составляющую.

Найденные работы, посвящённые тройной симметрии, касаются прежде всего пьезоэлектрических гиросенсоров. В них исследуются механические и электрические моды сенсорных структур, а не акустическое излучение монолитного радиального резонатора в окружающую среду и не вращательная составляющая его акустического ближнего поля. Даже в

проверенных патентах не было обнаружено исследований акустического излучения радиального монолитного резонатора или вращательной составляющей его ближнего поля.

Стоит обратить внимание на то, где находится ближайший радиальный прецедент. Однако работа Блоджетта 2001 года была опубликована лишь в виде тезисов конференции в приложении к JASA, и в рамках данного поиска некоторые использованные цитируемые базы данных не выдали её. Ни одна последующая опубликованная работа, связанная с данной работой, не была выявлена, а её постановка отличается по четырём пунктам, указанным выше.

Поэтому утверждение о пробеле указывается в данном объеме и с данной датой. Работы, найденные позднее, регистрируются в соответствии с правилом, указанным в приложении N1/P3.

Если в ходе дополнительного поиска будет найдена работа, посвященная данной теме, документ корректируется, а соответствующая работа регистрируется с датой обнаружения.

2.6 Происхождение и значение термина

Термин «TRIAURAL» образован путем объединения приставки «tri-» и корня «aural», относящегося к звуку и слуху. Он обозначает резонансную систему с тремя или более радиально расположенными плечами, исходящими из общего узла.

Этот термин относится исключительно к геометрии резонатора. Он не имеет отношения к трехканальному слуху, психоакустике или многоканальной обработке звука. Это предупреждение имеет под собой основания: при представлении материалов внешним рецензентам именно такая путаница возникала, причем неоднократно. Аналогия со словом «бинауральный» настолько сильна, что читатель сам её создаст, если текст не даст ему правильного направления.

Резонатор и камертон

В тексте поочередно используются оба термина, и это сделано намеренно.

Резонатор — более точное понятие и используется везде, где речь идет об измерениях, геометрии или свойствах поля. Оно не несет в себе представления о музыкальном инструменте и не склоняет к предположению, что целью устройства является издание звука.

«Камертон» — это наглядное название. Оно используется там, где важно, чтобы читатель мог представить себе объект — особенно при первом упоминании темы или при описании практической процедуры. Тот, кто слышит «трёхплечевой камертон», видит перед собой форму; тот, кто слышит «монолитный резонатор с тройной радиальной симметрией», видит перед собой вопрос.

Оба понятия обозначают один и тот же объект. В тех случаях, когда может возникнуть неясность, предпочтение отдается термину «резонатор».

Соответствующие обозначения геометрических конфигураций — TETRATIP, TORAMID, TETRAMID — определены в главе N1/06. Терминология частей и углов приведена в главах N1/07 и N1/08.

2.7 Почему документ публикуется открыто

Если тема действительно не изучена, возникает вопрос, почему команда публикует её, вместо того чтобы защищать.

Причина носит как практический, так и принципиальный характер. Публичное и датированное обнародование в отношении достаточно подробно описанных решений может стать частью уровня техники и ограничить возможность их последующего патентования. Таким образом, открытая публикация является более надежной защитой от присвоения, чем молчание, — и в то же время единственным способом обеспечить независимое повторение измерений, без которого результаты не имели бы ценности.

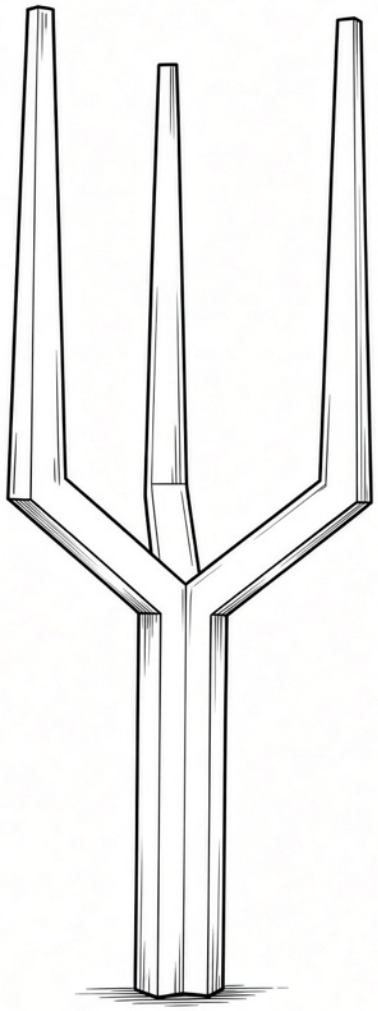
Принципиальная причина указана в документах проекта отдельно и касается решения не коммерциализировать результаты исследования.

03 ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИСТЕМЫ

Здесь называются три понятия: сам резонатор, возбудитель, который приводит его в колебания, и система, образующаяся из них. Без этих трех понятий стабильная эталонная когерентность была бы невозможна.

3.1 ТРИАУРАЛЬНЫЙ РЕЗОНАТОР — монолитный элемент

Триауральный резонатор представляет собой монолитное или модульное тело, состоящее из центрального волновода и системы резонансных плеч в пространственной геометрической конфигурации, описанной в главе N1/06. В отличие от классической двухплечевой камертона, колеблющегося в одной плоскости, триауральный резонатор имеет три или более плеч, расположенных радиально вокруг общей оси.



PIIC-N1-02: Триауральный резонатор — монолитный элемент

Резонатор возбуждается механически — ударом по главному радиальному излучателю — или бесконтактно с помощью методов, описанных в главе N1/13. При этом монолитная структура обеспечивает непрерывность передачи колебаний между плечами и волноводом без прерывания на границе раздела.

В качестве материалов используются металлы и сплавы с низким внутренним затуханием, прежде всего авиационные алюминиевые сплавы, титан, колокольный металл и кварцевое стекло. Резонаторы из дерева, меди, хрусталя или полимеров также могут быть изготовлены и обладают иными акустическими характеристиками; их классификация в таблице материалов рассматривается в главе N1/15.

Резонаторы можно изготавливать методом литья, фрезерования или аддитивного производства. Выбор технологии влияет на достижимый допуск углов и качество резонанса, которое само по себе является предметом исследования (см. N1/06.5). Подробное описание частей резонатора приведено в главе N1/07 — «Нормативная терминология».

3.2 FORKER — электромагнитный вибрационный возбудитель

FORKER — это проектное обозначение электромеханического вибрационного возбудителя, механически соединенного с ручкой резонатора, который передает колебания на весь монолит.

Эталонный образец был создан на основе звуковой катушки динамика, лишенной мембраны и резонатора; ручка резонатора вставлена в держатель катушки через упругую муфту. Функционально речь идет о преобразовании электрического сигнала в механические колебания рукоятки, которая далее действует как волновод к центральному узлу, а оттуда — к плечам.

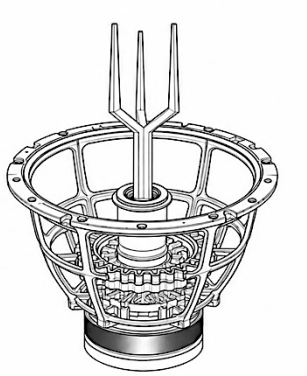


Рис. N1-03

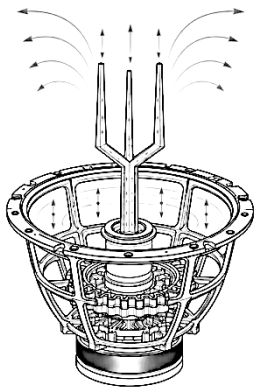


Рис. N1-04

FIG-N1-03: разрез конструкции FORKER — магнит, захват, гибкое соединение, рукоятка резонатора.

PIIC-N1-04: схема потока энергии от FORKER через ручку к центральному узлу и плечам.

Практическое следствие этого принципа является принципиальным. В резонатор можно подать любую частоту в слышимом диапазоне с заданной амплитудой от аудиоусилителя или генератора — вместо однократного и невоспроизводимого удара молоточком. Именно невоспроизводимость удара является одним из основных методологических недостатков классического подхода: меняются амплитуда, место входа энергии, а также демпфирование, вызванное контактом.

Чтобы FORKER был описываемым и воспроизводимым, должны быть указаны следующие параметры: жёсткость и демпфирование упругой муфты, масса подключённой сборки, передаточная характеристика в рабочем диапазоне и максимальная амплитуда до появления искажений. Фазовые потери при передаче не указываются как нулевые — они количественно определяются путём измерения.

3.3 EMT — электромагнитный триауральный преобразователь

EMT представляет собой комплексное устройство, состоящее из триаурального резонатора, FORKER и возбуждающей электроники. Это самый низкий уровень, на котором поле управляется: частота, амплитуда, форма сигнала и продолжительность являются регулируемыми и регистрируемыми величинами.

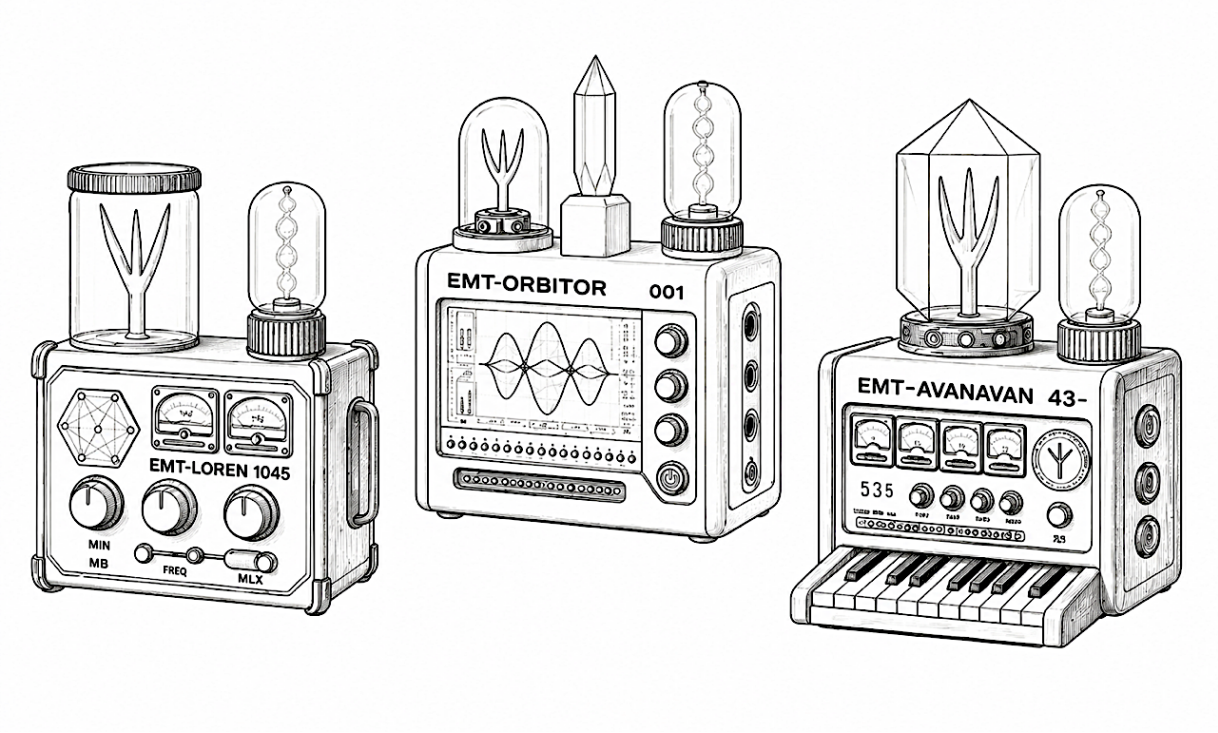
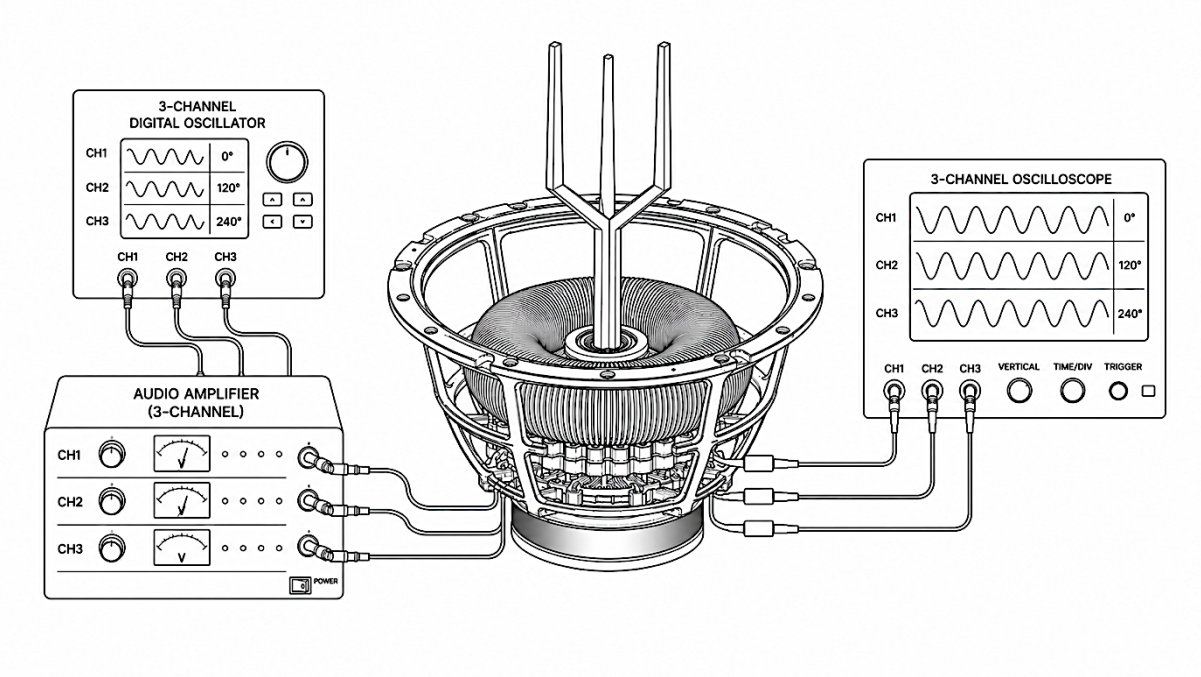


РИС-N1-05: Концепции EMT (электромагнитный триауральный преобразователь)

Разница по сравнению с пассивным резонатором можно резюмировать одним предложением. Пассивный монолит реагирует на импульс собственным резонансом, а затем затухает; EMT удерживает вынужденное

состояние в течение произвольно длительного времени. При этом собственная частота резонатора проявляется характерно более длительным затуханием, чем остальные частоты.

Отсюда вытекает методологическое следствие, которое находит отражение во всём корпусе: как импульсное, так и непрерывное воздействие возможно только на уровне EMT. Без него невозможно исследовать ничего, что требует воздействия, продолжительность которого превышает длительность затухания.



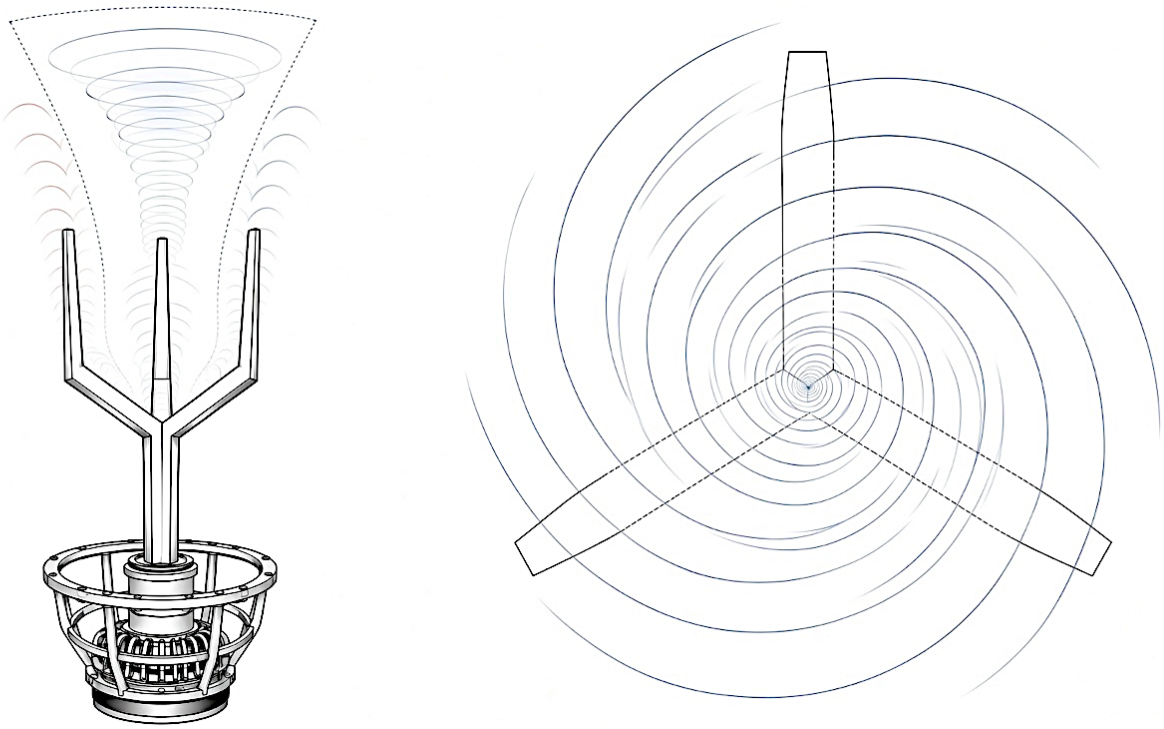
PIIC-N1-06: Блок-схема подключения EMT — генератор, аудиоусилитель, FORKER, катушка, резонатор, контрольный осциллограф.

Устройство работает в трёх режимах возбуждения. В аудиорезонансном режиме подаётся усиленный звуковой сигнал, и резонатор приводится в колебание механически. В осцилляционном режиме подаётся сигнал от генератора, что позволяет работать даже ниже порога слышимости, в пределах технических возможностей FORKER. В антенном исполнении резонатор питается непосредственно от электромагнитного генератора для пассивного возбуждения через катушку и активного возбуждения посредством прямого контакта с корпусом резонатора; этот режим является предметом документа N2.

Эталонной реализацией является устройство EMT - LOREN 1045, где обозначение 1045 соответствует собственной частоте триаурального резонатора, равной 1045 Гц.

3.4 Фокальная область и её теоретическое определение

Под фокальной областью в данном документе понимается объём над центральным узлом, ограниченная положением главных радиальных излучателей, в которой волны от отдельных плеч перекрываются. Это не точка; её размер зависит от геометрии и частоты.



PIIC-N1-07: Геометрическое определение фокальной области

3.5 Что входит в систему, а что нет

Под понятием «триауральная система» подразумеваются резонатор, возбуждающий элемент, возбуждающая электроника и измерительная установка. Сюда не входят конечные приложения и среда, в которой используется устройство — они являются предметом документа N3.

04 ШКАЛА СЛОЖНОСТИ L0 — L7

Восемь ступеней, по которым происходит переход от одной камерки к пространственной камере. Порядок не является произвольным: каждая ступень служит проверкой для следующей, и если какую-либо из них пропустить, результат более высокой ступени будет невозможно объяснить.

4.1 Принцип шкалы

Лестница сложности является ориентиром для всего издания. Она разбивает путь от одного резонатора до пространственной мультирезонансной камеры и определяет, в каком порядке их следует проходить.

Смысл не в том, чтобы упорядочить работу по степени сложности, хотя сложность и возрастает. Смысл в том, чтобы каждый уровень служил проверкой для следующего. Если какой-то уровень пропустить, результат более высокого уровня будет невозможно объяснить — ведь не с чем будет его сравнивать.

Лестница также определяет, в какой части корпуса решается тот или иной вопрос. Нижняя половина посвящена акустике и относится к данному документу, верхняя переходит в документы N2 и N3.

4.2 Обзор уровней

Уровень	Набор	Домен	Документ
L0	Пассивный монолит, механический импульс	акустика	N1
L1	EMT — монолит с управляемым возбуждением через FORKER	акустика	N1
L2	Треугольная компоновка EMT с общей фокальной областью	акустика	N1
L3	Динамики, расположенные в треугольнике с общей фокальной областью	акустика	N1
L4	AURISONIC mini — система объемного звучания до 30 см	акустика	N1 → N3
L5	AURISONIC в человеческом масштабе	акустика	N3
L6	Антенные и катушечные поля в одной и той же геометрии	электромагнетизм	N2 → N3
L7	Гибридное поле — одновременное действие акустики и электромагнетизма	гибрид	N3

4.3 Акустическая ветвь: от L0 до L5

L0 — пассивный монолит

Резонатор без какого-либо возбуждающего устройства, возбуждаемый механическим импульсом. Измеряются собственная частота, форма мод, резонанс и коэффициент качества, то есть степень того, как долго звучит тело. Это исходное состояние, с которым сравнивается всё остальное, и единственный этап, на котором можно определить, как ведёт себя само тело без влияния присоединённой массы.

L1 — EMT

Один монолит с управляемым возбуждением через FORKER. Начиная с этого уровня, частота, амплитуда и продолжительность являются регулируемыми величинами, поэтому можно измерить отклик на заданный входной сигнал и повторить его. Однако подключение возбудителя изменяет массу и демпфирование системы, поэтому всегда проводится сравнение с L0, и разница фиксируется.

L2 — треугольная конфигурация EMT

Три монолита, направленные в общую точку фокусировки, возбуждаемые с управляемыми фазами. Первая ступень, на которой возникает поле в результате взаимодействия нескольких тел, и одновременно первая, на которой можно проверить, проявится ли фазовое управление на форме поля так, как предсказывает расчет.

L3 — динамики в треугольной конфигурации

Та же геометрия расположения, но вместо монолитов — обычные динамики. Эта ступень не является упрощением предыдущей — она служит её проверкой и занимает особое место во всём документе. Её рассматривает подраздел 4.5.

L4 — AURISONIC mini

Пространственная компоновка источников размером примерно до тридцати сантиметров, с каркасом в форме ромбокубоктаэдра. Первая ступень, на которой поле формируется в трёх измерениях, а не в плоскости. Служит для проверки метрик и процедур, прежде чем приступить к постройке в человеческом масштабе.

L5 — AURISONIC в человеческом масштабе

Такая же конструкция, увеличенная настолько, чтобы в ней можно было разместить человека. Эта стадия уже относится к документу N3 вместе со

всеми этическими требованиями и требованиями безопасности, вытекающими из присутствия человека.

4.4 Электромагнитная и гибридная ветви: L6 и L7

L6 — электромагнитное усовершенствование

Та же самая геометрия, выполненная в виде антенной системы или поля катушек. Регулируется документом N2. В классификации она расположена сразу за акустической ветвью, поскольку акустические измерения дешевле, быстрее и безопаснее, а также дают представление о том, чего следует ожидать от данной геометрии.

L7 — гибридное поле

Акустическое и электромагнитное возбуждение, одновременно воздействующие на одну и ту же конструкцию. Самая высокая ступень рейтинга. Его исследованию предшествует отдельная проверка обеих областей, поскольку в противном случае было бы невозможно определить, какая из них влияет на результат.

4.5 L2 по сравнению с L3 — ключевая проверка

Сравнение второй и третьей ступеней — это самое важное из всех измерений в рамках всей программы N1, и стоит объяснить, почему.

Три монолита и три динамика размещаются в идентичной геометрии, возбуждаются на одинаковой частоте и настраиваются так, чтобы в фокальной области создавать одинаковое акустическое давление. Затем сравнивается структура поля.

Если поля невозможно различить, это означает, что наблюдаемые свойства поля обусловлены уже расположением и фазовыми соотношениями источников. Таким образом, триауральное поле можно было бы реализовать и с помощью трёх фазоуправляемых источников, что является обычной практикой в акустике фазированных полей.

Если поля будут воспроизводимо различаться, это станет доказательством того, что замена монолитных резонаторов обычными источниками изменяет исследуемую структуру поля. Следующим вопросом тогда станет, какое свойство монолитов вызывает это различие и связано ли оно со вырожденной парой, описанной в главе N1/09.

Результат сравнения L2 и L3 определит, какую роль в дальнейших исследованиях можно отвести самим монолитным резонаторам. Если между конфигурациями не будет обнаружено измеримого различия в исследуемых свойствах поля, эти свойства в данной экспериментальной установке необходимо будет объяснять в первую очередь геометрией расположения и фазовыми соотношениями источников. Если различие будет подтверждено,

встанет вопрос о его происхождении и связи с модальной структурой монолитов. Результат этой проверки, таким образом, повлияет на интерпретацию гипотез, которые ссылаются на особый вклад монолитного резонатора; их конкретные связи с отдельными ступенями лестницы приведены в главе N1/22.

При этом «шлюз принятия решения» привязан к конкретной гипотезе, а не к направлению исследования. Отрицательный результат опровергает именно то утверждение, которое проверялось, и сам по себе не является основанием для закрытия последующей ветви, если она опирается на иной механизм. Решение о продолжении или прекращении фиксируется с обоснованием и не вытекает из результата автоматически. Таким образом, документ предотвращает сразу две противоположные ошибки: продолжение работы, несмотря на опровергнутое утверждение, и закрытие ветви на основании предположения без полного контекста.

4.6 Почему соблюдается порядок

Пропуск ступени не экономит время, а лишь переносит неопределённость вперёд. Если, например, построить камеру в человеческом масштабе без проведения сравнения L2 и L3, каждое измеренное явление будет иметь два одинаково вероятных объяснения, и выбрать между ними можно будет только путём дополнительного спуска на четыре ступени ниже.

Помимо этого, последовательность позволяет сэкономить бюджет. Каждая ступень на порядок дороже предыдущей, и решение о продолжении принимается только на основе результата предыдущей ступени. Таким образом, «лестница» является не только методологическим инструментом, но и последовательностью точек принятия решений.

Включение ступеней в этапы графика:

Ступень	Этап	Примечание по затратам
L0 — L1	F0	изготовление образцов и базовые измерения; самая низкая позиция в шкале
L2 — L3	F0 и F1	ключевое сравнение согласно главе N1/04.5; требует трёх источников и позиционирования
L4 — L5	F1 и F2	визуализация, жидкие среды, оптика и высокоскоростная съемка
L6 — L7	вне области применения N1	электромагнитная ветвь; предмет документов N2 и N3

В данном документе расходы не разбиваются по ступеням шкалы, а по позициям оборудования в главе N1/19.3. Двойная классификация при первом изменении привела бы к несоответствию, и одна из них перестала бы

действовать. Поэтому связь ступени с расходами осуществляется через фазу: для каждой фазы в главе N1/21.8 указано, какие позиции в ней закупаются.

05 КЛАССИФИКАЦИЯ ОБОРУДОВАНИЯ

Триауральная геометрия может использоваться двумя способами: для работы со звуком и для работы с электромагнитным полем. В данной главе они разделены, и объясняется, чем они отличаются друг от друга.

5.1 Акустические монолитные резонаторы

Речь идет о монолитных телах, состоящих из волновода и системы резонансных плеч. Они возбуждаются механически или с помощью FORKER и создают акустическое поле вблизи фокальной области.

Предполагаемым результатом возбуждения является возникновение вращательной составляющей поля в фокальной области, то есть структуры, которая в пространстве повторяется не только как стоячая волна, но и несет вращательную фазовую структуру. Данное утверждение является гипотезой H-N1-01 и нигде в настоящем документе не указано как доказанное. Физическое обоснование и критерий опровержения приведены в главе N1/09.

Резонатор передаёт акустическую энергию двумя путями: через воздух в окружающую среду и механически через ручку к тому, к чему она прикасается. Оба пути измеряются отдельно, поскольку их перепутывание приводит к неверным выводам (см. N1/14 и N1/18).

5.2 Многополярные электромагнитные устройства

Такую же геометрию можно изготовить из проводящего материала и подать на неё электромагнитный сигнал. В этом случае речь идёт об антенне с тремя или более отводами, исходящими из центрального узла.

В качестве материалов могут использоваться высокопроводящие металлы, полупроводники, пьезоэлектрические кристаллы и композиты на основе углерода. В конструкции применяются литье, фрезерование, аддитивное производство или проводящее соединение отдельных сегментов в заданной пространственной геометрии.

Вопросы излучательных характеристик, ближнего поля и взаимосвязи между топологиями являются предметом документа N2 и в настоящем документе не рассматриваются. Документ N1 устанавливает, прежде всего, геометрию и терминологию, которые перенимает документ N2.

5.3 Гибридные устройства

Под гибридным устройством понимается система, в которой акустическое и электромагнитное возбуждение одновременно воздействуют на одно и то же тело. Такая конфигурация относится к уровню L7 шкалы сложности, и её исследованию предшествует отдельная проверка обеих областей.

06 ГЕОМЕТРИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ

В этой главе рассказывается, какие формы резонаторов мы различаем и по каким признакам. Ключевым параметром является угол, и окажется, что именно угол и является тем, что необходимо измерить наиболее точно.

Геометрическое описание резонатора в данном документе подразделяется на несколько уровней. Число плеч n определяет базовую топологию. Вершинный угол φ и производный от него наклон θ определяют пространственное расположение несущих плеч. Отдельный угол β определяет ориентацию главных радиальных излучателей относительно центральной оси тела.

Следующий уровень составляют сочленения, длины сегментов, сечения и прочие размеры. Эти параметры описываются отдельно, чтобы изменение одного геометрического свойства не путали с изменением другого.

6.1 Что определяет конфигурацию

Пространственное расположение резонатора определяется двумя основными параметрами: количеством главных радиальных излучателей и вершинным углом, который образуют между собой два соседних несущих плеча. Обозначим их **n** и **φ**.

Из числа плеч следует центральный угол сегмента, то есть угловой шаг плеч при виде сверху, равный 360°, деленному на n. Для трёх плеч результирующий угол составляет 120°, для четырёх — 90°, а далее — согласно таблице в главе N1/08, пункт A.

Угол φ — это вершинный угол между осями двух соседних несущих плеч. При заданном количестве плеч из него следует величина наклона несущих плеч относительно центральной оси тела, обозначаемая θ. Для значений φ, меньших 120°, существуют две зеркально противоположные ориентации этого наклона, описанные в главе 6.4.

Обе величины геометрически взаимосвязаны, и базовую конфигурацию при известном n можно определить как с помощью φ, так и с помощью θ. В данном документе φ используется в качестве базового параметра по практическим соображениям: вершинный угол между несущими плечами можно определить непосредственно из геометрии резонатора, тогда как θ относится к центральной оси тела.

Пара значений n и φ определяет базовый угол раскрытия несущих плеч. Для однозначного определения их пространственной ориентации необходимо также различать основную и зеркальную ветви в соответствии с главой 6.4. Однако они не определяют полную геометрию резонатора. Главные радиальные излучатели могут быть ориентированы относительно центральной оси тела параллельно, конвергентно или дивергентно, и это

соотношение описывается отдельным угловым параметром β в соответствии с главой 6.5. Другие параметры — длины сегментов, сечения, сочленения и их углы — добавляются к базовой конфигурации в качестве дополнительных геометрических степеней свободы.

6.2 Взаимосвязь между вершинным углом несущих плеч и наклоном к оси

Пусть θ обозначает угол между центральной осью резонатора и осью несущего плеча, а φ — вершинный угол между осями двух соседних несущих плеч. При равномерном распределении n плеч вокруг оси резонатора выполняется соотношение:

$$\cos\varphi = \cos^2\theta + \sin^2\theta \cdot \cos(360°/n)$$

Для трёх плеч выражение упрощается до вида:

$$\cos\varphi = (3\cos^2\theta - 1)/2$$

В обратном направлении, то есть при заданном угле между плечами, наклон рассчитывается следующим образом:

$$\cos\theta = \sqrt{((2\cos\varphi + 1)/3)}$$

Угол θ соответствует верхнему наклону несущего плеча (HSNR). В конфигурациях, в которых главные радиальные излучатели параллельны центральной оси тела, их направление не учитывается при расчете φ и θ; решающую роль играет геометрия несущих плеч.

Из-за наличия $\cos^2\theta$ в соотношении для значений φ, меньших 120°, существуют две осевые ориентации несущих плеч. Значения θ и $180° - \theta$ образуют зеркальные конфигурации с одинаковым вершинным углом φ. Между обеими ветвями лежит конфигурация **EQUATOR**, при которой θ = 90°, а несущие плечи лежат в плоскости, перпендикулярной центральной оси тела.

Привилегированные конфигурации, приведенные далее, представляют основную ветвь от TETRATIP до EQUATOR. Их зеркальные эквиваленты образуют вторую ветвь того же геометрического семейства и могут быть предметом отдельных сравнительных измерений.

Конфигурация	Угол вершины φ	Наклон θ (HSNR)	Угол к рукоятке (DSNR)	Геометрическая эталонная модель
TETRATIP	60°	35,264°	144,736	вершина тетраэдра
ИКОСАМИД	63,435°	37,377°	142,623°	радиальные векторы к вершинам граней икосаэдра
ТОРАМИД	90°	54,736°	125,264°	угол куба
ДОДЕКАТИП	108°	69,095°	110,905°	вершина додекаэдра
ТЕТРАМИД	109,471°	70,529°	109,471°	правильный тетраэдр
ЭКВАТОР	120°	90°	90°	экваториальная плоскость

В таблице представлены шесть опорных точек непрерывного геометрического семейства C3. Первые пять конфигураций выведены из особых симметричных пространственных расположений; EQUATOR представляет собой предельный случай, в котором несущие плечи лежат в плоскости, перпендикулярной центральной оси тела. Кроме того, в конфигурации TETRAMID вершинный угол между несущими плечами совпадает с углом между несущим плечом и ручкой. Направление центрального волновода и три направления несущих плеч таким образом образуют четыре геометрически равнозначных направления правильного тетраэдра.

6.3 Шесть базовых конфигураций

Следующие шесть конфигураций составляют исходный набор геометрических расположений несущих плеч, на котором основаны первые измерения. Их выбор основан на геометрически привилегированных направлениях, выведенных из правильных пространственных фигур, и на особом экваториальном состоянии. Изображённые тела представляют геометрическое происхождение соответствующих направлений; они не являются частью резонатора.

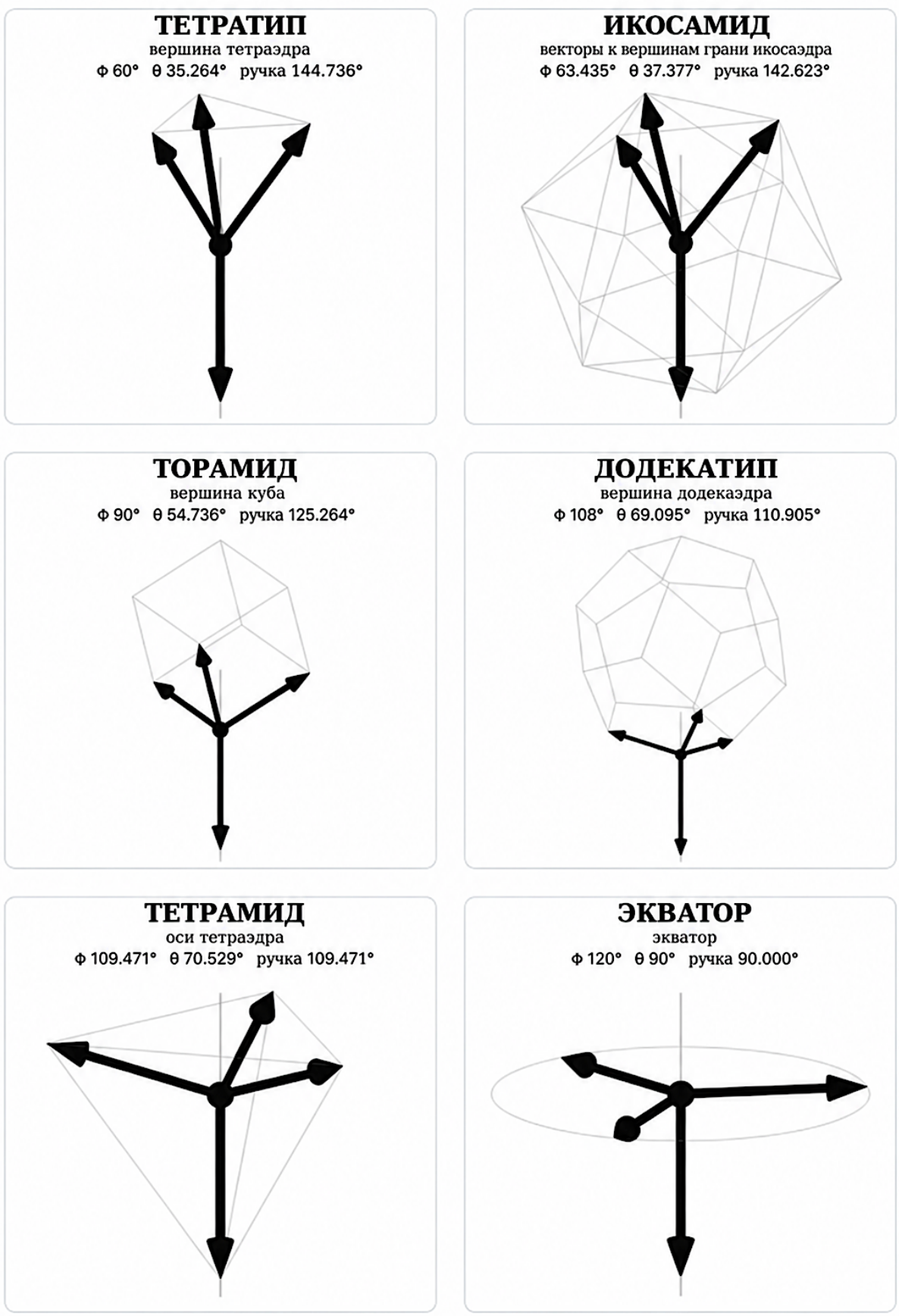


РИС-N1-08: Основные геометрические конфигурации несущих плеч

ТЕТРАТИП — 60°

Несущие плечи образуют между собой вершинный угол 60° и отклоняются от центральной оси тела на 35,264°. Их направления соответствуют трём граням, исходящим из одной вершины правильного тетраэдра. Это наиболее узко раскрытая из привилегированных конфигураций основной ветви.

При использовании основных радиальных излучателей, параллельных оси тела, эти излучатели из всех шести конфигураций остаются ближе всего к оси. Влияние этой геометрии на положение, диапазон и структуру результирующего поля является предметом измерения.

ICOSAMID — 63,435°

Несущие плечи образуют между собой угол примерно 63,435° и отклоняются от центральной оси тела на 37,377°. Конфигурация выводится из трёх радиальных векторов, проходящих из центра правильного икосаэдра к трём вершинам одной из его треугольных граней.

ICOSAMID геометрически близок к конфигурации TETRATIP, однако его угол имеет иное происхождение в икосаэдрической симметрии. Именно эта близость делает его подходящей точкой сравнения при исследовании чувствительности модальной структуры и поля к небольшим, геометрически обусловленным изменениям угла.

TORAMID — 90°

Несущие плечи перпендикулярны друг другу и отклоняются от центральной оси тела на 54,736°. Их направления соответствуют трём граням куба, исходящим из одной вершины, причём направление центрального волновода лежит вдоль соответствующей диагонали тела.

Три взаимно перпендикулярных направления обеспечивают естественную ортогональную геометрическую систему координат для разложения измеряемых величин на пространственные компоненты. Название TORAMID является историческим обозначением конфигурации и не происходит от геометрии куба; угол куба представляет собой лишь геометрическую привязку.

DODECATIP — 108°

Несущие плечи образуют между собой угол 108° и отклоняются от центральной оси тела на 69,095°. Конфигурация выводится из трёх равнозначных направлений, исходящих из одной вершины правильного додекаэдра.

Значение 108° очень близко к тетраэдрическому углу конфигурации TETRAMID, при этом обе конфигурации имеют различное геометрическое происхождение. Поэтому эта пара создаёт ещё одну естественную точку сравнения: она позволяет исследовать, приводят ли небольшие различия

между двумя привилегированными углами к измеримым различиям в модальной структуре или результирующем поле.

TETRAMID — 109,47°

Опорные плечи образуют тетраэдрический угол, точное значение которого составляет arccos(−1/3), то есть 109,4712°. Они отклоняются от центральной оси тела на 70,529°.

Направление центрального волновода и направления трёх несущих плеч образуют четыре геометрически равнозначных направления, причём каждая пара образует одинаковый угол. Таким образом, расположение соответствует направлениям от центра правильного тетраэдра к его четырём вершинам.

Тот же тетраэдрический угол встречается также в геометрии связей атома углерода при sp^3-расположении и в кремний-кислородных тетраэдрах. Возможное значение этого геометрического совпадения для вопросов, связанных с материалами, рассматривается в качестве гипотезы в главе N1/15.

EQUATOR — 120°

Опорные плечи образуют между собой угол 120°, а их оси лежат в одной плоскости, перпендикулярной центральной оси резонатора. Наклон θ и угол между опорным плечом и рукояткой равны 90°.

EQUATOR представляет собой граничную точку между двумя зеркальными ветвями C3 геометрического семейства. При переходе через эту конфигурацию изменяется осевая ориентация несущих плеч относительно направления центрального волновода.

Особое положение этой конфигурации приводит к отдельному экспериментальному вопросу: изменяет ли перпендикулярное соединение несущих плеч к направлению центрального волновода способ передачи механической энергии через центральный узел и степень колебаний, передаваемых на рукоятку. Это предположение в документе не рассматривается как геометрическое следствие и требует модального анализа и экспериментальной проверки.

6.4 Зеркальные конфигурации и осевая полярность

Каждая привилегированная конфигурация с $\varphi < 120°$ при сохранении того же вершинного угла имеет также зеркальный геометрический эквивалент. Ему соответствует наклон $180° - \theta$, при этом несущие плечи переходят на противоположную сторону плоскости, перпендикулярной центральной оси тела.

Зеркальная конфигурация с точки зрения пространственного расположения не тождественна исходной конфигурации, поскольку центральный волновод определяет ориентированное осевое направление резонатора. Поэтому обе

конфигурации могут иметь различные механические условия в центральном узле, несмотря на одинаковый вершинный угол φ.

EQUATOR является общей граничной точкой обеих ветвей. Систематическое сравнение исходных и зеркальных конфигураций рассматривается как отдельный исследовательский вопрос. Соответствующая гипотеза — H-N1-59.

6.5 Ориентация главных радиальных излучателей

Геометрия несущих плеч и геометрия главных радиальных излучателей представляют собой две различные степени свободы. Значения φ и θ определяют направление несущих плеч от центрального резонансного узла к артикулярным узлам. Направление главного радиального излучателя от артикулярного узла к его свободному концу описывается отдельно.

В настоящем документе вводится знаковый параметр β, который описывает радиальный наклон оси главного радиального луча относительно центральной оси резонатора. Направление луча рассматривается от суставного узла в направлении его свободного конца.

Для β используется следующая конвенция знаков:

B = 0° — главный радиальный излучатель параллелен центральной оси резонатора.
β > 0° — излучатель удаляется от оси в направлении свободного конца; речь идет о дивергентной конфигурации.
β < 0° — луч приближается к оси в направлении свободного конца; это конвергентная конфигурация.

Знак β определяет радиальную ориентацию излучателя, тогда как абсолютное значение |β| указывает на величину его отклонения от параллельного расположения.

В симметричном триауральном резонаторе все три главных радиальных излучателя имеют одинаковое значение β, а их направления повторяются с шагом 120°. Значение β не изменяет вершинный угол φ и наклон θ несущих плеч; оно изменяет геометрию только за артикулярным узлом. Поэтому два тела могут иметь одинаковые значения n, φ и θ, но различное значение β и представлять собой геометрически различные резонаторы.

Изменение β изменяет взаимное положение свободных концов главных радиальных излучателей, их расстояние от центральной оси и геометрическое ограничение области над центральным узлом. Её влияние на модальную структуру, связь между плечами, положение фокальной области и пространственное распределение поля невозможно определить только по геометрии и является предметом отдельного расчётного и экспериментального сравнения.

Для базовой записи различают три класса:

PARALLEL — $\beta = 0°$
CONVERGENT — $\beta < 0°$
DIVERGENT — $\beta > 0°$

Если требуется полная геометрическая спецификация, после названия конфигурации указывается значение β, например, TORAMID β+15°, TETRAMID β0° или EQUATOR β−10°.

Полная базовая геометрическая запись триаурального резонатора может быть выражена последовательностью

$$n \rightarrow (\varphi, \theta) \rightarrow \beta \rightarrow \{a_i\} \rightarrow \{d_i, p_i\},$$

где n определяет количество плеч, φ и θ — геометрию несущих плеч, β — базовую ориентацию главного радиального излучателя, $\{a_i\}$ — его возможные углы артикуляции, а $\{d_i, p_i\}$ — длины и сечения отдельных сегментов.

6.6 Конфигурации с большим количеством плеч

Приведённые соотношения справедливы для любого числа плеч. При четырёх плечах центральный угол уменьшается до 90°, и для каждого значения φ существует соответствующий наклон θ согласно общему соотношению из главы 6.2.

Четырехлучевая конфигурация допускает также вариант, при котором лучи направлены к вершинам правильного тетраэдра, а ручка исходит из центра. Такая конструкция имеет иную симметрию, чем трехлучевая, и в главе N1/09 рассматривается как отдельный вопрос.

Для числа плеч, превышающего четыре, порядок действий остаётся таким же. Пределы применимости определяются технологией изготовления и взаимным расстоянием между плечами при заданной толщине сечения.

Параметр β описывает общее направление главного радиального луча, независимо от его возможных дальнейших изгибов. Обозначения -CUSP и -FLARE используются только для артикулярного изменения направления вдоль луча и не заменяют значение β.

6.7 Артикулярные варианты

Главный радиальный излучатель может иметь изгиб в суставных узлах в соответствии с главой N1/07, пункт G. Изгиб является характеристикой конфигурации и добавляется к её названию в качестве суффикса.

Суффикс -CUSP обозначает изгиб в направлении оси тела, то есть внутрь. Таким образом, образуются TETRATIP-CUSP, TORAMID-CUSP или

TETRAMID-CUSP. Изгиб внутрь приближает концы плеч к оси и изменяет как положение, так и форму фокальной области.

Суффикс -FLARE обозначает изгиб в сторону от оси, то есть наружу. Концы отдаляются, а фокальная область расширяется.

Базовая конфигурация при таком обозначении остаётся однозначно определённой, а артикуляция является её дополнением. При многократном изгибе указывается количество артикуляций и артикуляционные углы в соответствии с главой N1/08, пункт G.

6.8 Допуски на геометрию

Точность, с которой должны соблюдаться углы, остаётся открытым вопросом, и ответ на него повлияет на весь дальнейший ход программы N1.

Причина этого изложена в главе N1/09. Вращательное состояние возникает в результате сложения пары форм колебаний с одинаковой частотой; отклонение от симметрии разделяет эти частоты, и вращение устанавливается в стационарный режим. Поэтому решающей величиной является расщепление вырожденной пары, обозначаемое Δf.

В исследовании допусков используется серия образцов с контролируемым отклонением угла, равным 0°, 0,5°, 1°, 2° и 5°. На каждом образце измеряется Δf и одновременно амплитуда вращательной составляющей. Результатом является кривая зависимости Δf от отклонения, которую можно сравнить с прогнозом расчетной модели согласно главе N1/17.

Результат напрямую влияет на бюджет и технологию. Если изделие выдерживает отклонение ±5°, производство становится возможным, а независимая репликация — реалистичной. Если требуется ±0,1°, то основным направлением программы N1 становятся точность обработки и метрология.

По сравнению с единичным данным кривая имеет ещё одно преимущество: непрерывную зависимость можно сравнивать с моделью точка за точкой, что даёт более весомое доказательство, чем разовое наблюдение. Соответствующие гипотезы — H-N1-26 и H-N1-51.

6.9 Открытость таксономии

Указанные конфигурации представляют собой исходный набор, выбранный для наглядности и связи с основными пространственными расположениями. Набор остается открытым, и в него могут быть добавлены другие геометрически значимые классы.

В сферу применения таксономии входят, в частности, асимметричные конфигурации с неравными углами между плечами, спиралевидные плечи с изменяющейся геометрией по длине, многослойные расположения с плечами

на нескольких уровнях и взаимно переплетенные плечи в форме спирали или плетения согласно главе N1/07, пункт F.

Шесть базовых конфигураций согласно главе 6.3 представляют собой опорные точки непрерывного геометрического семейства C3. Открытым экспериментальным вопросом остаётся, обладают ли геометрически привилегированные точки этого семейства также особыми или взаиморазличимыми физическими свойствами; этот вопрос затрагивает гипотеза H-N1-25.

Отдельной открытой ветвью является полная геометрическая таксономия C3 направлений, выведенных из правильных и других симметричных многогранников. Её систематическая обработка по своему объёму вышла бы за рамки данной главы и является подходящим предметом отдельной теоретической работы или исследования независимой исследовательской группы.

07 НОРМАТИВНАЯ ТЕРМИНОЛОГИЯ

Следующая терминология является обязательной для всего корпуса. Без неё невозможно составлять осмысленные предложения об измерении. Когда два человека говорят «плечо» и каждый из них имеет в виду что-то другое, результаты невозможно сравнить.

Для точного определения понятия «TRIAURAL» в целом и согласования терминологии в целях совместных исследований необходимо однозначное обозначение отдельных сегментов, компонентов и геометрических отношений. Приведённые ниже термины в документах N1, N2 и N3 используются исключительно в значении, указанном ниже.

7.1 Типы полей

Скалярное поле присваивает каждой точке пространства и времени одно число без направления; типичными примерами являются температура, давление или электрический потенциал. Векторное поле присваивает как значение, так и направление, например скорость частиц или напряженность электрического поля. Тензорное поле сопоставляет набор взаимосвязанных компонент, что необходимо, например, при описании напряжений в твёрдом теле.

Акустическое давление является скалярным полем. Скорость частиц представляет собой векторное поле, и в линейном потенциальном описании её можно выразить как градиент скалярного потенциала скорости.

Отсюда следует условие, определяющее программу N1: вращение градиента равно нулю, так что поле скорости частиц в данном приближении является безвихревым. Поэтому в документе не используется термин «акустический вихрь» в смысле локальной вихревости скорости частиц. Речь идет о фазовой структуре волнового поля, которая может содержать фазовую сингулярность и нести орбитальный импульс, как это подтверждается в рецензируемой литературе по акустическим вихрям. Анализ этих явлений приведён в главе N1/09.5.

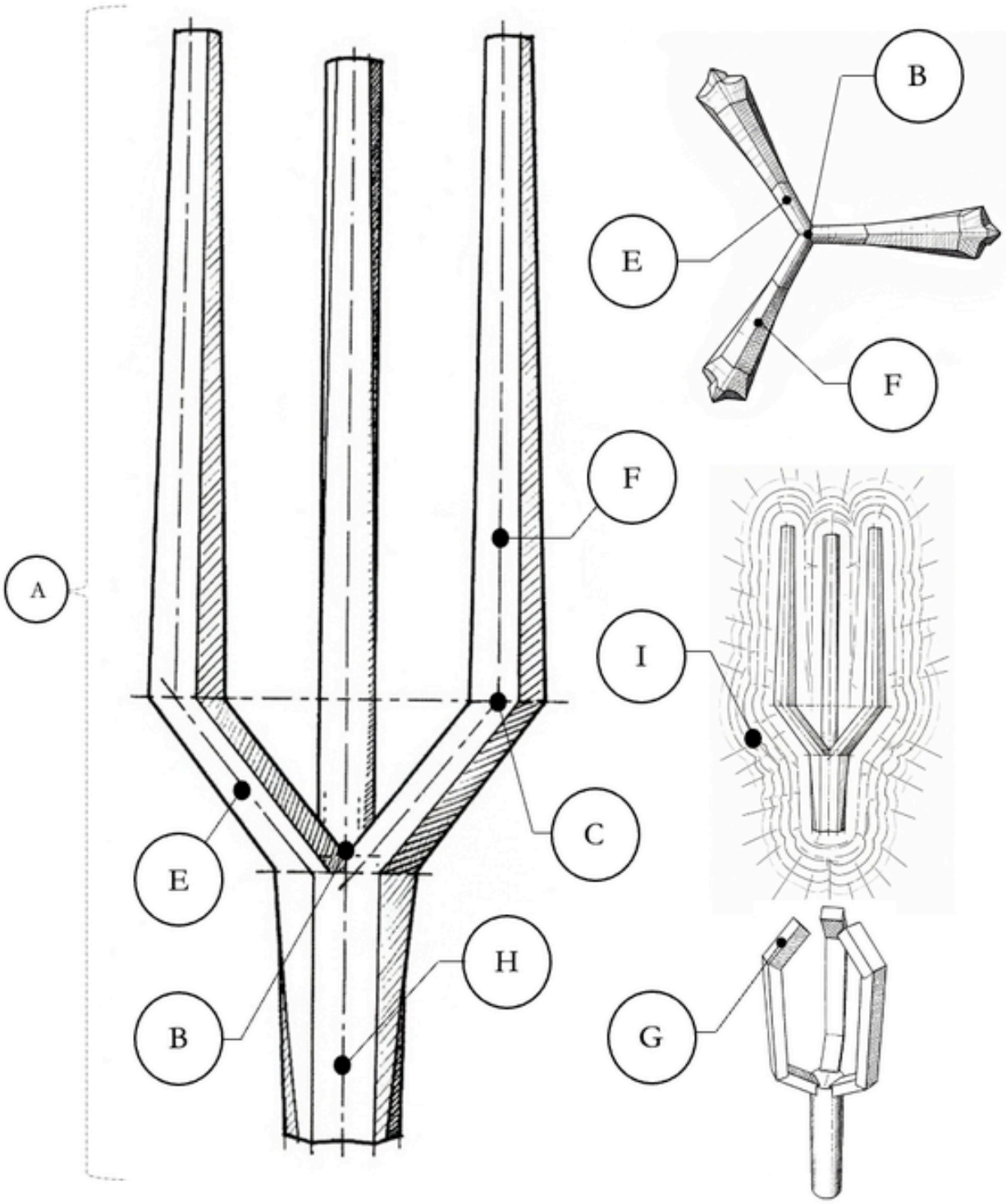
Во избежание путаницы необходимо разграничить пять величин:

- Акустическое давление — это скалярное поле; понятие вращения к нему напрямую не относится.
- Скорость частиц в линейном потенциальном приближении является градиентом скалярного потенциала, поэтому её вращение равно нулю.
- Фазовая сингулярность — это место, где комплексная амплитуда давления стремится к нулю, а фаза не определена; её существование не противоречит нулевому вращению поля скоростей частиц.

- Орбитальный момент импульса является свойством волнового поля, связанным с его пространственной, в частности азимутальной, фазовой структурой; его нельзя отождествлять с локальной вихревостью скорости частиц [14].
- Акустическое течение — это нелинейное явление второго порядка. Его усреднённое по времени поле скоростей может нести циркуляцию и представляет собой механизм, отличный от линейной осцилляции акустического поля [15, 16].

Таким образом, нулевая ротация поля скоростей частиц в линейном потенциальном описании не исключает ни фазовой сингулярности, ни орбитального момента импульса. Утверждения документа о «ротационной составляющей» в этом смысле относятся к данным свойствам волнового поля; акустическое течение рассматривается отдельно как возможный нелинейный механизм.

7.2 Сегменты и части резонатора



PIIC-N1-09: Сегменты и части резонатора. Техническая визуализация пространственной геометрии и расположения основных конструктивных элементов монолитной структуры.

A) КОРПУС РЕЗОНАТОРА

Под корпусом понимается весь монолитный или модульный объект с определённой геометрией, описанной в главе N1/06.

B) ЦЕНТРАЛЬНЫЙ РЕЗОНАНСНЫЙ УЗЕЛ

Место совместного соединения центрального волновода и несущих плеч резонатора. В этом узле происходит механическая связь отдельных сегментов и передача колебаний между ними. Его модальное поведение, амплитудные и фазовые соотношения являются предметом расчетного и экспериментального анализа.

C) АРТИКУЛЯРНЫЙ УЗЕЛ

Место соединения несущего плеча и главного радиального излучателя, либо соединения отдельных сегментов главного радиального излучателя — например, если главный радиальный излучатель имеет изгиб, то есть разделен на несколько меньших сегментов под углами сочленения.

D) СЕГМЕНТ

Любая самостоятельная часть целого. Это может быть несущее плечо, главный радиальный луч или артикуляр.

E) НЕСУЩЕЕ ПЛЕЧО

Сегмент, соединяющий центральный резонансный узел и главный радиальный излучатель, либо часть, соединяющая центральный узел и следующую артикуляру главного радиального излучателя. Его поперечное сечение, как правило, совпадает с поперечным сечением главного радиального излучателя, однако это не является обязательным условием. Длина и наклон несущего плеча определяют положение артикуляционного узла относительно центральной оси резонатора. Последующая пространственная ориентация главного радиального излучателя определяется параметром β в соответствии с главой N1/06.5. Несущий плечо может быть соединен с главным радиальным излучателем под острым или тупым углом, либо может иметь дугообразную форму.

F) ГЛАВНЫЙ РАДИАЛЬНЫЙ ИЗЛУЧАТЕЛЬ

Основной колеблющийся сегмент плеча резонатора. В механически возбуждаемых акустических резонаторах он может служить местом прямого удара или другого возбуждения. Его длина, сечение, материал и геометрия существенно влияют на модальные свойства резонатора; однако результирующие собственные частоты зависят от механического поведения всей связанной конструкции. Поперечное сечение обычно бывает квадратным, круглым или треугольным, однако может иметь форму любой плоской геометрической фигуры. Главный радиальный излучатель может изменять свою геометрию по длине, например, в виде спирали или с переменным диаметром. Отдельные главные радиальные лучи могут

быть параллельны друг другу или бесконтактно переплетены в пространстве, они могут сближаться или расходиться; их взаимное геометрическое соотношение может быть выражено ломаной спиралью, переплетённой многоугольной цепочкой, зигзагообразной спиралью или произвольным плетением и их комбинациями. Его базовая ориентация относительно центральной оси тела определяется параметром β в соответствии с главой N1/06.5.

G) ЭЛЕМЕНТЫ ГЛАВНОГО РАДИАЛЬНОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ

Части, из которых может, но не обязательно состоит главный радиальный излучатель. Если он имеет изломы в своих частях и тем самым разделен на отдельные сегменты — будь то в рамках монолитной или модульной конструкции — такие сегменты называются артикулярами. В случае регулярных вариантов шарниров они могут располагаться на равных расстояниях друг от друга и иметь одинаковый угол сгиба; однако это не является обязательным условием определения. Количество шарниров не ограничено, а углы сгиба могут быть произвольными.

H) ЦЕНТРАЛЬНЫЙ ВОЛНОВОД (РУЧКА)

Центральная часть резонатора служит для удержания устройства в руке оператора, для крепления на подставке или для механического соединения с возбудителем. При ручном использовании она одновременно образует механический интерфейс между корпусом резонатора и телом оператора. Во всех случаях она представляет собой механический путь между центральным резонансным узлом и местом захвата, крепления или возбуждения. Характер колебаний и передача энергии в этом сегменте рассматриваются в главе N1/14.

I) ТРИАУРАЛЬНОЕ ПОЛЕ

Область вокруг триаурального резонатора, в которой при его возбуждении отслеживается пространственное распределение измеряемых физических величин. При акустических измерениях речь идет, в частности, о результате суперпозиции волн, связанных с колебаниями отдельных плеч. Диапазон и структура поля определяются путем измерений в соответствии с главами N1/09 и N1/10.

08 ОПРЕДЕЛЕНИЕ УГЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ

Углы в программе N1 играют ту же роль, что и размеры зубчатых колес в часовом деле. Следующие определения указывают, какой угол где измеряется — чтобы можно было сравнить два резонатора даже в том случае, если их изготовили два человека на двух разных континентах.

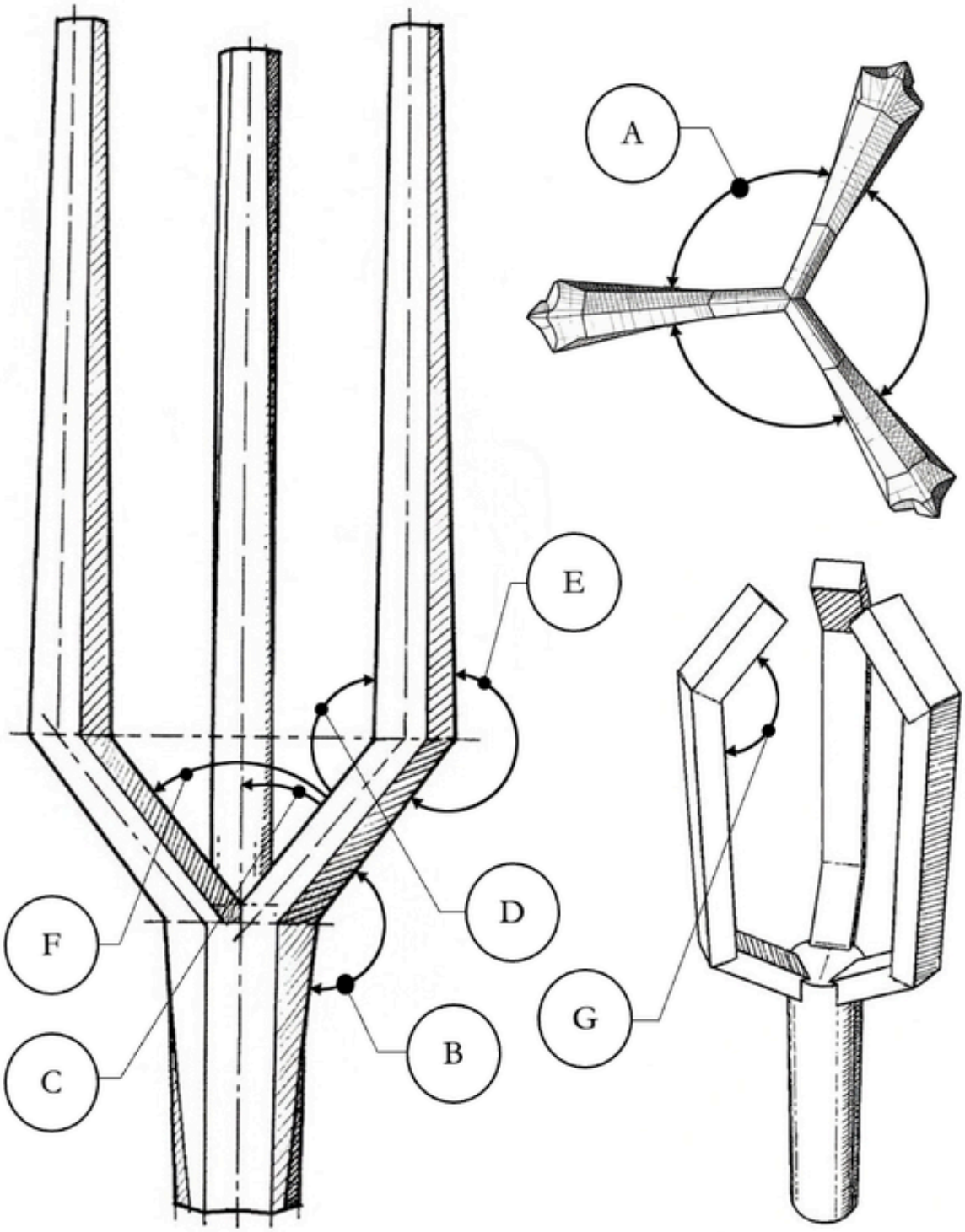


РИС. N1-10: Техническая визуализация углов. Изображение определяет типы и расположение отдельных углов в рамках монолитной структуры.

A) ЦЕНТРАЛЬНЫЙ УГОЛ СЕГМЕНТА

Угловое расстояние между плечами при виде сверху, то есть деление окружности резонатора. При трёх плечах оно составляет 120°, при четырёх — 90°, при пяти — 72°, при шести — 60°, при семи — 51,4286°, при восьми — 45°, при девяти — 40°, при десяти — 36°, при одиннадцати — 32,7273° и при двенадцати — 30°.

B) НИЖНИЙ УГОЛ НАКЛОНА НЕСУЩЕГО ПЛЕЧА (DSNR)

Угол раскрытия резонатора между центральным волноводом и несущим плечом.

C) ВЕРХНИЙ УГОЛ НАКЛОНА НЕСУЩЕГО ПЛЕЧА (HSNR)

Угол раскрытия между центральной осью резонатора и несущим плечом. Используется соотношение HSNR = 180° − DSNR.

D) ВНУТРЕННИЙ УГОЛ АРТИКУЛЯЦИИ НЕСУЩЕГО ПЛЕЧА (VNUANR)

Внутренний угол, который образуют несущее плечо и главный радиальный излучатель. Для резонаторов, главные радиальные излучатели которых параллельны оси корпуса, определяемой ручкой, выполняется соотношение VNUANR = DSNR.

E) ВНЕШНИЙ УГОЛ АРТИКУЛЯЦИИ НОСЯЩЕГО ПЛЕЧА (VOUANR)

Внешний угол, который образуют несущее плечо и главный радиальный излучатель. При параллельном расположении выполняется VOUANR = HSNR + 180°.

F) ВЕРШИННЫЙ УГОЛ НЕСУЩИХ ПЛЕЧ

Угол, который образуют между собой два соседних несущих плеча или их первые шарниры. Если бы мы удалили два соседних несущих плеча из резонатора, образовался бы объект в форме буквы V; этот угол определяет раскрытие его плеч.

G) НАКЛОН ГЛАВНОГО РАДИАЛЬНОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ (β)

Знаковый параметр, определяющий радиальный наклон оси главного радиального излучателя относительно центральной оси резонатора. Значение $\beta = 0°$ обозначает параллельное расположение, $\beta > 0°$ — дивергентное, а $\beta < 0°$ — конвергентное расположение. Подробные соглашения о знаках определены в главе N1/06.5.

H) АРТИКУЛЯРНЫЕ УГЛЫ

Углы изгиба главного радиального излучателя в местах артикуляций. Они вызывают искривление излучателя в направлении к центральной оси

резонатора или от неё. Количество артикуляций не ограничено, а артикулярные углы могут быть произвольными.

Точность, с которой должны соблюдаться эти углы, пока неизвестна. Речь идет об отдельном исследовательском вопросе, который разрабатывается в главе N1/06.8 в качестве исследования допусков; его результат напрямую определяет, какую технологию производства требует программа N1.

09 ФИЗИЧЕСКАЯ ОСНОВА

Почему трёхплечевой камертон должен работать иначе, чем двухплечевой? Эта глава строится пошагово: что известно о звуке, что из этого следует для нашей геометрии, и, главное, — с помощью каких измерений можно было бы доказать, что мы ошибаемся. Это самая важная глава документа, поскольку на ней основано всё остальное.

9.1 Отправная точка: как работает двухплечевой камертон

Классический камертон имеет два плеча, которые в основном изгибном режиме колеблются симметрично друг относительно друга. При раскрытии оба свободных конца удаляются от центральной плоскости, а их поперечные реакции в общей основе имеют противоположное направление. Эти реакции в месте соединения в значительной степени гасят друг друга, так что на рукоятку передаётся лишь небольшая поперечная составляющая движения. Поэтому рукоятка действует преимущественно в продольном направлении [17].

Этот эффект легко наблюдать: при медленном вращении звучащей камертона вокруг его оси в фиксированной точке изменяется измеренная или воспринимаемая амплитуда звука. Излучение обоих плеч, в зависимости от направления наблюдения, суммируется с разной фазой, так что в некоторых направлениях происходит усиление, а в других — значительное подавление акустического давления.

Акустическое излучение классического камертона в ближнем поле имеет характерную многолепестковую направленность с выраженными минимумами. С увеличением расстояния пространственный образ изменяется и в дальнем поле приобретает более простую направленную структуру [17]. Такое поведение относится к стандартно описанным свойствам двухплечевого камертона [D].

9.2 Что изменится при трёх плечах

Теперь рассмотрим тело с тремя геометрически эквивалентными плечами, расположенными под углом 120°. Если плечи идентичны по материалу и геометрии, естественным вопросом является: какие модальные классы допускает симметрия такого тела?

Ответ дает теория симметрии. Для тел с тройной ротационной симметрией соответствующий несимметричный модальный класс может образовывать двумерную вырожденную пару: две линейно независимые формы колебаний с одинаковой собственной частотой, которые отличаются друг от друга пространственной ориентацией [18].

С точки зрения симметрии можно различить полностью симметричные моды, при которых три плеча ведут себя эквивалентно, и несимметричный двумерный модальный класс, в котором возникает вырожденная пара. В простейшем симметричном случае все три плеча отклоняются одновременно одинаково, как будто тело «дышит». Несимметричный класс описывается парой независимых друг от друга форм колебаний с одинаковой частотой.

Эта пара называется вырожденной парой.

Обозначение симметрии в специализированной литературе записывается сокращением. Буква C обозначает циклическую ротационную симметрию, а число — количество эквивалентных поворотов за один полный оборот. Таким образом, симметрия C3 означает, что тело после поворота на 120° совпадает с самим собой. Сходными случаями являются C2 при повороте на 180° и C4 при повороте на 90°.

Симметрия тела ограничивает, какие модальные классы могут существовать ещё до изготовления конкретного экземпляра. При самой симметрии C2 не возникает аналогичного двумерного модального класса, который вынуждал бы вырождение симметрией. Поэтому двухплечевой резонатор не имеет такой же симметрически защищённой пары мод, как трёхплечевое тело с симметрией C3 или C3v.

Более полное обозначение для идеально симметричного трехраменного резонатора — C3v, где строчная буква обозначает наличие зеркальных плоскостей, проходящих через плечи. При хиральной модификации тела эти плоскости могут исчезнуть, и останется только ротационная симметрия C3.

9.3 Почему может возникнуть вращение

Если существуют две линейно независимые формы колебаний с одинаковой собственной частотой, их можно линейно комбинировать. Если обе составляющие возбуждаются с подходящим соотношением амплитуд и взаимным фазовым сдвигом примерно 90°, результирующая суперпозиция может создать пространственно вращающийся узор деформации. Однако само по себе существование вырожденной пары не определяет, какая конкретно комбинация мод действительно сформируется при данном способе возбуждения.

Полезную математическую аналогию дает трехфазный электродвигатель. Три катушки, расположенные с шагом 120° и возбуждаемые сигналами с соответствующим фазовым сдвигом, создают вращающееся магнитное поле. При этом в источнике механически не вращается сама система катушек; вращается пространственный узор поля. Эта аналогия служит для иллюстрации фазово-прогрессирующей суперпозиции, а не в качестве доказательства того, что в резонаторе действует тот же физический механизм.

Если бы при колебаниях трёх плеч образовался устойчивый циклический фазовый сдвиг примерно на 0°, 120° и 240°, можно было бы ожидать пространственно-прогрессирующей фазовой структуры вокруг триауральной оси. Возникнет ли такое состояние спонтанно при импульсном или синфазном возбуждении конкретного резонатора — это экспериментальный вопрос, затронутый гипотезой H-N1-01.

Две величины, описывающие одно и то же состояние

В этом месте текста встречаются два разных фазовых сдвига, и их необходимо различать, поскольку их перепутывание привело бы к неверному выводу.

В идеальном двумерном модальном подпространстве одно и то же фазово-прогрессирующее состояние можно описать либо с помощью трёх пространственно разнесённых компонент с циклическим сдвигом 120°, либо с помощью двух независимых модальных координат в квадратуре, то есть со сдвигом 90°.

Причина, по которой мод два, а не три, вытекает из структуры соответствующего несимметричного модального класса. Три амплитудные составляющие плеч в нём не представляют собой три независимых степени свободы; состояние можно полностью описать двумя независимыми модальными координатами.

Вращающееся состояние в таком двумерном пространстве можно создать путем сложения двух независимых составляющих в квадратуре, то есть с фазовым сдвигом 90°. Это та же математика, что и при параметрическом описании окружности, где одна координата отслеживает косинус, а вторая — синус.

Преобразование между этими двумя способами записи в электротехнике имеет устоявшуюся форму в преобразовании Кларка, известном также как αβ-преобразование [19]. Оно преобразует трёхкомпонентную систему abc в две ортогональные координаты α и β. В сбалансированной синусоидальной трехфазной системе со сдвигом 120° результирующие составляющие α и β образуют квадратурную пару и описывают один и тот же вращающийся вектор в двумерной плоскости. В управлении электродвигателями это стандартно используемый математический инструмент.

Преобразование Кларка здесь служит математической аналогией преобразования между трёхкомпонентным и двухкомпонентным описанием; речь не идёт о том, что механические моды резонатора тождественны электрической трёхфазной системе. Речь идёт о двух математически эквивалентных описаниях одного и того же идеального фазово-прогрессирующего состояния.

Поскольку соответствующее модальное подпространство имеет две независимые степени свободы, его состояние в принципе можно

восстановить с помощью двух независимых и удачно расположенных каналов сбора данных. Третий канал предоставляет избыточную информацию, подходящую для проверки согласованности, симметрии и погрешности измерения; поэтому трехканальный магнитный датчик, описанный в главе N1/13.3, спроектирован именно таким образом.

Теория колебаний, таким образом, допускает существование вращающейся суперпозиции в рамках вырожденной пары. Однако эксперимент должен отдельно проверить, действительно ли конкретный резонатор обладает такой парой, возбуждает ли его выбранный способ возбуждения в необходимом амплитудном и фазовом соотношении и остается ли результирующее состояние стабильным или смешивается с симметричными и другими модальными составляющими.

9.4 Условие, на котором всё это держится

Вращающаяся суперпозиция является наиболее простой и стабильной тогда, когда оба члена вырожденной пары имеют одинаковую собственную частоту. Если вырожденность нарушается и частоты мод расходятся на величину Δf, их взаимная фазовая связь начинает изменяться во времени. Поэтому чистое вращающееся состояние не обязательно останется стационарным и может переходить в пульсирующую, стоячую или гибридную модальную суперпозицию.

Степень проявления этого эффекта зависит от величины расщепления Δf, коэффициентов качества отдельных мод, их затухания, способа возбуждения и времени наблюдения. Поэтому не существует общего предела, при котором любое, даже самое малое, расщепление автоматически означало бы исчезновение вращательной составляющей; такой предел необходимо определять экспериментально.

Дегенерацию может нарушить любое изменение, которое снижает соответствующую симметрию или по-разному влияет на отдельные плечи: неточность угла при изготовлении, неравномерное сечение или масса, внутреннее напряжение после обработки, несимметричное крепление или дополнительная механическая или магнитная нагрузка.

Если удастся измерить и управляемо изменять расщепление Δf на одном и том же образце резонатора, это станет мощным контрольным экспериментом. Тогда можно будет сравнить модальное и полевое поведение в почти вырожденном состоянии с тем же телом после намеренного нарушения симметрии. Будет отслеживаться не только наличие или отсутствие вращения, но и изменение доли симметричной, несимметричной и возможной вращательной составляющих в зависимости от Δf.

Исследование толерантности в соответствии с главой N1/06.8 поэтому изучает зависимость модального расщепления и выбранных показателей

ротационного или гибридного поведения от управляемого геометрического отклонения. Соответствующие гипотезы — H-N1-51 и H-N1-23.

Рассечение вырожденной пары обозначается

$$\Delta f = | f_1 - f_2 |,$$

где f_1 и f_2 — собственные частоты обоих членов пары.

9.5 Фазовая циркуляция и акустическое течение

В главе N1/07.1 проводится различие между безвихревым полем скоростей частиц в линейном потенциальном описании, фазовой циркуляцией волнового поля и нелинейным акустическим течением. Это различие необходимо также при интерпретации ротационных проявлений, наблюдаемых в окрестностях резонатора. Два механизма могут приводить к визуально схожим результатам, однако их физический смысл различен.

Путь A — фазовая сингулярность и орбитальный момент импульса

В акустическом вихре комплексная амплитуда давления вокруг оси имеет изменяющуюся по азимуту фазу. В идеальном случае на оси лежит фазовая сингулярность, где амплитуда снижается до нуля, а фаза не определена. Такая фазовая структура может быть связана с циркулирующей акустической интенсивностью и с ненулевым орбитальным моментом импульса [14]. При этом речь не идет о вихре скорости частиц в линейном потенциальном смысле, как описано в главе N1/07.1. Акустические вихри являются подтвержденным явлением и находят промышленное применение, например, в акустических пинцетах для бесконтактного удержания частиц [D].

Путь B — акустическое течение

Акустическое течение — это усреднённое по времени движение среды, возникающее вследствие нелинейных эффектов акустического поля, затухания, вязкости и взаимодействия с границами. В отличие от колебаний скорости частиц первого порядка речь идет о реальном переносе среды, который может создавать циркулирующее или вихревое поле скоростей. Это проявляется, например, в систематическом уносе трассирующих частиц в воздухе (например, капель глицеринового тумана) или жидкости [15, 16].

Оба механизма могут проявляться в простом наблюдении в виде вращения и могут возникать одновременно. Фазовая сингулярность проверяется путем картирования комплексного акустического давления, в частности амплитудного минимума и вращения фазы вокруг оси. Для визуализации усреднённого по времени течения можно использовать лазерный световой срез с трассирующими частицами; при количественной оценке установку

можно дополнить системой PIV. Крутящий момент на вставленном теле сам по себе не является достаточным отличительным признаком, поскольку его могут создавать оба механизма.

Поэтому в документе оба явления тщательно различаются, а гипотеза H-N1-39 сформулирована таким образом, чтобы можно было определить, какой механизм участвует в наблюдаемом вращательном проявлении.

Как фазовая циркуляция может сосуществовать со стабильным узором

Фазовая циркуляция и пространственно-стабильная амплитудная картина не исключают друг друга автоматически. Фазовая и амплитудная структуры — это два разных свойства комплексного поля, и их взаимная связь зависит от суперпозиции присутствующих мод. Поэтому стабильный узор, наблюдаемый на поверхности, нельзя на основании одного лишь его внешнего вида считать ни доказательством, ни опровержением фазовой сингулярности.

Первый вариант — суперпозиция противоположных азимутальных компонент с противоположным топологическим зарядом. Их сочетание может создать пространственно-стоячую азимутальную модуляцию даже в том случае, если отдельные компоненты по отдельности несут фазовую циркуляцию. Конкретное количество и положение амплитудных минимумов зависят от присутствующих мод, а также от их относительных амплитуд и фаз.

Второй возможностью является расщепление изначально вырожденных мод. Разница в их собственных частотах изменяет временное развитие относительной фазы и может привести к стоячей, пульсирующей или гибридной зависимости вместо стабильной вращающейся суперпозиции. Эта возможность напрямую связана с главой N1/09.4.

Третьим вариантом является то, что наблюдаемый узор на поверхности возникает преимущественно за счёт гидродинамического механизма, например, нестабильности Фарадея, и не обязательно точно повторяет фазовую структуру акустического поля. Вращение или фазовая циркуляция в другом пространстве системы и стабильный узор на поверхности могут тогда представлять собой два разных, хотя и взаимно возбуждаемых явления. Эту возможность проверяет гипотеза H-N1-28.

Окончательное разграничение невозможно провести на основании одной только фотографии узора. Фазовая сингулярность должна быть подтверждена измерением комплексного поля давления: в окрестности предполагаемой оси ищется локальный минимум амплитуды и одновременно ненулевой целочисленный оборот фазы по замкнутой траектории. Стабильный киматический узор может служить дополнительным признаком, но не доказательством наличия этой структуры.

Количественной характеристикой фазовой сингулярности является топологический зарядl . Это целое число, определяемое общим изменением фазы за один замкнутый оборот вокруг сингулярности [20]. Его определение обеспечивает более однозначный тест фазовой циркуляции, чем сама амплитудная карта.

9.6 Измерение момента импульса

Если акустическое поле передаёт момент импульса на встроенное тело, эта передача должна проявляться в виде измеримого крутящего момента. Одним из способов его обнаружения является торсионная мишень: небольшой поглощающий или частично поглощающий диск, подвешенный на тонкой нити в наблюдаемой области поля [21, 22]. Поворот мишени регистрируется оптически или другим бесконтактным способом, и по её угловому отклику после калибровки можно определить действующий крутящий момент.

Однако само по себе отклонение или вращение мишени не доказывает, что источником момента является орбитальный момент импульса акустического поля. Такой же механический эффект может возникать и под действием акустического течения, несимметричной нагрузки давления, вибраций подвески или других экспериментальных артефактов. Поэтому измерения должны включать независимые проверки этих механизмов.

Нулевая гипотеза данного эксперимента состоит из двух частей: измеренный крутящий момент либо совместим с нулем в пределах погрешности измерения, либо объясняется известными механизмами переноса массы и несимметричного механического воздействия, в частности акустическим течением.

Поэтому для интерпретации в пользу передачи акустического орбитального момента импульса необходимо одновременно продемонстрировать несколько признаков: воспроизводимый ненулевой крутящий момент, фазовую структуру, совместимую с циркуляцией согласно главе N1/09.5, и отсутствие такого течения или иного механического воздействия, которое могло бы объяснить измеренный момент.

Акустическое течение контролируется с помощью трассирующих частиц и измерения усредненного по времени поля скоростей, например, путем визуализации течения в лазерном световом сечении. Фазовая сингулярность проверяется путем независимого картирования амплитуды и фазы комплексного акустического давления. Поэтому эти измерения оцениваются совместно, а не как взаимозаменяемые доказательства.

Мотивацией для этой проверки послужило также предварительное наблюдение металлической стружки в круглой емкости, закрепленной в

области венца резонатора. При некоторых возбуждающих частотах на видеозаписи наблюдалось направленное движение опилок с выраженной окружной составляющей. Поскольку ни частоты, ни другие условия эксперимента не фиксировались систематически, это наблюдение не позволяет определить механизм движения. Это может быть связано с акустическим течением, механической передачей колебаний емкости, асимметричным возбуждением или другими механизмами. Именно поэтому при повторении эксперимента необходимо одновременно измерять движение частиц, колебания емкости и фазовую структуру акустического поля.

Движение отдельных опилок при повторении можно количественно оценить с помощью визуального отслеживания траекторий или анализа PIV/PTV, в то время как виброметрические измерения емкости позволят отделить перенос, вызванный движением подложки, от движения среды.

Методическим предшественником картирования векторной интенсивности в окрестностях камертона является измерение на двухплечевом образце [23].

При изменении направления фазовой циркуляции должно измениться и знака измеренного крутящего момента, если этот момент причинно связан с данной фазовой структурой.

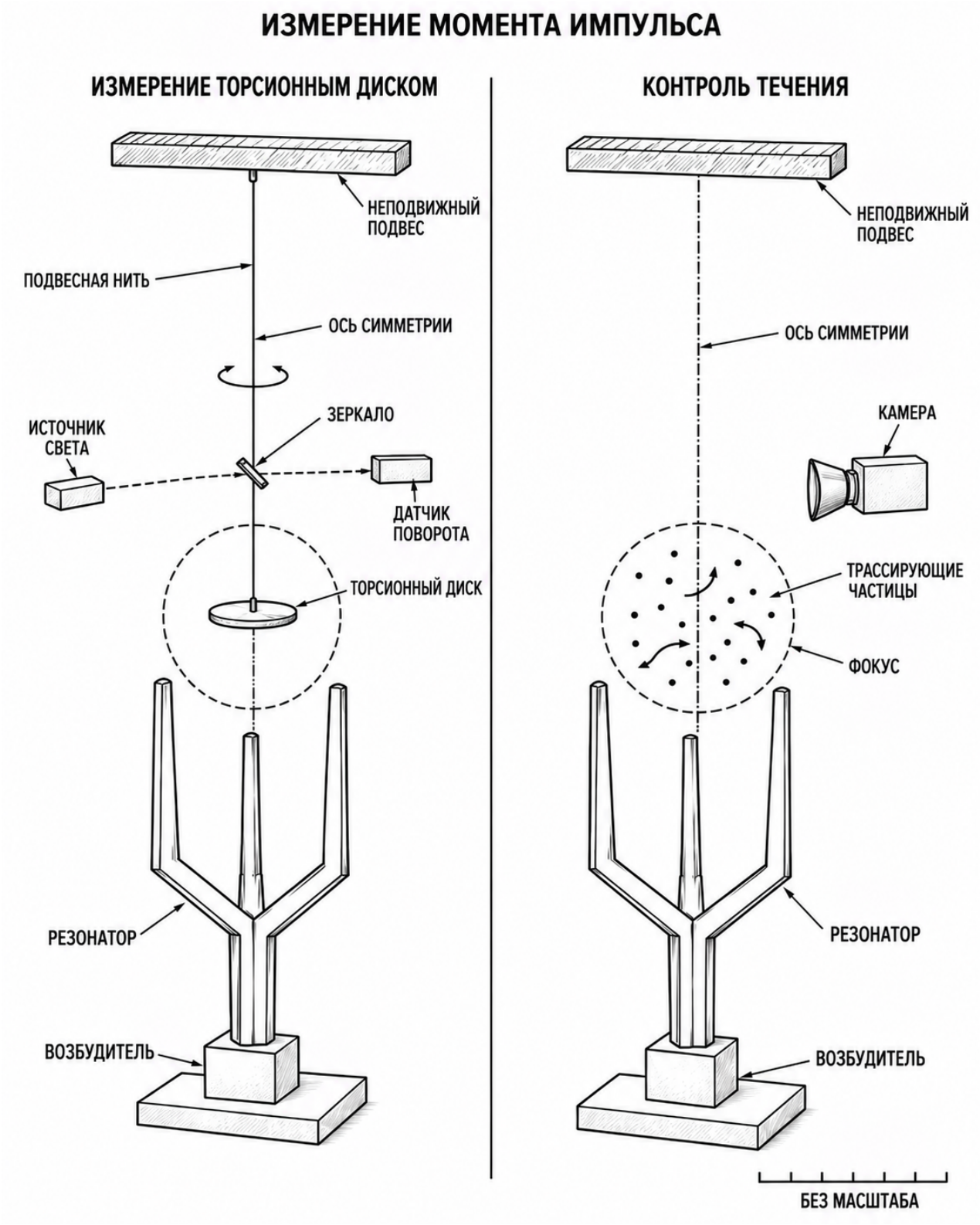


РИС. N1-11: Схема измерения передачи момента импульса — торсионный диск с датчиком угла поворота и параллельным контролем акустического течения с помощью трассирующих частиц.

9.7 Масштаб и вытекающие из него следствия

В данном подразделе предыдущие утверждения соотносятся с отношением характерного размера резонатора к длине звуковой волны.

При основных частотах в сотнях герц звуковая волна в воздухе имеет длину порядка десятков сантиметров до примерно одного метра, тогда как характерный размер резонатора значительно меньше. Поэтому в этом диапазоне резонатор работает в режиме, при котором его размер по отношению к длине волны невелик.

В случае субволновых источников создание явно структурированного и направленно-стабильного дальнего поля становится всё более сложной задачей. Высшие пространственные компоненты поля излучаются менее эффективно, и значительная часть структуры может оставаться связанной с ближним полем источника. Речь, таким образом, идет не о резкой границе типа «возникает — не возникает», а о постепенном изменении эффективности и пространственного характера поля с изменением отношения размера источника к длине волны.

Для триаурального резонатора это означает, что на слышимых частотах ротационные или фазово-циркулирующие структуры, ожидаемые согласно H-N1-01 и H-N1-06, следует в первую очередь искать в ближнем поле, где пространственная структура может быть более выраженной, чем в дальнем поле. Если необходимо исследовать излучаемый вихревой пучок или орбитальный момент импульса, передаваемый в дальнее поле, решающее значение имеет отношение характерного размера резонатора D к длине волны λ .

Поэтому при каждом измерении указывается, по крайней мере, безразмерное соотношение

$$\frac{D}{\lambda},$$

или, соответственно, эквивалентный волновой параметр

$$kD = \frac{2\pi D}{\lambda},$$

где D представляет собой выбранный характерный размер резонатора, а k — акустическое волновое число.

При интерпретации результатов будут различаться ближнее поле, переходная область и дальнее поле. Одна и та же геометрическая структура

может демонстрировать различную амплитудную и фазовую организацию в отдельных областях, поэтому выводы, сделанные в одной области, не следует автоматически переносить на другую.

Вопрос масштабирования более подробно рассматривается в главе N1/09.12, где исследуется переход к меньшим резонаторам и более высоким рабочим частотам.

9.8 Состояние техники: как сегодня создаются акустические вихри

Чтобы точно определить предмет исследования, необходимо отличить его от способов, с помощью которых акустические вихри и другие поля с азимутальным фазовым ходом создаются в существующих системах. С точки зрения происхождения пространственной фазовой организации для целей настоящего документа можно выделить три рабочих класса.

Класс A — активный фазированный источник

К этому классу относятся системы из нескольких преобразователей, амплитуда и фаза которых управляются электронным способом. Сюда входят фазированные поля, голографические акустические пинцеты [25], системы с управляемым топологическим зарядом [26] и генерация структурированных поверхностных акустических волн с помощью инверсного управления [27].

Азимутальная фазовая структура в данном случае задаётся возбуждающими сигналами. Изменение электронной фазировки может, таким образом, изменять свойства результирующего поля без механического изменения самой системы.

Класс B — пассивный волновой трансформатор

Второй класс составляют структуры, которые пространственно преобразуют волну, создаваемую отдельным источником. К ним относятся спиральные фазовые пластины [28], метаповерхности и метаматериальные апертуры [29, 30], акустические голограммы [31], спиральные дифракционные решетки [32] и другие пассивные элементы, предназначенные для создания требуемого фазового хода.

К этой группе можно отнести также системы, в которых сама излучающая структура является резонансной или поддерживает волноводные механические волны, при условии, что требуемая азимутальная фазовая структура определяется конструктивным или возбуждающим элементом, который намеренно вносит её в систему. Примером может служить резонаторный слой с азимутально разделёнными секторами [34] или упругая структура, в которой волновые колебания при излучении в жидкость создают поле с орбитальным моментом импульса [35].

Класс C — собственная модальная динамика резонатора

Для целей настоящего документа рабочим классом C обозначается случай, в котором пространственно-прогрессирующая фазовая структура возникает из собственной модальной динамики конечного резонатора, без электронно заданного азимутального фазового градиента и без отдельного пассивного элемента, предназначенного для его создания.

Предметом исследования является, в частности, возможность того, что вырожденная пара несимметричного модального класса трёхлучевого тела создаст при определённых условиях вращающуюся суперпозицию в соответствии с главой N1/09.3. Само по себе наличие вырожденной пары не гарантирует такого состояния. Эксперимент должен определить, возникнет ли необходимое соотношение амплитуд и фаз при конкретном способе возбуждения и является ли результирующая пространственная структура измеримой.

В литературном корпусе, проанализированном в соответствии с протоколом N1/02.5, не была выявлена работа, которая однозначно подтверждала бы аналогичный случай: трехлучевой монолитный резонатор с соответствующей ротационной симметрией, в котором измеримая азимутальная фазовая циркуляция возникала бы из собственного модального отклика без намеренно введенного азимутального фазового градиента. Этот вывод действителен только в пределах проведенного поиска и не является утверждением об абсолютной новизне.

Что должен экспериментально доказать класс C

Решающим критерием является не само существование акустического вихря как такового; оно известно [14]. Точно так же недостаточно доказать, что механически колеблющееся тело может излучать поле с орбитальным моментом импульса.

Для отнесения исследуемого резонатора к рабочему классу C необходимо доказать связь между его собственной модальной структурой и наблюдаемым фазовым ходом. Поэтому измерения должны определить:

- содержит ли резонатор предполагаемую вырожденную или почти вырожденную пару;
- образуется ли при выбранном способе возбуждения между его компонентами определённая во времени амплитудная и фазовая зависимость;
- соответствует ли этому механическому состоянию пространственно распространяющаяся фаза акустического поля;
- как изменится результат при управляемом нарушении симметрии или при изменении способа возбуждения.

Особенно строгим испытанием является импульсное или синфазное возбуждение, при котором азимутальный фазовый градиент намеренно не вводится возбуждающей системой. Если даже в этих условиях будет продемонстрирована воспроизводимая фазовая циркуляция и её связь с собственными модами резонатора, это станет прямым подтверждением механизма, определённого в данном классе работ.

Возможные применения акустических полей с орбитальным моментом импульса включают, например, бесконтактную манипуляцию частицами, визуализацию и передачу информации [36, 37]. В данном документе они приводятся лишь в качестве технологического контекста и не являются утверждением о применимости конкретного триаурального резонатора.

9.9 Двухчастотное возбуждение и динамика разностной частоты

Если резонатор возбуждается одновременно двумя близкими частотами f_1 и f_2, их линейная суперпозиция создает амплитудно- и фазомодулированный сигнал с характерной временной шкалой, определяемой разностью

$$\Delta f = | f_2 - f_1 |.$$

Эта разностная частота описывает скорость изменения огибающей или взаимного фазового соотношения обеих составляющих. Однако в линейной системе она сама по себе не представляет собой новую самостоятельную акустическую частотную составляющую.

Если каждая из возбуждаемых частот имеет различную пространственную модальную или фазовую структуру, их суперпозиция может создать поле, амплитудные максимумы, минимумы или фаза которого изменяются во времени с периодом Δf. Такой ход может быть значительно медленнее, чем сами основные колебания f_1 и f_2, при этом пространственная структура остается определяемой более высокими частотами и соответствующими модами резонатора.

Это позволяет экспериментально разделить два масштаба явления: быстрые механические и акустические колебания при f_1 и f_2 и более медленную временную эволюцию их суперпозиции при Δf. Такой режим может быть подходящим для наблюдения прецессии, пульсаций или периодической перегруппировки модального образа, особенно если возбуждаются две близкие собственные частоты или расщепленная вырожденная пара.

Разностная частота, возникающая в результате нелинейного смешивания

Необходимо отличать истинное частотное смешение от линейного биения. Если система содержит достаточно сильную нелинейность, в частотном спектре могут появиться новые компоненты, в том числе разностная частота:

$$f_{DF} = | f_2 - f_1 |.$$

Такая составляющая уже представляет собой самостоятельный результат нелинейного взаимодействия и должна быть экспериментально подтверждена непосредственно в спектре. Её возникновение невозможно вывести только из наличия двух возбуждающих частот.

Поэтому для триаурального резонатора необходимо различать два вопроса: создаёт ли двухчастотное возбуждение медленно изменяющуюся пространственную суперпозицию в линейном режиме и появляется ли при более высокой амплитуде также измеримая нелинейная составляющая на разностной частоте. Речь идёт о гипотезе H-N1-57.

9.10 Имеющиеся на данный момент наблюдения

Следующие наблюдения были сделаны в ходе разработки устройств и не являются результатами систематических измерений. Мы приводим их потому, что именно они привели к формулировке гипотез в данном документе — и приводим их со всеми имеющимися ограничениями.

Таким образом, это предварительные признаки, а не доказательства, и в данном тексте они обозначены регистром [O] в соответствии с главой N1/01.3. Их функция — показать, откуда возникли вопросы, а не дать на них ответы.

Мы намеренно приводим даже те, которые позже могут оказаться артефактами. Опустить наблюдение только потому, что оно не подтвердилось, было бы хуже, чем привести его с пометкой о его слабых сторонах.

Обзор наблюдений:

• **Киматика на водной поверхности — сравнение двухплечевого и трёхплечевого камертона.** Фото- и видеозапись от 11 июля 2025 года, на которой плечи были погружены в воду. Материал резонатора: алюминий; глубина воды: 4 см; ёмкость: пластиковый цилиндр высотой 7,5 см и диаметром 10 см. Без контрольного измерения.

• **Вращательное движение металлической стружки в круглой емкости, расположенной в верхней части резонатора.** При определённых возбуждающих частотах неоднократно наблюдалось направленное движение стружки по круговой или приблизительно круговой траектории. Условия эксперимента не фиксировались систематически, а воспроизводимость не

была количественно оценена. Поэтому данное наблюдение не определяет механизм движения и может включать в себя ряд механических, акустических или потоковых воздействий.

• **Осаждение растворенного минерала в пробирке с минеральной водой «Fatra», помещённой в фокальную область ЕМТ.** Зафиксировано на фотографиях. Узор постепенно растворялся при открытии и манипуляциях, что указывает на метастабильную структуру. Частота, время воздействия и точный состав воды не были зафиксированы; отсутствовал контрольный образец. Методологические последствия подробно рассмотрены в главе N1/11.

• **Волокна над свободными концами плеч в стеклянной камере, заполненной глицериновым туманом.** После стабилизации потока наблюдались две–три волокнистые структуры, направленные вверх и слегка в стороны. Наблюдение не было зафиксировано; частота и мощность неизвестны. Анализ возможных механизмов приведён в главе N1/10.10.

• **Характерное удлинение реверберации на собственной частоте резонатора.** При работе с ЕМТ неоднократно субъективно отмечалось удлинение реверберации на частоте примерно 1045 Гц по сравнению с другими возбуждающими частотами. Наблюдение не было количественно оценено.

• **Субъективно отмеченное изменение вкуса и ощущения плотности воды после воздействия.** Наблюдение не было количественно оценено и не проводилось в условиях слепого теста. Метод надлежащей проверки приведен в главе N1/11.7.

• **Кинематика свободных концов трёхплечевого резонатора с прямоугольным поперечным сечением плеч на замедлённой видеозаписи.** При общем анализе записи преобладает примерно симметричное движение всех трёх плеч внутрь и наружу, соответствующее «дыхательному» образу. В то же время в отдельных временных отрезках наблюдаются отклонения от идеальной симметрии: проекция отклонения одного плеча может временно ослабевать по сравнению с остальными, и аналогичное явление наблюдается у разных плеч. Запись была сделана под наклонным углом и без пространственной калибровки, поэтому на её основе невозможно определить реальные трёхмерные траектории или фазовые соотношения между плечами. Наблюдение совместимо с суперпозицией нескольких модальных составляющих, но само по себе не позволяет различить стационарное, вращающееся и гибридное состояния. Систематическая проверка требует синхронного пространственного измерения движения отдельных плеч, например, с помощью высокоскоростной камеры с достаточным разрешением или лазерной виброметрии.

• **Изменение звукового сигнала после механической нагрузки на один из плеч.** В случае свободного трехплечевого резонатора субъективно наблюдалась выраженная быстрая амплитудная модуляция реверберации. После механической нагрузки на одно из плеч с помощью зажима эта модуляция значительно ослабла или исчезла, и реверберация воспринималась как более стабильный тон. Нагрузка одновременно изменяет массу, жёсткость, демпфирование и краевые условия одного плеча, поэтому данное наблюдение нельзя однозначно интерпретировать как расщепление вырожденной пары. Однако оно представляет собой подходящий повод для проведения контролируемого эксперимента с управляемым нарушением симметрии.

• **Пространственные минимумы и изменения звукового поля в окрестностях резонатора с непрерывным возбуждением в ЕМТ.** При перемещении измерительной точки или слушателя в окрестностях резонатора неоднократно наблюдались заметные пространственные различия в амплитуде и характере звука; в некоторых положениях менялась даже кажущаяся локализация источника. При непрерывном тоне в определённых местах было слышно также амплитудное пульсирование. Наблюдения не были систематически зафиксированы на карте и не подвергались фазовым измерениям, поэтому пока невозможно определить, речь идёт об интерференционных минимумах, модальной суперпозиции, эффектах движения или их комбинации.

Рабочие сценарии модального поведения

Предварительные наблюдения за кинематикой плеч не позволяют определить единственный способ колебаний трёхплечевого резонатора. Поэтому для систематических измерений выделяются три рабочих сценария:

Сценарий A — преимущественно симметричное состояние.

Движение резонатора определяется преимущественно симметричной модальной составляющей. Три плеча отклоняются примерно одновременно внутрь и наружу, и между плечами не наблюдается стабильного направленного сдвига фаз.

Сценарий B — преимущественно вращательное несимметричное состояние.

В движении наблюдается несимметричная модальная составляющая со стабильным направленным ходом фазы или максимумов отклонения между плечами. Таким образом, пространственный узор продвигается вокруг центральной оси резонатора.

Сценарий C — гибридное состояние.

В движении одновременно присутствуют измеримые как симметричные, так и несимметричные модальные составляющие. Их относительная доля может быть различной: доминирующим может быть симметричный «дыхательный» ход с добавленной несимметричной составляющей или, наоборот, несимметричный ход с измеримым симметричным вкладом. Доля отдельных составляющих может изменяться даже в ходе затухания.

Эти сценарии не представляют собой три взаимоисключающих свойства резонатора. Один и тот же объект может, в зависимости от способа возбуждения, частоты, крепления, геометрической симметрии и хода затухания, переходить от одних соотношений отдельных модальных составляющих к другим. Поэтому для их различения требуется синхронизированное по времени измерение амплитуды и фазы движения отдельных плеч.

Приведённые сценарии A–C представляют собой рабочую классификацию и не исчерпывают всех возможных форм модального поведения. Эксперимент может выявить и ходы колебаний, которые невозможно однозначно отнести к данной классификации; в таком случае классификация будет расширена в соответствии с полученными данными.

H-N1-64 — При определённых условиях возбуждения колебания трёхплечевого резонатора могут содержать одновременно измеримые симметричную и асимметричную модальные составляющие.

- Подтверждение: синхронизированные измерения покажут в одном и том же временном интервале вклад как симметричной, так и асимметричной модальной составляющей выше заранее установленного предела погрешности измерения.
- Опровержение: в предварительно зарегистрированном наборе испытуемых условий движение можно последовательно описать без одновременного присутствия обеих составляющих выше установленного предела погрешности измерения.

9.11 Связь с другими областями

Тройная симметрия, вырождение мод и ротационно-организованные поля встречаются и в других областях физики. Приведенные ниже примеры служат математическими или геометрическими аналогиями. Они не означают, что отдельные системы имеют одинаковый физический механизм, а также что

свойства одной системы можно автоматически перенести на триауральный резонатор.

Геометрическая фрустрация в магнетизме

Если три магнитных момента расположены в треугольнике, а их взаимные связи благоприятствуют антипараллельному расположению, невозможно одновременно удовлетворить всем трём парным взаимодействиям. В простом симметричном случае может возникнуть состояние, в котором моменты ориентированы с разницей в 120° [38].

Параллель с триауральным резонатором заключается в том, что тройная симметрия ограничивает множество допустимых коллективных состояний системы. Однако физический механизм отличается: в случае магнитной фрустрации речь идет об энергетической конкуренции между взаимодействиями, тогда как в случае резонатора — о модальной структуре упругого тела.

Тороидальные моменты в электродинамике

В электродинамике, помимо электрических и магнитных мультиполей, описываются также тороидальные моменты, возникающие при особом пространственном расположении токов . Такие конфигурации могут иметь выраженную внутреннюю структуру поля и в то же время иные излучающие свойства, чем простые электрические или магнитные диполи.

Параллель с триауральным резонатором носит исключительно структурный характер: в обоих случаях пространственная организация нескольких вкладов может создавать результирующее поле, свойства которого зависят от их общей геометрии и фазовых соотношений. В данной работе из этого сходства не делается вывод о существовании тороидального электромагнитного момента в резонаторе.

Вихревые структуры в гидродинамике

Гидродинамические системы могут создавать циркулирующие поля скоростей и вихревые структуры, характеризующиеся циркуляцией или вихревостью. Акустическая фазовая сингулярность, описанная в главе N1/09.5, представляет собой иное явление: речь идет о сингулярности фазы комплексного волнового поля, а не обязательно о вихре, обусловленном усредненной по времени скоростью среды.

Сходство заключается в наличии организованной циркуляции вокруг определенной области или оси. Однако экспериментально необходимо различать эти явления, поскольку акустическая фазовая циркуляция и

гидродинамическое течение могут существовать как отдельно, так и одновременно.

Общий знаменатель

Общим знаменателем приведённых примеров является роль симметрии и коллективной организации в формировании свойств всей системы. Однако речь идет о параллелях на уровне математики, геометрии или организации поля; отдельные физические механизмы остаются разными. Поэтому их приведение служит для включения исследуемой проблемы в более широкий физический контекст, а не в качестве доказательства гипотез, сформулированных в данном документе.

9.12 Масштабная ветвь: переход в ультразвуковой диапазон

Отношение характерного размера резонатора к длине волны существенно влияет на то, как его пространственная структура передаётся в окружающее акустическое поле. В диапазоне слышимых частот исследуемый резонатор, как правило, является субволновым источником, и поэтому значительная часть сложной пространственной структуры может проявляться главным образом в ближнем поле, как описано в главе N1/09.7.

При переходе к более высоким частотам длина волны сокращается, а при неизменной или уменьшенной геометрической форме увеличивается отношениеD/λ . В результате изменяются условия излучения более высоких пространственных компонент, и появляется возможность проследить, создаст ли модальная структура резонатора измеримую азимутальную фазовую организацию даже за пределами непосредственного ближнего поля.

Например, при частоте 440 Гц длина звуковой волны в воздухе составляет примерно 78 см, тогда как при 40 кГц — примерно 8,6 мм. Поэтому резонатор с характерным размером порядка десятков миллиметров при ультразвуковой частоте работает в совершенно ином соотношении размера к длине волны, чем геометрически аналогичный резонатор в слышимом диапазоне.

Поэтому переход к ультразвуку не означает изменения основной исследовательской задачи. Он позволяет изучать ту же самую связь между геометрией, модальной структурой и акустическим полем в другом масштабном режиме.

Прямое отображение фазовой структуры

Фазовую циркуляцию можно экспериментально отображать как в слышимом, так и в ультразвуковом диапазоне. Однако ультразвуковой масштаб позволяет работать с более компактными установками и с соотношением размера

источника к длине волны, сопоставимым со многими системами, используемыми в существующих исследованиях акустических вихрей.

При пространственном сканировании регистрируется комплексное акустическое давление, то есть как амплитуда, так и фаза. Потенциальная фазовая сингулярность идентифицируется по сочетанию локального минимума амплитуды и ненулевого целого числа оборотов фазы по замкнутой траектории вокруг соответствующей точки или оси.

Поэтому одного амплитудного минимума недостаточно. Точно так же недостаточно лишь визуального наблюдения за вращательным движением частицы. Решающим является сочетание пространственной амплитудной и фазовой карт с независимым измерением механического состояния резонатора.

Что измеряется

- карта амплитуды и фазы акустического поля в плоскостях, перпендикулярных триауральной оси;
- положение возможных фазовых сингулярностей и их изменение в зависимости от расстояния от резонатора;
- топологический заряд, рассчитанный по обходу фазы по замкнутому контуру;
- амплитуда и фаза механического движения отдельных плеч;
- передача крутящего момента на торсионный диск в соответствии с главой N1/09.6;
- возможное движение или вращение частиц при одновременном контроле акустического течения;
- зависимость указанных величин от способа возбуждения, частоты, геометрического отклонения и отношения D/λ .

Лазерная виброметрия обеспечивает здесь важный независимый контроль: если акустическая фазовая структура должна быть отнесена к вырожденной паре, необходимо одновременно знать амплитудное и фазовое поведение самого резонатора.

Гипотезы масштабной ветви

Связанная гипотеза H-N1-06: При достаточном отношении характерного размера резонатора к длине волны возбуждение вырожденной пары в квадратуре создает акустическое поле с измеримым ненулевым орбитальным моментом импульса.

H-N1-60: Трехлучевой резонатор при возбуждении без намеренно введенного азимутального фазового градиента может создавать

воспроизводимую фазовую циркуляцию акустического поля, которая связана с его собственной модальной динамикой.

- Подтверждение: при возбуждении без намеренно введенного азимутального фазового градиента воспроизводимо демонстрируется ненулевой фазовый оборот и его временная связь с измеренным модальным откликом резонатора.
- Опровержение: в заранее заданных условиях фазовая циркуляция проявится только в том случае, если азимутальный фазовый градиент вводится посредством способа возбуждения или отдельного формирующего элемента; в противном случае измеримая циркуляция не будет обнаружена вовсе.

H-N1-61: Базовое вращательное состояние, связанное с несимметричной вырожденной парой трёхлучевого резонатора, создаёт фазовую сингулярность с топологическим зарядом $|l| = 1$, причём знак l меняется на противоположный при изменении направления фазовой циркуляции.

- Подтверждение: фазовая карта покажет при замкнутом цикле вокруг сингулярности общее изменение фазы примерно $+2\pi$ или -2π, а при управляемом изменении направления циркуляции знак заряда изменится на противоположный.
- Опровержение: базовое воспроизводимое состояние покажет иное значение топологического заряда, нулевой оборот фазы или же знак при изменении направления циркуляции не изменится.

H-N1-62: Управляемое нарушение тройной симметрии систематически изменяет положение, устойчивость или топологическую структуру фазовой сингулярности, связанной с вращающимся состоянием.

- Подтверждение: с увеличением заданного отклонения от C3-симметрии воспроизводимо изменяется по крайней мере одна заранее заданная характеристика сингулярности — её положение, устойчивость, количество, топологический заряд или наличие — в корреляции с изменением модального расщепления.
- Опровержение: в исследуемом диапазоне геометрического отклонения указанные характеристики не изменяются сверх уровня погрешности измерения и не демонстрируют систематической связи с модальным расщеплением.

H-N1-63: Для геометрически подобных трёхлучевых резонаторов характер модального и акустического вращательного отклика сохраняется при переходе между различными масштабами, если сопоставимы соответствующие безразмерные параметры системы, включая отношение характерного размера к длине волны.

- Подтверждение: после нормализации пространственных координат и соответствующих частотных и амплитудных величин геометрически подобные резонаторы в разных масштабах демонстрируют одинаковый или статистически сопоставимый класс модальной и фазовой структуры.
- Опровержение: при сопоставимых соответствующих безразмерных параметрах между масштабами возникнут воспроизводимые различия, которые невозможно объяснить погрешностью измерения или известными механизмами, связанными с материалами или потерями.

Гипотеза H-N1-60 представляет собой прямую проверку рабочего класса C согласно главе N1/09.8. Её определяющим признаком является возбуждение без намеренно введенного азимутального фазового градиента и одновременное доказательство связи между возможной фазовой циркуляцией акустического поля и собственной модальной динамикой резонатора. Тем самым он экспериментально отличается от рабочих классов A и B, в которых требуемое пространственное фазовое распределение намеренно создается путем управления источником или формирующим элементом.

Что из этого следует для программы

В ультразвуковом направлении предполагается использование образцов с характерными размерами порядка единиц до десятков миллиметров. Поэтому их изготовление требует точного контроля геометрии, сечений и состояния поверхности. Пригодность конкретной производственной технологии — механической обработки, микрообработки, аддитивного производства или литья — оценивается с учетом требуемого допуска и материала.

При изменении масштаба отдельно измеряются собственные частоты, коэффициент качества, демпфирование и модальное расщепление. Их изменение невозможно вывести только из изменения геометрических размеров, поскольку могут меняться относительные вклады материальных, поверхностных, термоупругих и флюидных потерь.

Требования безопасности для воздушного ультразвука оцениваются отдельно в соответствии с главой N1/18 и соответствующими пределами воздействия.

Заключение:

Поэтому ультразвуковая ветвь представляет собой проверку геометрического и модального сходства, а не предположение об их автоматической действительности. Если один и тот же тип модального и фазового поведения проявляется в разных масштабах с учётом соответствующих безразмерных параметров, это подтверждает гипотезу о том, что наблюдаемый механизм

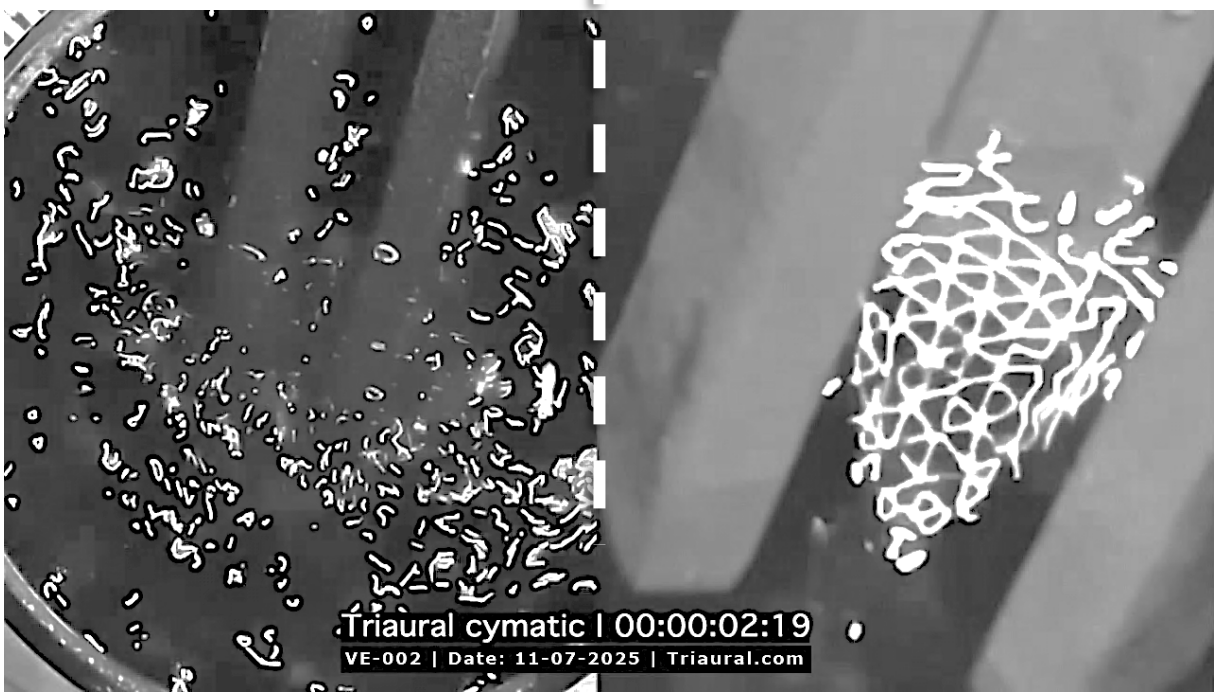
является свойством геометрико-модальной организации резонатора, а не особенностью одной конкретной частоты или величины.

10 КИМАТИКА И АКУСТИЧЕСКАЯ ГОЛОГРАММА — ПОЛЕ, КОТОРОЕ МОЖНО УВИДЕТЬ И УСЛЫШАТЬ

Звук невидим, но его можно проецировать на материю так, чтобы его можно было увидеть. В этой главе красивая фотография превращается в метод измерения.

Левая сторона:
Обычный камертон (двухплечевой)

Правая сторона:
Триауральный камертон (трёхплечевой)



PIIC-N1-12: Фоторепортаж — фиксация воздействия классического двухплечевого камертона на воду в сравнении с трёхплечевым триауральным камертоном.

Источник: triaural.com / 1.) Фоторепортаж ZIP, 2.) Видеорепортаж «Киматика», 3.) Видеорепортаж «Киматика» — сравнение 2vs3/скачать:
1.) https://triaural.com/DOCS/001_CYMATICS/PHOTO_EVIDENCE/triaural_cymatics_photo_evidence_for_analyse_11-07-2025.zip
2.) https://triaural.com/DOCS/001_CYMATICS/VIDEO_EVIDENCE/ve-001_triaural_cymatics_video_evidence_11-07-2025.mov
3.) https://triaural.com/DOCS/001_CYMATICS/VIDEO_EVIDENCE/ve-002_triaural_comparison_cymatics_2arm_vs_3arm120dig_video_evidence_11-07-2025.mp4

10.1 От изображения к методу

Киматика обычно представляется в виде изображения. Мелкий порошок на колеблющейся доске или поверхность жидкости образуют узор, и фотография этого узора выглядит убедительно даже без слов [40, 41].

Для целей измерения из изображения необходимо сделать величину. Это означает три вещи: узор возникает в зафиксированных условиях, фиксируется откалиброванной установкой , а его форма оценивается с помощью расчёта. Только тогда можно сравнить узоры из двух разных источников и сказать, чем они отличаются.

Поэтому в этой главе киматика описывается как метод измерения. В ней рассматривается, что изображает образ, как его форма количественно оценивается, какие проверки к нему относятся и где пролегают границы того, что из него можно извлечь.

10.2 Что отображает узор

Узор на доске или на поверхности представляет собой отображение пространственного распределения узлов и колебаний в тонком слое. В случае сыпучего материала с достаточной массой зерен частицы скапливаются в местах с наименьшим отклонением и покидают места с наибольшим, поэтому образовавшийся узор представляет собой пространственно-селективный отклик используемой среды на локальное распределение колебаний или акустического поля. В классической конфигурации Хладни её геометрия тесно связана с узлами и собственными модами колебаний пластины; однако при использовании встроенной среды или свободной поверхности всегда необходимо учитывать также динамику самой среды и её краевые условия.

В случае очень мелкого и легкого порошка действует обратное. Зерна уносятся воздушным потоком над пластиной и, напротив, скапливаются в местах наибольшей амплитуды колебаний; это уже наблюдал Хладни на обрезках волос смычка [42]. Поэтому вид и размер частиц сыпучего материала определяют, будет ли узор представлять собой карту узлов или колебательный узор, и в рамках сравнительной серии они не должны изменяться.

На свободной поверхности жидкости к этому добавляется ещё один механизм. Поверхность жидкости при вертикальном возбуждении с амплитудой выше пороговой образует собственные регулярные узоры — полосы, квадраты или шестиугольники — и их симметрия обусловлена гидродинамикой жидкости. Речь идет о нестабильности Фарадея, которой подробно посвящена глава N1/11.

Отсюда вытекает условие для интерпретации. Узор может содержать одновременный вклад возбуждающего поля и собственного гидродинамического отклика жидкости. Их разделение является предметом ротационного теста согласно главе N1/11.4.

В случае радиального резонатора из этого следует порядок применения методов. Пластина в классической конфигурации Хладни колеблется самостоятельно, и картина представляет собой карту её собственных мод; однако тело, помещённое в поле трёхлучевого резонатора, также имеет

собственные моды, и картина в этом случае отображает именно их, а не возбуждающее поле.

Поэтому первичным методом является свободная поверхность жидкости, при которой не возникает дискретной упругой моды помещенной пластины; однако всегда необходимо контролировать геометрию сосуда, глубину жидкости и гидродинамические краевые условия. Вторичным методом является пластина или натянутая мембрана, помещенная в поле, всегда с учетом собственных мод вложенного тела и с ротационным тестом согласно главе N1/11.4. Третью ветвь составляет гранулярный слой, в который погружаются щупы; его преимуществом по сравнению с поверхностью жидкости является то, что образовавшийся узор сохраняется даже после отключения возбуждения и его можно регистрировать без стробоскопа и с расстояния.

10.3 Количественная оценка узора

Форма узора преобразуется в числовые значения с помощью двух независимых методов, которые измеряют разные свойства.

Первый метод анализирует контур области, в которой оседлал материал. Расстояние края от центра тяжести выражается как функция угла и разлагается на гармонические составляющие. Амплитуда составляющей n-го порядка показывает, насколько контур симметричен по n-му порядку, и сравнивается с уровнем шума, создаваемого остальными порядками.

Второй метод анализирует внутреннюю текстуру. Двумерное преобразование Фурье изображения преобразует пространственную повторяемость в угловой спектр мощности. Шестикратная сетка проявляется в нём как составляющая шестого порядка. В случае идеально симметричного образа ожидаются доминирующие гармонические составляющие, соответствующие его ротационной симметрии; однако на реальных изображениях могут появляться и другие порядки вследствие асимметрии, шума, освещения или несовершенной сегментации.

Анализ повторяется при различных уровнях сглаживания изображения. Крупномасштабная структура может не проявляться на мелком масштабе и наоборот; поэтому обзор по различным масштабам является частью процедуры.

Сводная величина, полученная на основе этих разложений, в данном документе обозначается как индекс триауральности. Её точное определение будет установлено после первой серии измерений, когда станет известен диапазон значений на реальных образцах.

Индекс триауральности в данном документе приводится в качестве рабочей суммарной величины. Его окончательное определение, нормализация и эталонные диапазоны устанавливаются перед основной серией сравнений на

независимом калибровочном наборе данных и впоследствии не изменяются в ходе оценки.

Входными данными являются два числа. Первое — это отношение амплитуды компоненты третьего порядка к сумме амплитуд всех порядков в разложении контура. Второе — это то же самое отношение в угловом спектре мощности, полученном в результате двумерного преобразования Фурье. Обе величины являются безразмерными и по своей сути лежат в диапазоне от нуля до единицы.

Диапазон, в котором индекс вообще является информативным, определяется по дисперсии повторных измерений на одном и том же образце. Если разница между двумя образцами меньше этой дисперсии, индекс не различает их, и они указываются как неразличимые, а не как совпадающие.

Определение после первой серии записывается вместе с датой и данными, на основе которых оно было сформировано, и с этого момента не изменяется. Пересчёт более старого измерения по новому определению допустим только в том случае, если указаны оба значения.

10.4 Контрольные измерения и артефакты

К каждой серии относятся три контрольных измерения, которые проводятся в обязательном порядке.

Контрольный образец без возбуждения в течение того же времени и при той же температуре покажет, какая часть рисунка образовалась в результате испарения и осаждения. Ротационный тест в соответствии с главой N1/11.4 позволит определить, привязан ли рисунок к источнику или к сосуду. Контрольный источник с различной геометрией измеряется при одинаковой частоте, сопоставимой амплитуде возбуждения или акустическом давлении в заданной опорной точке, в том же положении и в течение того же времени воздействия. Разница между узорами затем может быть проверена как зависимость от геометрии источника.

Вид, крупность и масса используемого сыпучего материала фиксируются и не изменяются в рамках сравнительной серии. Съёмка производится перпендикулярно плоскости образца, с использованием масштабной линейки и при постоянном освещении. Перспективное искажение корректируется перед анализом; круглая область, снятая под углом, выглядит овальной, и в гармоническом разложении преобладает составляющая второго порядка.

Оценка проводится вслепую. Изображения экспонированных и контрольных образцов кодируются и оцениваются совместно без знания их сопоставления.

10.5 Лазерная локализация узловой сетки

Отражение узкого лазерного пучка от поверхности жидкости или от отражающей поверхности преобразует локальный наклон поверхности в смещение отраженного следа. Таким образом, метод позволяет уловить даже небольшие изменения наклона, которые могут быть незаметны в самом киматическом узоре.

Постепенное сканирование по заданной сетке позволяет составить карту локального отклика поверхности. При периодических колебаниях сканирование синхронизируется с возбуждением или анализируется с временным разрешением, чтобы отделить колебательную составляющую от статического наклона.

Пространственное разрешение определяется сочетанием шага сканирования, диаметра лазерного пятна, геометрии оптического пути, разрешения датчика и отношения сигнал/шум. Поэтому данный метод представляет собой независимое дополнение к анализу изображений частиц или поверхности.

10.6 Положение амплитудного минимума

Образ на поверхности представляет собой двумерный срез отклика среды, тогда как исследуемая область над центральным узлом является трехмерной. Поэтому по одному образу невозможно определить, на какой высоте или в каком положении находится локальный минимум наблюдаемой величины.

Пространственное положение минимума определяется путем измерений в нескольких плоскостях при неизменной геометрии, положении и способе возбуждения резонатора. Измерительная плоскость или датчик перемещаются вдоль триауральной оси, и в каждом положении регистрируются амплитудная и, в зависимости от используемого метода, фазовая характеристики.

Если используются серии с разным уровнем жидкости или различной глубиной погружения плеч, они оцениваются как отдельные экспериментальные конфигурации, поскольку изменение глубины погружения изменяет жидкостную нагрузку на резонатор и краевые условия системы. Их нельзя без дополнительной проверки интерпретировать как простые срезы одного и того же неизменного поля.

Результатом является пространственная зависимость положения и глубины амплитудного минимума вдоль оси; её связь с центральным узлом и определённой фокальной точкой впоследствии проверяется экспериментально.

10.7 Связь с коэффициентом качества

При импульсном возбуждении коэффициент качества может влиять на время, в течение которого среда обладает достаточной амплитудой для формирования наблюдаемого образа. При быстром затухании результирующий образ может формироваться менее четко или с большим разбросом, причем конкретный отклик зависит также от динамики используемой среды.

Поэтому измерение включает одновременную регистрацию затухания и изменения образа во времени. При управляемом непрерывном возбуждении с помощью FORKER амплитуду можно поддерживать на заданном уровне, что значительно ограничивает влияние различий в длительности затухания между образцами. Это одна из причин, по которой сравнительные серии проводятся на соответствующем контролируемом уровне шкалы.

10.8 Слепой классификационный тест

Вопрос о том, несёт ли образ характерные признаки геометрии источника, можно свести к задаче, имеющей однозначный критерий.

Классификатор получает изображения узоров, сформированных двухлучевым, трёхлучевым и четырёхлучевым источниками при одинаковой частоте и амплитуде, и сопоставляет им топологию источника. Обучающий и тестовый наборы разделены, кодировка выполнена вслепую, а перспектива скорректирована.

Критерием является эффективность классификации, превышающая уровень случайности, при заранее установленном уровне статистической значимости и на независимом тестовом наборе. Если классификатор воспроизводимо достигает эффективности выше уровня случайности, изображения содержат информацию, позволяющую различить топологию источника. Если этот уровень не достигается, в данном эксперименте и при использованном методе такая различимая информация не была подтверждена.

Отрицательный результат сам по себе не доказывает полной независимости образа от геометрии источника; он устанавливает верхний предел разрешающей способности при данном качестве данных и использованном аналитическом подходе.

Задача остается в области акустики и обработки изображений. Результат говорит о различимости образов и не определяет механизм их возникновения. Речь идет о гипотезе H-N1-54.

Разделение на обучающий и тестовый наборы осуществляется на уровне независимых экспериментальных прогонов или выборок, а не путем случайного разделения отдельных снимков из одной и той же записи.

Задача остается в области акустики и обработки изображений. Результат говорит о различимости образов и не дает оценки механизма их возникновения.

10.9 Визуализация в объеме

Киматика обеспечивает двумерную реакцию среды в одной плоскости. Аэрозоль в закрытой камере позволяет отслеживать пространственный перенос и концентрацию трассирующих частиц в объеме и тем самым исследовать объемные потоки или другие механизмы, которые в плоскостной картине могут не проявляться.

Исходные наблюдения: после заполнения стеклянной камеры EMT глицериновым туманом и стабилизации потока непосредственно над свободными концами плеч образовались две-три тонкие нити без аэрозоля, направленные вверх и слегка в стороны. Наблюдение проводилось в импровизированных условиях, без возможности записи из-за сложных условий освещения и без известной частоты возбуждения; его статус указан в главе N1/09.10.

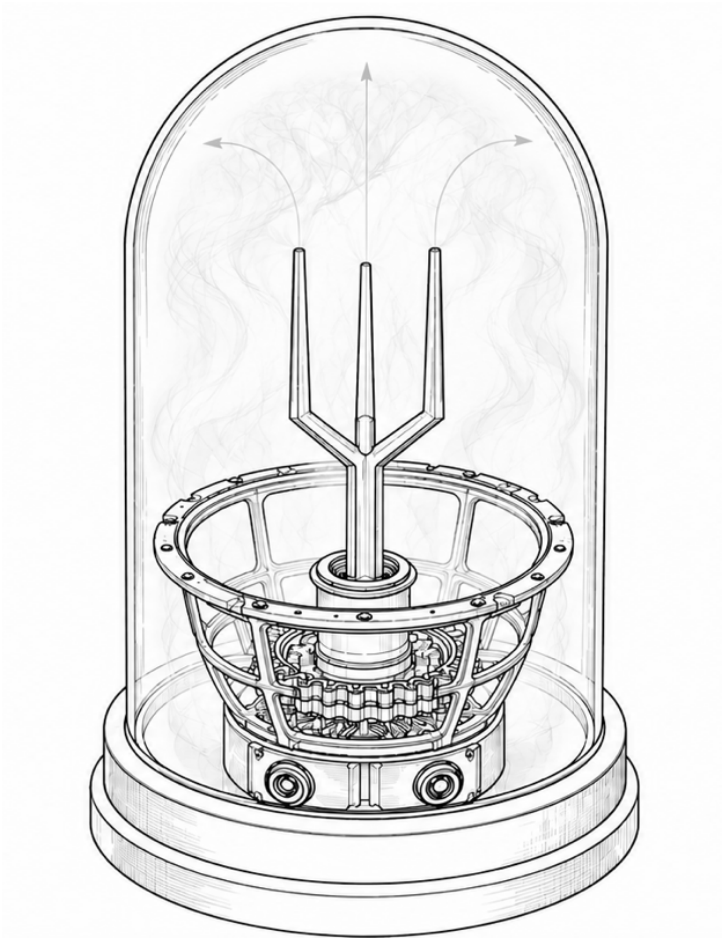


FIG-N1-13: Схематическое изображение эксперимента с нитевидными структурами в глицериновом аэрозоле.

10.10 Возможные механизмы

Возможные объяснения приводятся до проведения измерений, чтобы выбор между ними осуществлялся в зависимости от результата, а не наоборот.

Первым кандидатом является акустическое течение, генерируемое в окрестностях колеблющихся наконечников. Его направление и форма зависят от амплитуды, геометрии, вязкости среды и граничных условий. Если бы филаменты были связаны главным образом с локальным течением у отдельных отростков, их положение должно было бы систематически коррелировать с положением и движением наконечников.

Второй возможной причиной является вызванное акустическим воздействием перераспределение капель в стационарном или пространственно-структурированном поле. Локальные различия акустического давления и скорости могут изменять концентрацию аэрозоля и создавать области с более высокой или более низкой плотностью частиц.

Третьим кандидатом являются локальные изменения размера или концентрации капель, вызванные тепловыми или зависимыми от давления процессами.

Четвертым является тепловая конвекция от подставки, катушки или нагретого резонатора. Этот механизм не связан со звуком и является основным источником возможной погрешности.

10.11 Тест на различение по частоте

Среди перечисленных механизмов решающую роль играет одна измеримая зависимость. Если характерное расстояние между нитями напрямую связано с акустической длиной волны, то при неизменных остальных условиях ожидается приблизительно обратно пропорциональная зависимость от частоты. Удвоение частоты в идеальном случае привело бы к уменьшению характерного расстояния примерно вдвое.

Отклонение от этой зависимости не обязательно исключает акустический механизм, поскольку на результат могут влиять модовая структура резонатора, геометрия камеры и переход между различными режимами течения.

Тепловая конвекция не изменяется с частотой. Течение от шипов изменяет интенсивность, но сохраняет расстояние между ними.

Поэтому измеряется характерный интервал между нитями при ряде частот и проверяется, демонстрирует ли он приблизительно обратно пропорциональную зависимость от частоты в диапазоне, в котором остальные условия эксперимента остаются сопоставимыми. Отклонения от этого хода оцениваются вместе с изменениями модального режима, амплитуды и геометрии течения. Речь идет о гипотезе H-N1-41.

10.12 Контрольные измерения объемной визуализации

Аэрозоль без возбуждения за тот же промежуток времени покажет, что возникает под действием подъемной силы и тепла. Ротационный тест с поворотом резонатора относительно камеры позволит различить связь волокон с плечами и связь с емкостью. Температура регистрируется внутри камеры и на поверхности подставки в течение всего времени. Освещение подставки отключается в качестве отдельной проверки.

Серия повторяется с тем же аэрозолем и потоком при механически установленном, но не возбуждаемом резонаторе, чтобы отделить влияние геометрии тела на естественную конвекцию.

Перед началом измерения фиксируется время, необходимое для стабилизации аэрозоля после заполнения камеры, и эксперимент запускается только после достижения заданного состояния покоя.

10.13 Трассирующая среда и регистрация

Глицериновый аэрозоль является подходящей трассирующей средой, поскольку его капли при соответствующем распределении по размерам обладают относительно длительным временем жизни и хорошей оптической видимостью. Однако способность отслеживать течение зависит от размера капель, их инерции и характерной временной шкалы течения; поэтому эти параметры контролируются или оцениваются при количественном измерении. Водный аэрозоль может быть менее стабильным во времени из-за более быстрого испарения и изменения размера капель, поэтому его пригодность оценивается отдельно.

Недостатком предыдущего эксперимента было освещение. В рассеянном свете мелкая структура находится за пределами разрешающей способности обычной камеры.

Решением является лазерный световой срез. Тонкая плоскость света прорезает объем, камера снимает перпендикулярно к ней, а фон остается тёмным, так что вместо затуманенного объема получается резкий срез. Речь идёт о той же установке, которая используется для лазерной привязки согласно главе 10.5.

10.14 Количественная оценка

Съёмка освещённой плоскости парой кадров с небольшим интервалом позволяет вычислить поле скоростей методом корреляции изображений. При достаточной плотности трассирующих частиц пары последовательных снимков можно анализировать методом PIV (Particle Image Velocimetry), который даёт двумерное поле скоростей в освещённой плоскости. При более разреженном наборе хорошо различимых частиц можно использовать PTV (Particle Tracking Velocimetry) и отслеживать отдельные траектории.

Результатами являются локальные скорости, направления течения, области рециркуляции и возможные вихревые ядра.

H-N1-42: В режиме доминирующего акустического течения характерная усреднённая по времени скорость течения растёт примерно пропорционально второй степени амплитуды акустического или механического возбуждения в предварительно зарегистрированном диапазоне.

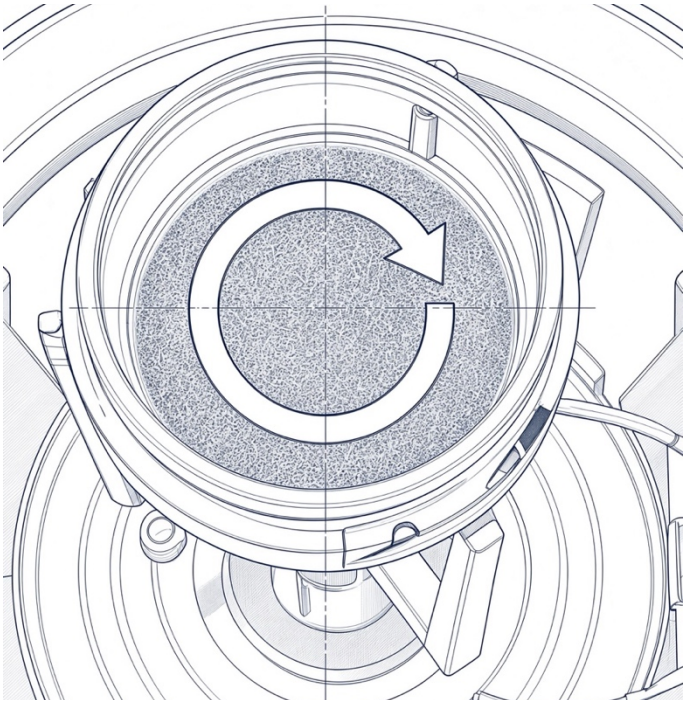
При использовании PIV/PTV объемная визуализация является в первую очередь методом отслеживания переноса вещества среды, то есть пути B согласно главе N1/09.5. Фазовая сингулярность комплексного поля давления этим измерением напрямую не определяется и должна отображаться отдельно.

Предварительное наблюдение переноса частиц

Отдельным предварительным наблюдением стало движение металлической стружки в круглой емкости, закрепленной в области короны резонатора. При некоторых возбуждающих частотах на видеозаписи было зафиксировано направленное движение частиц с выраженной окружной составляющей. Частоты и другие условия эксперимента не регистрировались систематически, а воспроизводимость не была количественно оценена; поэтому наблюдение имеет статус [O] согласно главе N1/09.10.

Сама по себе запись не определяет причину движения. К возможным механизмам относятся механическая передача колебаний в сосуд и слой частиц, движение среды, вызванное акустическим течением, несимметричное возбуждение системы, форма сосуда или их комбинация. Поэтому наблюдаемый периферический транспорт нельзя интерпретировать как доказательство фазовой циркуляции или передачи орбитального момента импульса.

При повторении эксперимента движение отдельных частиц регистрируется сверху при откалиброванной геометрии и оценивается методом PTV или, в случае необходимости, с помощью визуального анализа траекторий. Одновременно виброметрически регистрируется движение сосуда и подставки, а амплитудная и фазовая структура акустического поля независимо картируется. Такая схема позволит проверить, связано ли наблюдаемое перемещение с формой подставки, движением подставки, течением среды или с какой-либо другой составляющей эксперимента. Особо фиксируются направление периферического движения и его стабильность между повторениями. Если удастся управляемо изменить направление фазового хода возбуждения, будет также отслеживаться, изменится ли вместе с ним воспроизводимо направление транспорта частиц.



PIIC-N1-14: Схематическое изображение предварительного наблюдения периферического движения металлической стружки в круглой емкости, закреплённой в области венца резонатора. Стрелка обозначает наблюдаемое направление движения частиц; схема не определяет его физический механизм.

Видеозапись: Предварительное наблюдение вращения железной стружки в чаше: https://triaural.com/MULTIMEDIA/TRIAURAL_SAWDUST_ROTATION.mp4

10.15 Масштабирование камеры

В небольшой камере стенки могут существенно влиять на возникающее течение ещё до того, как сформируется его естественная пространственная структура. Поэтому объем, форма камеры и положение резонатора систематически изменяются, чтобы определить, возникают ли открытые линии тока, локальные области рециркуляции или пространственно замкнутая рециркуляционная ячейка. Гипотеза H-N1-43 проверяет возможность возникновения замкнутой рециркуляции при достаточном объеме камеры.

10.16 Акустическая голограмма — поле, которое можно услышать

Предыдущие главы посвящены полю в фокальной области и в её непосредственной близости. При работе с резонатором, находящимся в состоянии непрерывного возбуждения, неоднократно субъективно фиксировались заметные пространственные различия в громкости и характере звука даже на расстоянии нескольких метров от источника. Их физическая структура пока не была систематически изучена.

Вопрос, объединяющий весь следующий блок, звучит так: являются ли узлы в пространстве той же структурой, которую на поверхности визуализирует

киматика, то есть её сечениями в объёме? Формально он ведётся как открытый вопрос Q-N1-07 в соответствии с главой N1/22.3.

В случае звучащего резонатора в пространстве можно на слух найти точки, в которых звук имеет иную громкость и тембр, чем в точках, удаленных от них на несколько сантиметров. Переход между ними отчетлив, а положение этих точек при неизменной частоте не меняется. Речь идет о наблюдении в регистре [O].

Термин «акустическая голограмма» в данном документе используется в качестве рабочего названия для пространственно организованного распределения амплитуды и фазы акустического поля. Речь не идет ни о голографии в оптическом смысле, ни о пассивном голографическом элементе согласно главе N1/09.8.

10.17 Что говорит об этой структуре акустика

В случае простой стоячей волны соседние узловые плоскости возникают на расстоянии примерно $\lambda/2$. Однако в более сложном трехмерном интерференционном поле расстояния, форма и ориентация амплитудных минимумов зависят от геометрии источников, их фазовых отношений, направлений распространения и отражений от окружающей среды.

Поэтому зависимость характерных размеров структуры от частоты представляет собой важный тест, однако нельзя заранее предполагать, что все соседние минимумы будут разделены точно на $\lambda/2$.

Если какой-либо характерный пространственный размер измеряемой структуры напрямую связан с акустической длиной волны, при изменении частоты ожидается его систематическое изменение. Однако конкретная зависимость зависит от геометрии источника, фазовых соотношений и наличия отражений; поэтому простая зависимость $\lambda/2$ рассматривается как частный случай, а не как общее условие интерференционного поля.

Пространственные амплитудные минимумы возникают в закрытом помещении даже при обычном источнике вследствие интерференции прямого и отраженного звука. Само по себе наличие минимумов или слоистой структуры, следовательно, не свидетельствует об особом свойстве триауральной геометрии. Решающим является сравнение их амплитудной и фазовой организации, трансформации при повороте источника и поведения при изменении помещения или частоты.

10.18 Слоистая структура

Согласно предварительным слуховым наблюдениям, области заметного изменения амплитуды или характера звука не представляются в виде единственной изолированной плоскости, но могут встречаться в нескольких пространственных слоях с увеличением расстояния от источника. Эта

картина пока не была объективно зафиксирована, и поэтому обозначение «слоистая структура» является рабочим. Наглядно эту рабочую концепцию можно сравнить с системой отдельных оболочек вокруг источника — например, как удалённые друг от друга слои луковицы; их фактическая форма, связность и регулярность должны быть определены в ходе измерений.

Поэтому измерения не могут проводиться ни в одной плоскости, ни на одной сферической поверхности. Требуется сканирование в нескольких слоях с заданными интервалами, чтобы зафиксировать, как структура изменяется с расстоянием.

Наблюдаемыми величинами являются расстояние между слоями, глубина минимумов, форма узловых поверхностей, а также то, изменяется ли их ориентация с расстоянием, временем или частотой, и если да, то как.

10.19 Измерительная установка

Для регистрации пространственной структуры используется микрофонная решетка с синхронной записью всех каналов. Синхронизация является обязательным условием, поскольку помимо громкости регистрируется также фаза.

Сканирование происходит по слоям. Поле размещается на выбранном расстоянии, записывается вся площадь, а затем перемещается на следующий слой. Расстояние между слоями выбирается как доля длины волны, чтобы не упустить структуру.

Диапазон измерений предполагается от непосредственной близости резонатора до нескольких метров, чтобы зафиксировать развитие поля от ближней области к области, где уже можно оценить более удалённое излучение. Точная граница между ближним, переходным и дальним полями определяется для конкретной частоты и размеров источника.

Синхронное микрофонное поле позволяет в каждой точке определить как амплитуду, так и относительную фазу, и поэтому подходит для различения реальных пространственных минимумов от изменений, вызванных лишь локальной громкостью или отражениями в помещении.

Условия помещения фиксируются, включая размеры, время реверберации и положение источника относительно стен. Без этих данных невозможно отделить вклад источника от вклада помещения.

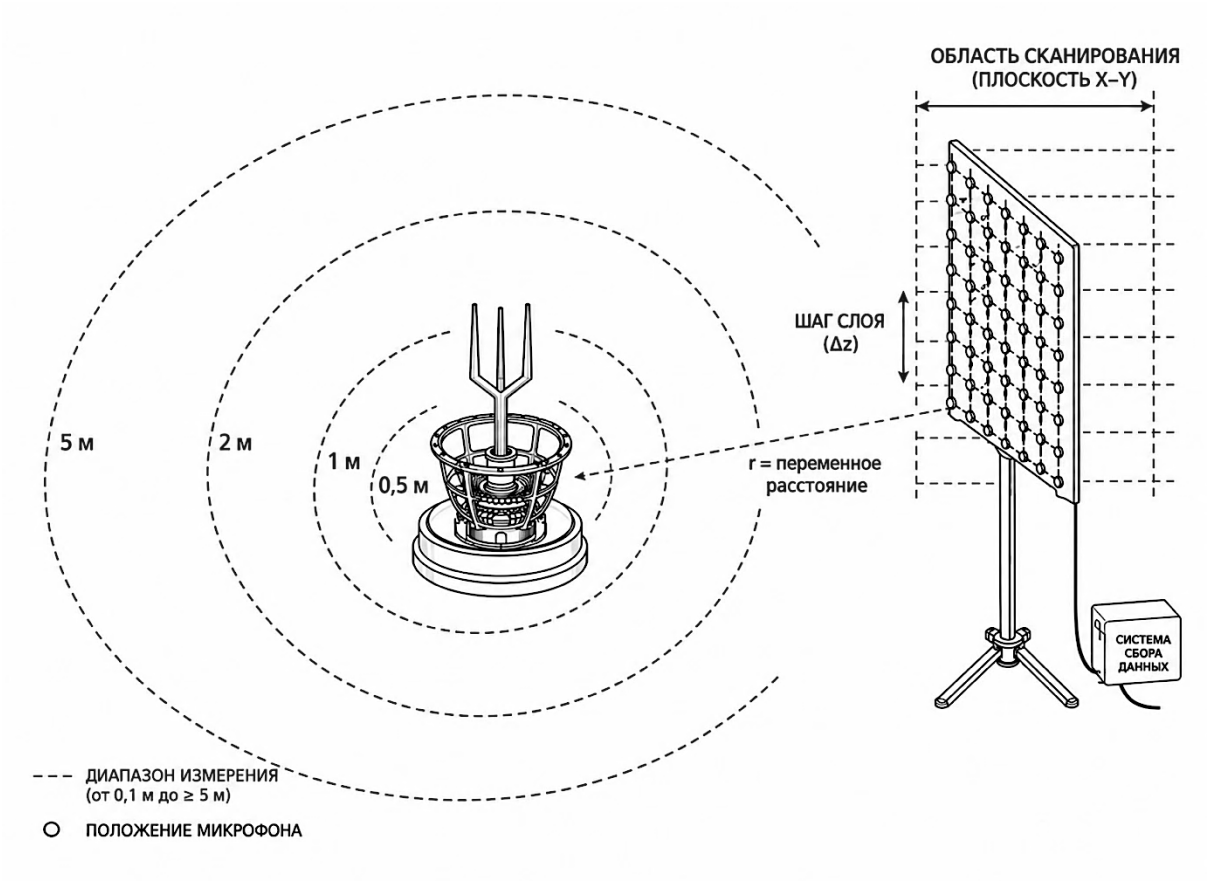


Рис. FIG-N1-15: Схема многослойного сканирования — микрофонное поле, слои с заданными интервалами, положение резонатора и обозначение измеряемого объема.

10.20 Проверки

Для того чтобы отличить вклад источника от вклада помещения, необходимо провести четыре проверки.

- Проведение одинаковых измерений с классическим источником при одинаковой частоте и громкости. Разница между картами является искомой величиной.
- Вращение резонатора вокруг оси. Вращение резонатора вокруг оси позволяет проверить, какая часть карты трансформируется вместе с источником, а какая остается привязанной к помещению. При одновременном воздействии обоих вкладов результирующая карта может изменяться комбинированным образом.
- Изменение положения источника в помещении. Узлы, привязанные к помещению, смещаются иначе, чем узлы, привязанные к источнику.
- Изменение частоты и проверка того, изменяется ли расстояние между слоями обратно пропорционально.

Измерения повторяются также в помещении с другим временем реверберации или, в случае необходимости, на открытом пространстве, где отражения отсутствуют.

10.21 Восприятие положения источника

В некоторых положениях, согласно наблюдениям, кажется, что звук исходит из другого места в помещении или возникает внутри головы слушателя. Речь идет о наблюдениях в регистре [O]. Определение направления звука основано на сравнении сигналов в обоих ушах, то есть на разнице во времени прихода и громкости. Одной из возможных гипотез является то, что в областях с низкой амплитудой или резким пространственным изменением фазы изменяются бинауральные локализационные ориентиры, в частности, межушные временные и уровневые различия. Это может снижать стабильность экстернализации или изменять воспринимаемое направление источника. Этот феномен известен в психоакустике при нарушении экстернализации и поддается измерению. Метод заключается в сравнении карты положений, в которых наблюдается данный феномен, с измеренной картой поля; проверяется, совпадает ли пространственное расположение явления с областями амплитудных минимумов или выраженных фазовых градиентов. Эта интерпретация является гипотетической и должна быть проверена путем сравнения психоакустического картирования с объективной амплитудной и фазовой картой поля.

10.22 Передача звука через конструкции

Согласно наблюдениям, звук резонатора слышен через стены и потолки более отчетливо, чем это соответствовало бы его громкости. Речь идет о наблюдении в регистре [O], и для него существует два объяснения, которые необходимо разграничить.

Первое — это затухание в конструкции, которое уменьшается с понижением частоты. Воздушная звукоизоляция строительных конструкций зависит от частоты, и на низких частотах затухание может быть значительно меньше, чем в более высоком диапазоне. Однако конкретный ход зависимости зависит от состава и механических свойств конструкции.

Второй фактор — передача через конструкцию. Если резонатор стоит на подкладке, соединенной со зданием, часть энергии передается не через воздух, а через материал, где затухание несравнимо меньше.

Измерение обоих путей проводится просто: резонатор сначала устанавливают на демпфирующую подложку, а затем непосредственно на конструкцию, при этом в соседнем помещении измеряют уровень. Разница между обеими конфигурациями даст оценку вклада механической связи с конструкцией, а не прямую абсолютную величину доли передачи через материал.

10.23 Независимость от монолита

Предварительные наблюдения указывают на то, что пространственно-структурированное поле можно наблюдать и в системах из нескольких источников без монолитного резонатора, например, в конфигурации AURISONIC, описанной в главе N1/12.6. Однако совпадение или различие этих полей должно быть определено путём измерений.

Поэтому данная ветвь не зависит от результата L2/L3 в том смысле, что вопрос о существовании и геометрии пространственной интерференционной структуры остаётся измеримым даже в том случае, если специфический вклад монолитного резонатора не подтвердится.

Связанные с этим открытые вопросы — Q-N1-04 и Q-N1-05 в соответствии с главой N1/22.3.

11 ВОДА И ЖИДКИЕ СРЕДЫ

Вода является одной из основных сред, в которых исследуется реакция на акустическое воздействие, — и в то же время средой, в которой очень легко прийти к неверному выводу. Поэтому в данной главе наряду с каждым наблюдением приводится проверка.

11.1 Почему вода

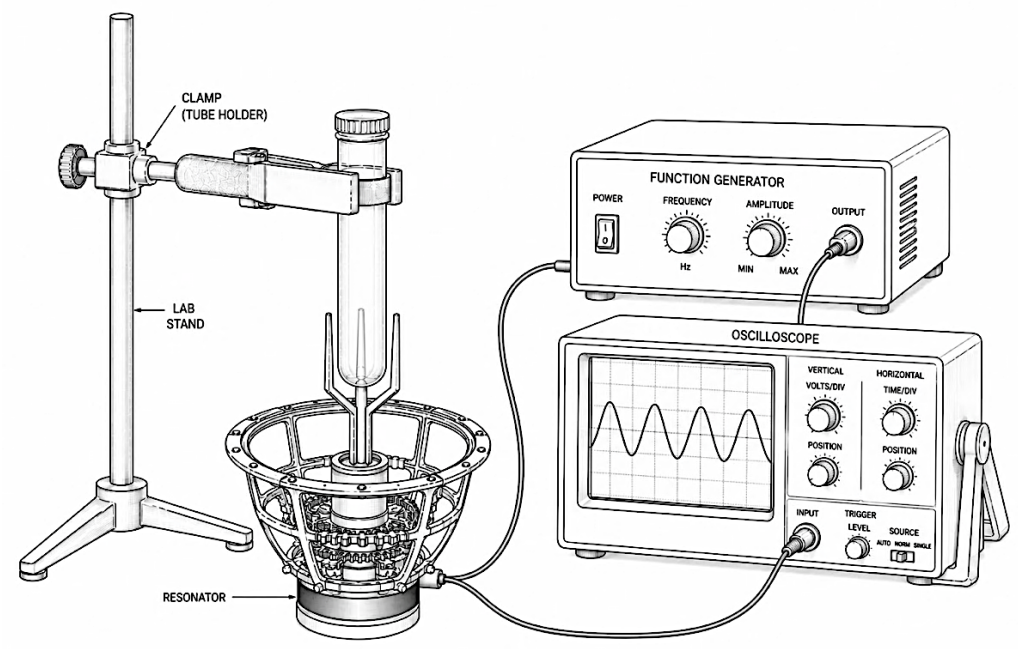
Вода является одной из основных жидких сред, исследуемых в данном документе. Она позволяет одновременно отслеживать механическую реакцию поверхности, перенос растворенных или взвешенных веществ, тепловые изменения и другие физические и химические величины с помощью устоявшихся методов измерения.

В то же время она является важной эталонной средой для последующих экспериментов с биологическими системами, в которых вода составляет существенную часть исследуемой среды. Однако эта связь сама по себе не означает переносимости результатов, полученных на воде, на биологическую систему.

Жидкие образцы также чувствительны к температуре, испарению, растворенным газам, загрязнению, геометрии сосуда и способу обращения с ними. При небольших изменениях на интерпретацию результатов могут влиять даже ожидания наблюдателя. Поэтому в данной главе к каждой наблюдаемой величине приводятся контрольные условия и метод измерения.

11.2 Исходное наблюдение и его статус

Пробирка с минеральной водой, помещённая в фокальной области EMT: после воздействия растворённое вещество сконцентрировалось в ограниченной зоне на поверхности вместо равномерного распределения.

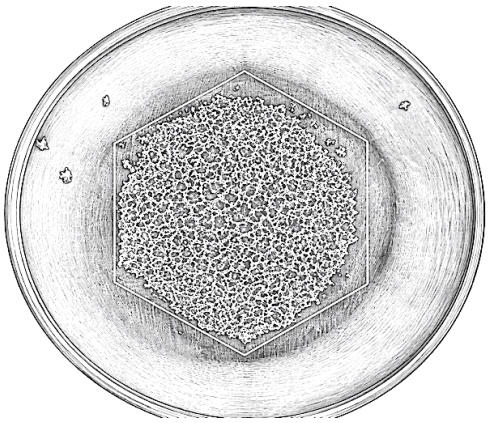


PIIC-N1-16: Техническая схема измерения.

Наблюдение проводилось в импровизированных условиях, без контрольного образца, без калиброванного считывания и без повторения. Оно не приводится в качестве результата и не служит основанием для каких-либо утверждений.

Узор постепенно разрушился при открытии сосуда и последующих манипуляциях. Поэтому на основании наблюдения невозможно определить, имела ли место метастабильная структура, изменение, вызванное движением образца, нарушение поверхности жидкости, изменение испарения или иной механизм. Однако практический вывод однозначен: исходное состояние образца при манипуляциях не сохранилось.

Поэтому повторное измерение проводится in situ через закрытый сосуд, с чётко заданным положением камеры и без контакта с образцом во время экспозиции и последующей съёмки.



PIIC. N1-17: Узор осадка на поверхности после возбуждения минеральной воды в фокальной области резонатора.

Вопрос, который поднимает данная глава, формулируется без каких-либо предположений: обладает ли узор осадка измеримой симметрией, и если да, то какой?

11.3 Волна Фарадея

При периодическом вертикальном возбуждении с амплитудой выше порогового значения поверхность жидкости может перейти в режим параметрического возбуждения и формировать регулярные поверхностные узоры. Это явление, исторически связанное с экспериментом Фарадея, относится к стандартно исследуемым гидродинамическим нестабильностям [42].

Характер узора и порог его возникновения зависят, помимо прочего, от частоты и амплитуды возбуждения, глубины жидкости, вязкости, плотности, поверхностного натяжения и геометрии сосуда. В классическом режиме Фарадея поверхностный отклик может возникать в субгармоническом диапазоне по отношению к частоте возбуждения; поэтому частотное соотношение между возбуждением и откликом является одной из отслеживаемых величин.

Частота и амплитуда возбуждения настраиваются в ходе контролируемого эксперимента, в то время как глубина, температура и физические свойства жидкости определяются или измеряются.

Отдельным результатом измерения являются пороговая амплитуда и карта узоров в плоскости частота-амплитуда. Такая карта сопоставляется с данными литературы и служит для проверки того, соответствует ли система известным законам физики.

Одновременно регистрируется доминирующая частота поверхностного отклика, чтобы можно было различить гармонический, субгармонический или иной режим.

11.4 Ротационный тест

Одним из основных различительных экспериментов данной главы является изменение взаимной угловой ориентации резонатора и сосуда при остальных неизменных условиях. Можно повернуть резонатор, сосуд или выполнить оба варианта; решающим фактором является известное изменение их относительной ориентации.

Измерения проводятся при нескольких заранее определённых углах, например 0°, 30°, 60° и 90°, а порядок ориентаций рандомизируется между повторениями. После коррекции перспективы изображения сравниваются с помощью того же гармонического и изобразительного анализа, что и в главе N1/10.3.

Если определённая составляющая узора воспроизводимо поворачивается вместе с резонатором, это подтверждает её связь с ориентацией источника. Если она остаётся неподвижной относительно сосуда или лабораторной системы координат, это подтверждает влияние сосуда, мениска, гравитационной ориентации, освещения или другого стационарного фактора.

Оба фактора могут присутствовать одновременно. Поэтому результирующий узор не обязательно будет поворачиваться как твёрдое тело; его отдельные гармонические или пространственные компоненты могут реагировать по-разному. Поэтому ротационный тест оценивается как зависимость отдельных компонентов узора от относительного угла между источником и сосудом.

Если исходный узор при повторных измерениях не появляется за пределами границ изменчивости контрольных прогонов, исходное наблюдение считается невоспроизводимым. Однако сама по себе невоспроизводимость не определяет, какой конкретно случайный или неконтролируемый фактор его вызвал.

Этот тест является одним из основных средств проверки гипотезы H-N1-30.

11.5 Осаждение как запись поля

Если при воздействии образуется воспроизводимый узор осаждения, его можно исследовать как пространственную запись процессов, протекающих в образце во время воздействия. Однако само по себе осаждение не определяет, возникла ли его геометрия под действием акустического поля, гидродинамики жидкости, испарения, граничных условий или их комбинации.

Поэтому для интерпретации в качестве реакции, связанной с источником, необходимо доказать воспроизводимость, связь с ориентацией резонатора по результатам ротационного теста и разницу по сравнению с невозбуждаемым контролем.

Обязательным контролем является образец с той же водой, емкостью, временем и температурой без возбуждения. Если сопоставимый узор возникает и в контрольном образце без возбуждения, это не подтверждает его специфическую связь с акустическим возбуждением, и в первую очередь необходимо проверить испарение, мениск, краевое осаждение и другие пассивные механизмы.

Количественная оценка узора осуществляется методами, описанными в главе N1/10.3, а именно: гармоническим анализом контура и разложением внутренней текстуры, включая обзор по масштабам и коррекцию перспективы.

11.6 Измеримые величины воды

Следующие величины измеряются с помощью устоявшихся методов и охватывают механизмы, посредством которых акустическое воздействие может влиять на воду.

- Растворенные газы, в частности кислород и углекислый газ, измеряются с помощью подходящего датчика или аналитического метода. Изменение их концентрации относится к числу возможных механизмов, которые могут повлиять на сенсорные свойства образца.
- Поверхностное натяжение измеряется тензиометрическим методом при контролируемой температуре. Оно может изменяться в зависимости от состава образца, растворенных веществ, газов и загрязнения границы раздела; его возможная связь с сенсорной оценкой проверяется с помощью корреляционного анализа.
- Вязкость измеряется с помощью капиллярного вискозиметра или вискозиметра с падающим шариком, всегда при контролируемой температуре.
- Распределение размеров субмикронных рассеивающих объектов можно отслеживать с помощью динамического светорассеяния. Однако само по себе DLS не определяет химическую или фазовую природу объекта; поэтому полученный сигнал нельзя автоматически интерпретировать как нанопузырьки без дополнительной проверки.
- pH, проводимость и мутность — простая контрольная тройка.
- Температура измеряется непрерывно в течение всего периода воздействия с записью динамики изменения.

При ультразвуковой обработке воды в экспериментальной литературе наблюдались длительно сохраняющиеся субмикронные рассеивающие объекты, которые в части литературы интерпретируются как объемные нанопузырьки [43, 44]. Указанный срок жизни таких объектов может значительно превышать время, предсказанное классической моделью Эпштейна–Плессета для простого изолированного газового пузырька.

Однако ни механизм их стабильности, ни сама природа наблюдаемых нанообъектов не являются однозначно установленными; часть авторов обращает внимание на то, что некоторые измерения могут фиксировать частицы или агрегаты иного происхождения [45]. Поэтому в данном документе нанопузырьки не рассматриваются в качестве объяснения. В нём субмикронные объекты рассматриваются как потенциальное явление, физическая природа которого должна быть определена с помощью дополнительных измерений.

11.7 Сенсорная оценка

Субъективно сообщаемое изменение вкуса и ощущения плотности проверяется с помощью слепого треугольного теста в соответствии со стандартом ISO 4120 [46]. Тест отвечает на вопрос, существует ли заметная разница между образцами; он не указывает, насколько она велика, в каком направлении она проявляется и какое свойство её вызывает.

Участник получает три образца, два из которых идентичны, а один отличается, и определяет, какой из них отличается. Лицо, проводящее тест, не знает о распределении образцов. Статистически значимая успешность, превышающая уровень случайности, свидетельствует о том, что участники способны сенсорным образом различать образцы в условиях теста.

Результаты сенсорного теста оцениваются совместно с физическими и химическими величинами из главы 11.6, чтобы можно было искать связи между измеримым изменением образца и сенсорной различимостью. Причинно-следственный механизм определяется только в ходе последующих контролируемых экспериментов.

11.8 Кристаллизация в поле

Управление нуклеацией с помощью ультразвука является устоявшейся практикой в фармацевтике и пищевой промышленности [47, 48], поэтому вопрос о влиянии акустического поля на кристаллизацию имеет обширную литературу. Существующая литература часто касается ультразвуковых режимов, в которых важную роль играет кавитация. Исследуемый резонатор работает в слышимом диапазоне и при существенно иных условиях; поэтому наличие или отсутствие кавитации не следует предполагать, а необходимо проверять отдельно, если это имеет значение для интерпретации результатов.

Поэтому существующая литература не дает прямого ответа на вопрос данной главы, но предоставляет методологическую основу для выбора измеряемых параметров кристаллизации.

При замерзании измеряются скорость нуклеации, степень переохлаждения перед замерзанием, гранулометрический состав кристаллов и скорость роста фронта.

При кристаллизации из раствора путем выпаривания или охлаждения в качестве модельных веществ используются соль и сульфат меди. Основная кристаллическая структура стабильной химической фазы определяется её составом и термодинамическими условиями. Поэтому в данном эксперименте не ожидается изменения кристаллической системы самого вещества; в первую очередь отслеживаются параметры, на которые может влиять кинетика нуклеации и роста.

Оценка проводится путем визуального анализа габитуса, ситового и микроскопического распределения размеров, а также дифракции при подозрении на изменение полиморфа. Выбор полиморфа отслеживается только для веществ, у которых в данных условиях известно несколько кристаллических форм. Съемка осуществляется автоматически, образцы кодируются, а форма оценивается с помощью программного обеспечения.

Снежинки в программу не включаются. Их форма определяется температурой и перенасыщением с такой чувствительностью, что объектом измерения стала бы климатическая камера.

11.9 Тепловая мощность, подаваемая в образец

Данное измерение является одним из основных условий калибровки для последующих биологических экспериментов, описанных в документе N3. Без знания теплового вклада невозможно создать термически идентичные контрольные условия или отделить акустический эффект от обычного нагрева образца. Без знания вносимого тепла невозможно сформировать термически сопоставимую контрольную группу, поэтому это является предпосылкой для дальнейших экспериментов.

Устройство эксперимента дифференциальное: два идентичных образца, один в фокальной области, а второй вне её, в одном и том же помещении, при этом измеряется разница их температур. Таким образом исключается влияние дрейфа температуры окружающей среды, которое на порядок превышает искомый эффект.

Частью серии является сравнение источников при одинаковой частоте и акустическом давлении: классический громкоговоритель, направленный на образец, по сравнению с образцом, находящимся в фокальной области триаурального резонатора.

Учитывая низкое поглощение звука в воде в слышимом диапазоне, ожидается небольшой тепловой эффект, поэтому измерение требует высокой температурной чувствительности и стабильного эталона. Необходим термисторный мост.

Артефакт, который необходимо исключить: металлический или иным образом механически закрепленный датчик температуры может повлиять на само измерение в акустическом поле за счет локального поглощения, механических колебаний или изменения потока в окрестностях датчика. Поэтому предпочтительным является как можно менее инвазивное измерение, а результат при необходимости проверяется альтернативным методом. Решением могут служить оптоволоконный датчик, измерение сразу после отключения поля или бесконтактное измерение. Бесконтактные методы различаются по тому, что они измеряют: пирометр и тепловизор измеряют температуру поверхности, а оптические методы, основанные на

изменении показателя преломления или Рамановском рассеянии, измеряют температуру в объеме.

Отдельным результатом является зависимость нагрева от амплитуды, частоты и времени воздействия. Речь идет о гипотезах H-N1-44 и H-N1-45.

11.10 Режим воздействия

В каждом эксперименте указывается, в каком из трёх режимов он проводился, поскольку режимы не взаимозаменяемы и влияют на интерпретацию результатов.

- Доза — короткое определённое воздействие; измерения до и после воздействия, включая наблюдение за возвращением к исходному состоянию.
- Непрерывное воздействие — длительное непрерывное воздействие; измерения во время воздействия и наблюдение за временным ходом и возможной сатурацией эффекта.
- Повторная доза — серия отдельных воздействий с заданным интервалом; наблюдение за возможным кумулятивным или обратимым эффектом.

Время возврата к исходному значению является отдельной характеристикой наблюдаемого явления. Оно позволяет отличить кратковременную обратимую реакцию от изменения, которое сохраняется или кумулируется при повторении.

11.11 Терминологические определения

Термины «структурированная вода» и «память воды» в настоящем документе не используются, поскольку в его методологических рамках они не имеют достаточно однозначного операционного определения: они не определяют, какая конкретно величина должна измениться, в каких временных рамках и с помощью какого эксперимента это изменение должно быть подтверждено или опровергнуто.

Поэтому наблюдаемые изменения описываются исключительно с помощью конкретных измеримых величин в соответствии с главой N1/11.6. Список неиспользуемых терминов с обоснованием приведён в приложении P4.

12 СИНТЕЗ ПОЛЯ С ПОМОЩЬЮ МНОГОИСТОЧНИКОВОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Можно ли создать то же самое поле с помощью трёх отдельных источников вместо одного тела? Сравнение обеих схем покажет, что вносит в поле сам монолит, а что вытекает уже из расположения источников.

12.1 Вопрос, рассматриваемый в данной главе

В случае трёхплечевого монолитного резонатора акустические и механические вклады трёх геометрически связанных плеч суммируются в общем пространстве. При этом плечи являются частями одного тела, поэтому их амплитудные и фазовые соотношения обусловлены модальной динамикой всей соединённой структуры.

Сравнительную конфигурацию можно создать с помощью трёх отдельных акустических источников, расположенных в соответствующей геометрии. Их амплитуду и относительную фазу можно независимо регулировать с помощью электронных средств.

Таким образом, возникает вопрос, определяющий рамки дальнейшего исследования: в чём заключается разница между полем монолита и полем трёх управляемых источников в той же геометрии?

Если поля в рамках заранее определённых метрик не будут различаться с точностью выше экспериментальной погрешности, то наблюдаемые свойства поля в данной конфигурации необходимо будет объяснять в первую очередь геометрией, фазовыми соотношениями и характером источников. Если они будут воспроизводимо различаться, то следующим вопросом станет, какое свойство монолитной структуры вызывает это различие и связано ли оно с её модальной динамикой.

12.2 Треугольная конфигурация

Базовую синтетическую конфигурацию составляют три отдельных акустических источника, расположенных по азимуту с шагом 120° вокруг общей оси. Акустическая ось каждого источника направлена на заданную опорную точку в области сравниваемого поля.

Расстояние источников от опорной точки, их высота, азимут и направление фиксируются как отдельные геометрические параметры. Конфигурация не должна механически копировать форму плеч монолитного резонатора; её задача — создать три независимо управляемых акустических вклада в соответствующей трёхмерной пространственной геометрии.

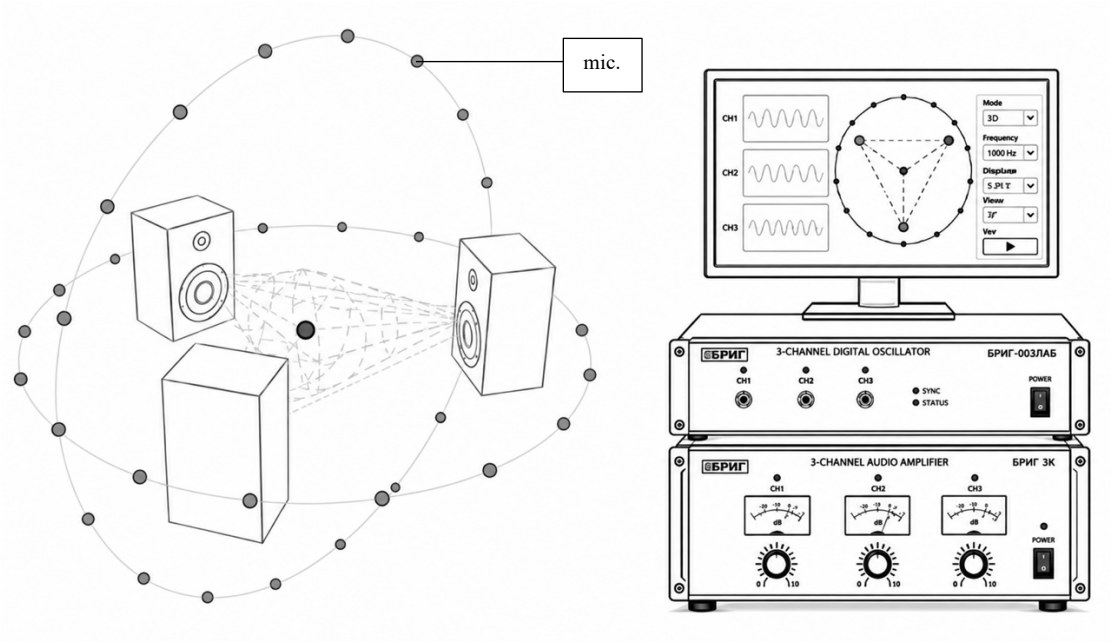
Каждый канал сначала калибруется отдельно по комплексному акустическому давлению в опорной точке или области. После амплитудной компенсации устанавливается требуемое относительное фазовое соотношение, а затем строится карта результирующего поля.

Источники возбуждаются от одного генератора через трехканальный выход с управляемым фазовым сдвигом. При установке сдвигов 0°, 120° и 240° возникает последовательное возбуждение, которое имеет такое же фазовое соотношение, какое предполагается между плечами монолита согласно главе N1/09.3.

Положение и ориентация источников выбираются в соответствии с геометрией сравниваемой конфигурации. Их пространственное расположение основано на распределении плеч согласно главе N1/06, в то время как направление акустической оси источника настраивается так, чтобы соответствовать направлению главного радиального излучателя, включая его ориентацию β.

Поэтому геометрическое совпадение между монолитом и синтетической сборкой определяется отдельно для положения источника, направления его оси и расстояния от общей опорной точки.

Выравнивание акустического давления в фокальной области осуществляется путем измерения, а не расчета. Каждый источник сначала калибруется отдельно по комплексному акустическому давлению в заданной опорной точке или области. После амплитудного выравнивания проверяются относительные фазы отдельных каналов, и только после этого производится совместное возбуждение.



РПС-N1-18: Треугольная конфигурация L3 — расположение источников, положение фокальной области и положение измерительных микрофонов в сферическом поле.

12.3 Показатель совпадения

Для сравнения двух полей требуется величина, которая покажет, насколько они совпадают. Без неё результат основывался бы на впечатлениях от снимков.

Поэтому измеряется акустическое давление в сетке точек вокруг фокальной области, а именно амплитуда и фаза. Полученные две карты — одна для монолита, вторая для системы источников — сравниваются точка за точкой.

В качестве обобщающей величины используется нормализованная разность карт, приведенная к максимальному значению поля и дополненная пространственной корреляцией. Пороговое значение, при котором поля считаются различимыми, определяется по дисперсии повторных измерений одной и той же конфигурации, то есть по собственному шуму набора источников.

К сравнению карт добавляется сравнение производных величин: положение и глубина минимумов, симметрия образа согласно главе N1/10.3 и возможная ротационная составляющая согласно главе N1/09.5.

Пороговое значение метрики соответствия в данном документе не приводится в виде универсального числа. Оно определяется экспериментально на основе повторяемости конкретной измерительной установки.

По серии повторных измерений определяется распределение метрики при неизменном физическом расположении, включая изменчивость, вызванную повторным закреплением резонатора. Поэтому между отдельными измерениями образец извлекается из держателя и заново закрепляется в соответствии с той же предписанной процедурой. Определённое таким образом отклонение включает в себя и практическую изменчивость крепления, которая при серии измерений без повторного закрепления осталась бы незамеченной.

Порог различимости определяется перед основным сравнительным экспериментом на основе данного распределения с помощью заранее определённого статистического критерия. В качестве рабочего критерия можно использовать, например, кратное стандартного отклонения или соответствующий интервал повторяемости; конкретный выбор, способ расчета и правило принятия решения фиксируются до начала основной серии и не изменяются в ходе ее оценки.

Минимальное количество повторений выбирается таким образом, чтобы можно было достаточно стабильно оценить изменчивость метрики. Десять повторений представляют собой начальный минимум для пилотной серии; в зависимости от измеренной дисперсии количество может быть увеличено перед основной серией.

До определения порогового значения метрика приводится с измеренным значением и показателем изменчивости, но без вывода о том, являются ли два поля совпадающими или различимыми. Утверждение о совпадении без установленного порогового значения не имеет смысла.

12.4 Что ещё даёт синтез

Независимо от результата сравнения многоисточниковая система обладает свойствами, которых нет у монолитной, и это является самостоятельным результатом.

Фазовые сдвиги можно плавно изменять во время измерения, так что можно электронным способом изменять положение и организацию амплитудных и фазовых структур без механического перемещения источников. Частоту можно плавно изменять в рабочем диапазоне источников, в то время как отклик монолита значительно зависит от его собственных модальных частот.

Установка также позволяет намеренно вводить отклонение. Рассогласовав один источник или сместив его фазу на известное значение, можно исследовать, насколько чувствительно поле реагирует на отклонение — и это без необходимости изготовления серии монолитов различной точности.

Установка позволяет намеренно вводить точно определенные амплитудные, фазовые или геометрически эквивалентные отклонения и отслеживать отклик поля. Таким образом, она обеспечивает контролируемую модель исследования допусков монолита: электронное отклонение известно и воспроизводимо, в то время как реальное производственное отклонение должно быть отдельно измерено с геометрической и модальной точек зрения.

12.5 Пространственные конфигурации

Треугольная конфигурация расположена в плоскости. При распространении в пространство возникают конфигурации, в которых источники направлены к общему центру из вершин многогранника.

Рассматриваются тетраэдр с четырьмя источниками, октаэдр с шестью, куб с восемью и другие правильные многогранники. При расширении плоского расположения возникают пространственные ансамбли, в которых источники направлены к общей опорной области из нескольких пространственных направлений. В качестве опорных геометрий можно использовать, например, тетраэдр, октаэдр, куб или другие правильные или полуправильные многогранники.

Число и расположение источников определяют количество доступных пространственных вкладов, в то время как симметрия ансамбля вместе с их амплитудными и фазовыми соотношениями ограничивает результирующий класс создаваемого поля.

Эти антенные решетки одновременно служат методологической основой для пространственных конфигураций, исследуемых в последующей программе N3, в которую входит AURIS. В программе N1 они оцениваются исключительно как измерительные и синтетические антенные решетки.

12.6 AURISONIC

Обозначение AURISONIC относится к пространственной конфигурации источников с каркасом в форме ромбокубоктаэдра, то есть многогранника с двадцатью шестью гранями и двадцатью четырьмя вершинами. Она соответствует уровню L4 шкалы сложности и в уменьшенном исполнении имеет размеры до тридцати сантиметров.

AURISONIC — это модульная пространственная измерительная система, основанная на каркасе ромбокубоктаэдра с 24 вершинами и 26 гранями. Активные источники устанавливаются в заранее определённые монтажные позиции и направлены акустической осью к центру тела. Конкретное подмножество активных позиций при каждом эксперименте фиксируется как часть конфигурации.

Предварительные наблюдения при центрическом подключении указали на возникновение пространственной узловой структуры. Речь идет о наблюдении без зафиксированных условий, приведенном в главе N1/09.10; соответствующая гипотеза — H-N1-13.

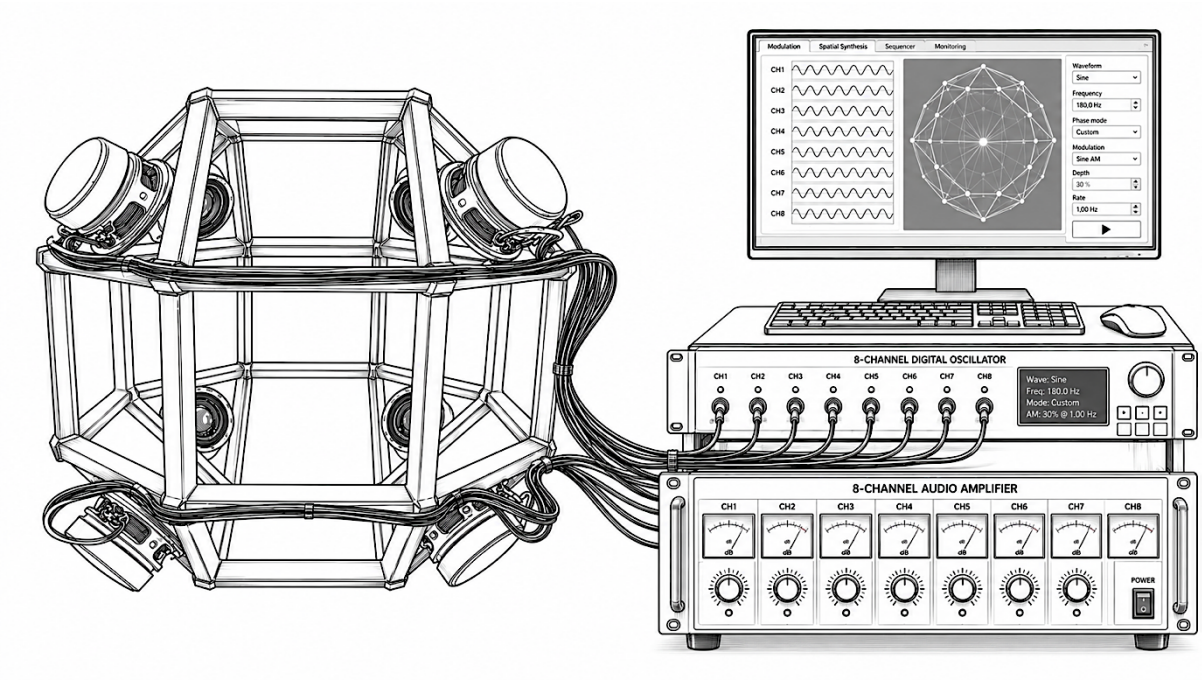


Рис. N1-19: Каркас AURISONIC — ромбокубоктаэдр с обозначенными вершинами и расположением источников.

12.7 Минимальное количество источников

Если многоисточниковая система способна воспроизводить выбранные свойства поля монолита, возникает вопрос, какое наименьшее количество независимо управляемых источников необходимо для этого воспроизведения.

Минимальное количество невозможно определить только по размеру модального подпространства резонатора. Двумерная вырожденная пара означает две независимые модальные степени свободы, однако не определяет количество физических излучателей, необходимых для создания соответствующей трехмерной акустической карты.

Поэтому в ходе эксперимента последовательно сравниваются конфигурации с разным количеством активных источников. Для каждого числа амплитуды и фазы оптимизируются в соответствии с одной и той же заранее установленной процедурой, а результат оценивается с помощью метрики, описанной в главе N1/12.3.

При удалении источника также контролируется общий уровень возбуждения, чтобы возможное ухудшение соответствия не было лишь следствием более низкой акустической мощности. Отдельно фиксируется, какие конкретно источники остались активными, поскольку одинаковое количество источников при различном пространственном распределении может создавать различное поле.

Минимальным числом обозначается наименьшая конфигурация, которая воспроизводит заранее определенные характеристики эталонного поля в пределах установленного порога различимости. Речь идет о гипотезе H-N1-14.

12.8 Фазовое управление как общий инструмент

Управление относительной фазой нескольких каналов в рамках документа используется в ряде физически различных систем: при акустическом синтезе поля, при многоточечном возбуждении монолита и в связанных с ними электромагнитных или пространственных установках.

Общим элементом является возможность управлять амплитудой и относительной фазой отдельных пространственно распределенных вкладов. Однако одинаковое математическое описание не означает одинакового физического механизма. Поэтому терминология фазового управления используется единообразно, при этом физическая интерпретация остается специфичной для данной системы.

12.9 Точность фазы и её пределы

Результирующее поле зависит от фактического амплитудного и фазового соотношения отдельных акустических вкладов в измеряемой области. Значение фазы, установленное в генераторе, может не совпадать с фазой акустического давления, создаваемого громкоговорителем, поскольку каждый канал включает электрическую задержку, передаточную функцию усилителя и преобразователя, а также акустический путь между источником и измеряемой точкой.

Поэтому перед каждой серией сравнительных измерений каждый канал измеряется отдельно, и определяется его комплексная передаточная функция между цифровым возбуждающим сигналом и акустическим давлением в заданной опорной точке или области. Затем настройка фазы корректируется таким образом, чтобы требуемое относительное соотношение возникало акустически, а не только электрически.

После одновременного запуска всех каналов относительные фазы проверяются с помощью синхронизированного измерения микрофонного поля. Регистрируются фазовая погрешность между требуемым и измеренным значением, временное рассеяние между каналами и их стабильность на протяжении всей серии.

На более высоких частотах одинаковая абсолютная временная погрешность составляет большую часть периода, поэтому требования к временной синхронизации ужесточаются. Фазовая погрешность может проявляться в виде сдвига, деформации или снижения контраста амплитудных и фазовых структур; её конкретное проявление не определяется заранее.

Эти данные являются частью каждой записи, поскольку без знания фактического фазового состояния источников невозможно достоверно отнести разницу между полями к исследуемой геометрии.

13 БЕСКОНТАКТНОЕ ВОЗБУЖДЕНИЕ И СЧИТЫВАНИЕ

Удар молотком невозможно повторить дважды одинаково. В этой главе рассматриваются способы приведения резонатора в колебания и считывания данных без прикосновения к нему.

13.1 Почему удара молотком недостаточно

Для целей измерения импульсное возбуждение имеет ряд ограничений. Амплитуда, временной ход и точное положение каждого удара слегка различаются, поэтому отдельные измерения требуют нормализации в соответствии с фактически приложенным импульсом. Изменение места или направления удара одновременно изменяет соотношение возбуждаемых мод. Кроме того, во время кратковременного контакта молоточек механически взаимодействует с резонатором, поэтому процесс возбуждения не является ни идеально бесконтактным, ни идентичным при повторных измерениях.

Бесконтактные методы позволяют управлять этими параметрами с большей воспроизводимостью и одновременно обеспечивают фазово-определённое возбуждение и считывание без дополнительного веса на плечах.

13.2 Электростатическое возбуждение

Электрод, расположенный рядом с плечом и заряженный относительно него, оказывает на него притягивающую силу. Сила пропорциональна второй степени напряжения, поэтому при переменном напряжении без постоянной составляющей плечо реагирует с частотой, вдвое превышающей частоту возбуждения. При суперпозиции постоянного смещения и небольшой переменной составляющей в электростатической силе возникает составляющая, линейная по амплитуде переменного сигнала и действующая с его частотой. При достаточно малой модуляции по отношению к смещению этот режим можно аппроксимировать как линейное возбуждение.

Тот же электрод используется и для считывания. Движение плеча изменяет ёмкость между ним и электродом, что можно измерить. Таким образом, образуется полностью бесконтактная цепь, в которой к резонатору ничего не прикасается.

Три электрода на отдельных плечах можно возбуждать с относительными фазами 0°, 120° и 240°. При подходящем постоянном смещении возникает фазово-прогрессирующий пространственный узор электростатической силы. В ходе эксперимента затем определяется, вызывает ли этот способ возбуждения в вырожденном модальном подпространстве устойчивую вращательную суперпозицию. Изменение порядка фаз приводит к изменению направления продвигающегося возбуждения; отслеживается,

изменится ли вместе с ним направление измеряемого модального или полевого отклика. Речь идет о гипотезах H-N1-15 и H-N1-16.

Пространственное распределение заряженных частиц можно исследовать как отдельный метод визуализации электростатического поля; его интерпретация требует контроля заряда частиц, потока воздуха и геометрии электродов.

Требования безопасности при работе с высоким напряжением приведены в главе N1/18.

13.3 Магнитострикционное возбуждение

Ферромагнитные и некоторые другие магнитно упорядоченные материалы при изменении состояния намагниченности изменяют свои размеры вследствие магнитострикции [49]. Поэтому изменяющееся во времени магнитное поле может служить бесконтактным способом механического возбуждения резонатора.

Однако зависимость между током катушки, магнитным полем и результирующей механической силой или деформацией не обязательно является линейной; на неё могут влиять магнитный гистерезис, насыщение и начальное состояние намагниченности. Поэтому канал возбуждения калибруется в соответствии с фактическим механическим откликом плеча, а не только в соответствии с заданным током.

Три катушки, расположенные у трёх плеч, могут возбуждаться с относительными фазами 0°, 120° и 240°, что создаёт пространственно-прогрессирующий магнитный возбуждающий узор. Вопрос о том, вызовет ли этот узор ротационный модальный режим резонатора и с какой эффективностью, является предметом гипотезы H-N1-20.

Инверсный магнитострикционный эффект Виллари позволяет механическому напряжению изменять магнитное состояние материала [50]. Это явление можно использовать для бесконтактного считывания, при этом в практической схеме необходимо отделить слабый измерительный сигнал от возбуждающего поля — например, с помощью отдельной измерительной катушки, временного разделения возбуждения и считывания или фазочувствительной детекции.

13.4 Трёхканальное магнитное считывание

Движение намагниченного плеча изменяет магнитный поток, проходящий через измерительную катушку, и индуцирует измеримое напряжение. Поэтому электрический сигнал несет информацию о временном ходе движения, однако его точное амплитудное и фазовое соотношение с механическим отклонением зависит от геометрии, намагниченности и передаточной функции канала считывания.

Поэтому перед экспериментом все три канала калибруются по амплитуде и фазе с помощью одного и того же эталонного движения. После коррекции их относительных передаточных функций синхронизированную запись можно использовать для определения взаимных фазовых соотношений между плечами.

Трехканальная запись позволит исследовать синфазный ход, циклический фазовый ход и, в более общем плане, гибридные модальные состояния. Поэтому оценка не ограничивается лишь двумя вариантами: 0°/120°/240° или 0°/0°/0°. Речь идет о гипотезе H-N1-17.

Этот принцип проверен и используется в датчиках электрогитары и в промышленных релуктансных датчиках. Родственный принцип индукционного считывания применяется в магнитных и релуктансных датчиках; однако для этой схемы точность как амплитуды, так и фазы устанавливается посредством собственной калибровки.

Согласно главе N1/09.3, для полного описания состояния вращения достаточно двух независимых каналов. Третий канал служит для проверки внутренней согласованности измерений, и его соответствие исходному предположению является отдельным показателем правильности работы системы.

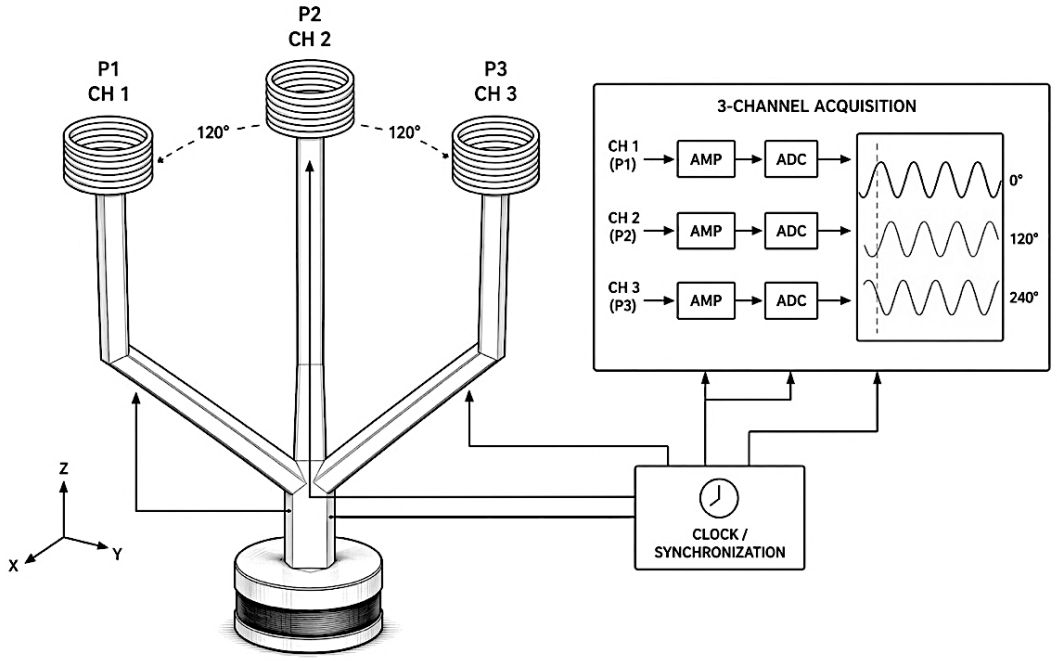


РИС. N1-20: Расположение измерительных катушек на концах плеч, прокладка сигнала и способ синхронизации каналов

Независимая проверка механической кинематики

Магнитное считывание обеспечивает синхронизированную по времени косвенную регистрацию движения трех плеч. Поэтому его интерпретация

проверяется независимым бесконтактным методом, предпочтительно с помощью лазерной допплеровской виброметрии. Виброметр позволяет измерять амплитуду и фазу скорости движения выбранных точек плеч без добавления веса датчика.

При наличии многоканального или сканирующего LDV измеряются соответствующие точки на всех трёх плечах, а результат сравнивается с трёхканальным магнитным считыванием. Высокоскоростная камера может дополнить измерения прямой визуализацией траекторий свободных концов; для пространственной реконструкции требуется несколько ракурсов или стереоскопическая съёмка.

Полученная кинематика классифицируется в соответствии с рабочими сценариями A–C, введёнными в главе N1/09.10: преимущественно симметричный ход, преимущественно ротационный несимметричный ход или гибридная суперпозиция. Классификация остаётся открытой и для хода, который нельзя однозначно отнести к одному из этих трёх сценариев.

Предварительное наблюдение кинематики плеч на замедленной видеозаписи

При предварительной визуальной оценке замедленного видеозаписи трехплечевого резонатора с прямоугольным поперечным сечением плеч преимущественно наблюдалось симметричное движение свободных концов плеч внутрь и наружу, соответствующее «дыхательному» ходу. Одновременно в отдельных временных отрезках наблюдались отклонения от идеальной тройной симметрии: проекция отклонения одного плеча временно казалась слабее, чем у остальных, причем это явление поочередно наблюдалось на разных плечах.

Запись была сделана под наклонным нижним углом и без пространственной калибровки, поэтому на её основе невозможно достоверно определить реальные трёхмерные траектории свободных концов или точные фазовые соотношения между плечами. Однако наблюдение согласуется с суперпозицией нескольких модальных компонентов и мотивированно подтверждает разграничение рабочих сценариев A–C, представленных в данной главе. Сама по себе видеозапись пока не позволяет различить, идет ли речь о преимущественно симметричном, преимущественно асимметричном или гибридном ходе; для такого различения требуется синхронизированное пространственное измерение, предпочтительно с помощью лазерной виброметрии или высокоскоростной оптической съемки с калибровкой пространства.

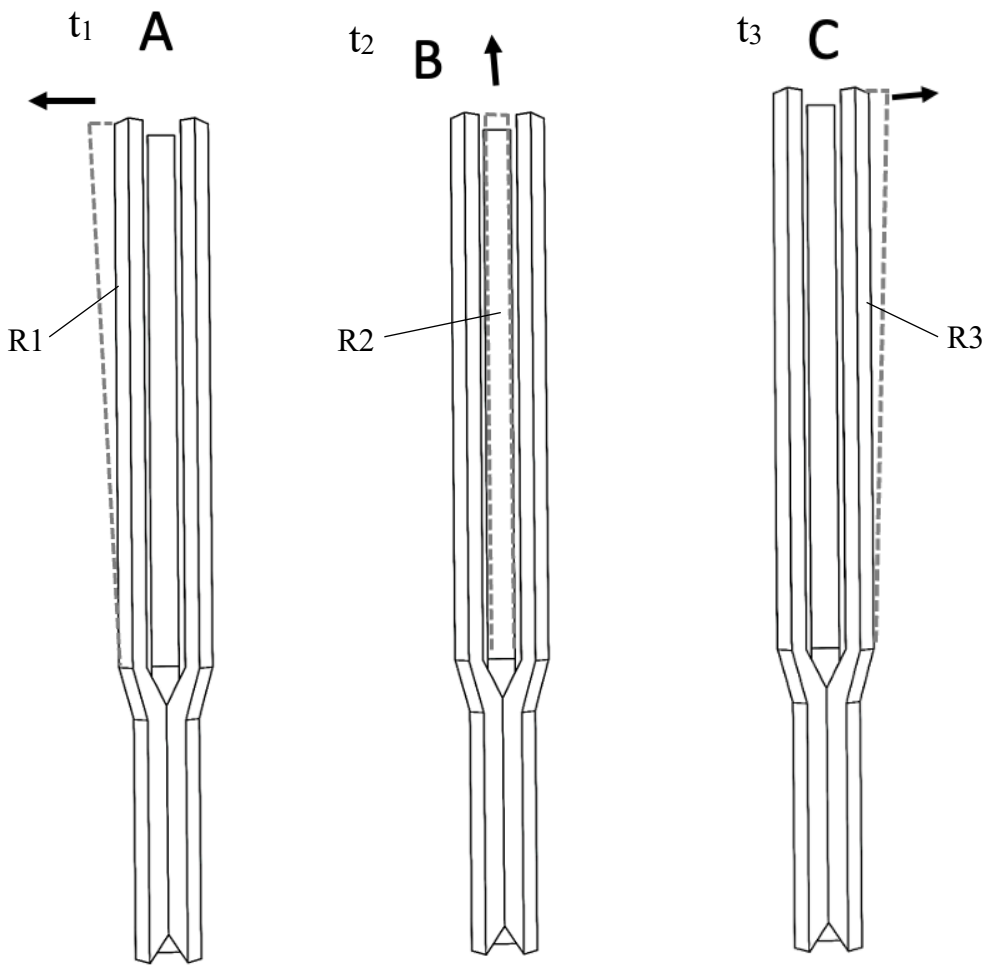


Рис. FIG-N1-21: Схематическое изображение предварительно наблюдаемой изменчивости движения плеч на замедленной видеозаписи. Рисунок иллюстрирует рабочую интерпретацию, в которой на доминирующее симметричное «дыхательное» движение накладывается изменяющаяся во времени асимметричная составляющая, проявляющаяся в виде поочередного усиления или ослабления проекции отклонения отдельных плеч R1, R2 и R3 в показанных моментах времени t_1, t_2 и t_3. Схема не является доказательством механизма, а представляет собой визуальную помощь для наблюдения и сценариев A–C.

Видеозапись: Предварительное наблюдение за кинематикой трёхплечевого резонатора — замедленная запись, внутренний архив / онлайн-приложение, доступно по адресу: **https://triaural.com/MULTIMEDIA/TRIAURAL_ABC_MOVEMENT.mp4**

13.5 Возбуждение одного плеча

Если возбуждается одно плечо, а остальные два считываются, измеряется собственная связь монолита — то есть то, как энергия распространяется по телу сама по себе. Фазовый сдвиг, измеренный на плечах 2 и 3, в этом случае не задается извне.

Постепенное возбуждение каждого плеча по отдельности и синхронное измерение отклика остальных плеч дают набор взаимных передаточных функций. В случае идеально симметричного резонатора ожидается циклическая эквивалентность этих откликов после соответствующего поворота обозначений плеч. Воспроизводимое отклонение может указывать на геометрическую, материаловую, магнитную или зажимную асимметрию и должно быть дополнительно локализовано. Речь идет о гипотезах H-N1-18 и H-N1-19.

13.6 Способы намагничивания

Постоянный магнит, приложенный к области рукоятки, может создавать магнитный поток, проходящий через центральную часть резонатора и распределяющийся по отдельным плечам. Фактическое распределение магнитного поля и полярность на концах зависят от геометрии, материала, магнитной цепи и положения магнита, поэтому они проверяются с помощью измерений или магнитостатической модели.

Преимуществом является сохранение монолитности и отсутствие добавления к наконечникам какого-либо материала, который мог бы изменить частоту. После снятия внешнего магнитного поля в материале может остаться остаточная намагниченность. Поэтому состояние до намагничивания, во время воздействия поля и после его снятия измеряются отдельно; при необходимости возврата к заданному исходному состоянию применяется контролируемая процедура размагничивания.

Вместо постоянного магнита можно использовать электромагнит, закреплённый с нижней стороны рукоятки, или обмотку, размещённую непосредственно на рукоятке, которая в этом случае выполняет роль сердечника. Интенсивность, полярность и временной ход намагничивания затем регулируются электронным способом и могут изменяться во время измерения без вмешательства в конструкцию.

Непрерывно управляемое магнитное поле служит экспериментальным инструментом для проверки частотной настройки согласно пункту 13.7 и управляемого модального расщепления согласно пункту 13.9. Подключённая обмотка придаёт рукоятке массу и демпфирование, поэтому регистрируется состояние системы как с обмоткой, так и без неё.

Эффект Виллари также лежит в основе магнитоэлектрических устройств, которым посвящен документ N2.

Альтернативой является бесконтактное намагничивание с помощью катушки или магнитов, закрепленных непосредственно на наконечниках. Второй вариант обеспечивает более сильное поле и изменяет массу плеч, что необходимо учитывать при оценке результатов.

При симметричном магнитном расположении в центральной области может возникать локальный минимум магнитной индукции или иная характерная структура поля. Однако их наличие, положение и устойчивость необходимо определять с помощью магнитостатической модели и пространственных измерений; их невозможно вывести только из векторной симметрии трёх плеч.

Если создать подходящий градиент магнитной энергии, диамагнитные или магниточувствительные частицы могут демонстрировать систематическое перераспределение. Такое распределение представляло бы собой метод магнитной визуализации, аналогичный картам распределения частиц в других разделах документа, а не прямое доказательство существования центральной нулевой точки. Речь идет о гипотезе H-N1-24.

13.7 Настройка частоты с помощью магнитного поля

Состояние намагниченности ферромагнитного материала может влиять на его эффективные упругие свойства и внутреннее напряжение, тем самым изменяя собственные частоты механического резонатора. Величина, направление и возможный гистерезис этого сдвига зависят от материала, ориентации поля, истории намагничивания и конкретного мода.

Поэтому в эксперименте отслеживаются собственные частоты в зависимости от управляемого постоянного магнитного поля и одновременно регистрируется гистерезис при нарастании и спадании поля. Если сдвиг воспроизводим и достаточно плавный, его можно использовать для тонкой настройки двух резонаторов. Речь идет о гипотезе H-N1-21.

13.8 Влияние намагниченности на затухание

Магнитомеханическое демпфирование и вихревые токи изменяют скорость затухания колебаний. Сравнение одного и того же резонатора при определённых состояниях намагниченности минимизирует различия между образцами, но требует контроля остаточной намагниченности, истории намагничивания и температуры. Регистрируются изменения времени затухания, коэффициента качества и собственной частоты. Речь идёт о гипотезе H-N1-22.

Если с состоянием намагничивания изменяется коэффициент качества, может измениться и временной ход, и контрастность киматического отклика. Эта зависимость проверяется корреляционно с измерением по N1/10.7.

13.9 Контроль магнитной нагрузки и модального расщепления

Магнитная нагрузка может влиять на отдельные плечи слегка по-разному вследствие геометрических допусков, различной намагниченности материала или неточности положения возбуждающих элементов. Такая асимметрия может изменять модальное расщепление вырожденной пары и тем самым

влиять на стабильность, амплитуду или временной ход вращательной и гибридной составляющих в соответствии с главой N1/09.4.

Поэтому к каждой серии измерений, использующей магнитное возбуждение или намагничивание, относится контрольное измерение без приложенного магнитного поля и регистрация остаточного состояния. Без такого контроля отрицательный результат было бы невозможно однозначно отличить от изменения модального отклика, вызванного самим намагничиванием.

ΔfЕсли удается управляемо изменять модальное расщепление с помощью магнитного поля, то на одном и том же образце можно наблюдать, как изменяются амплитуда, стабильность или временной ход ротационной и гибридной модальных составляющих. Такое непрерывное воздействие представляет собой более сильный каузальный тест, чем сравнение двух разных образцов. Речь идет о гипотезе H-N1-23.

Подходящую контрольную пару материалов представляют нержавеющие стали: аустенитные нержавеющие стали, как правило, слабомагнитные или практически немагнитные в ненагруженном состоянии, тогда как ферритные марки являются ферромагнитными. Подробности приведены в главе N1/15.

13.10 Симпатическая связь двух резонаторов

Два механических резонатора с близкими собственными частотами могут акустически взаимодействовать через общую среду. Если поле, создаваемое одним резонатором, содержит достаточную составляющую на частоте приемника, оно может вызвать измеримый отклик во втором резонаторе.

Перед измерением необходимо сформулировать нулевую гипотезу. В качестве нулевой гипотезы используется предположение, что при сопоставимом локальном комплексном акустическом поле в точке расположения приемника его линейный отклик будет независим от идентичности удаленного источника. Поэтому сравнение с репродуктором должно учитывать не только частоту и давление, но и, при необходимости, соответствующие направленность и фазовые характеристики поля.

В документе рассматриваются три механизма, при которых характеристика может отличаться от нулевой гипотезы; каждый из них измеряется отдельно.

Первым является ближнее поле. В ближнем поле могут более выраженно проявляться высокие пространственные составляющие и реактивная часть поля, которые на больших расстояниях быстро затухают. Поэтому сравнение резонатора с контрольным динамиком на малых расстояниях должно основываться на пространственном картировании, а не только на одной точке измерения.

Второй фактор — угловая ориентация. Если эффективность связи демонстрирует воспроизводимую периодическую зависимость от взаимного поворота двух резонаторов, речь идет о направленном свойстве геометрии

приемника и излучателя, которое не наблюдается у идеального изотропного контрольного источника. Речь идет о гипотезе H-N1-48.

Третьим является тип возбуждённого мода. Если источник создаёт поле с измеримой фазовой циркуляцией, а приёмник содержит соответствующую вырожденную или почти вырожденную пару, проверяется, появится ли в его модальном отклике направленно-связанная вращательная составляющая.

13.11 Измеряемые величины связи

Эффективность связи измеряется в широком диапазоне расстояний. Зависимость сравнивается с моделями, ожидаемыми для отдельных областей поля; возможное изменение эффективного экспонента спада может указывать на переход между режимами, но граница не определяется только по одному излому кривой.

Расстройка приемника на известное значение приводит к появлению резонансной кривой, ширина которой указывает на эффективный коэффициент качества связанной системы и одновременно на допуск настройки.

Далее регистрируется зависимость от взаимного угла поворота и от наклона осей, а также постоянная времени нарастания амплитуды в приемнике.

При достаточно сильной когерентной связи может возникнуть расщепление нормальных мод на пару собственных частот. Его наблюдение является убедительным доказательством связанности системы, однако его отсутствие не исключает более слабой связи. Речь идет о гипотезе H-N1-50.

Вся серия экспериментов проводится дважды — один раз с резонатором в качестве источника и один раз с динамиком — при одинаковой частоте и одинаковом давлении в точке приема.

13.12 Взаимность — геометрия в качестве приемника

В линейных взаимных акустических системах при соответствующих граничных условиях действует взаимность между передающей и принимающей характеристиками. Поэтому направленная характеристика одного и того же взаимного элемента может быть тесно связана при передаче и приеме.

Если триауральная геометрия демонстрирует специфическую направленную или модальную характеристику в качестве источника, то оправдано проверить соответствующую селективность и в режиме приемника.

Это можно реализовать двумя способами. Первая реализация представляет собой три отдельных микрофона, расположенных с шагом 120°, которые проверяют геометрический синтез принимающего поля. Вторая — это сам монолит с измерительными каналами на плечах, который проверяет свою

собственную механико-модальную характеристику. Результаты этих двух реализаций не следует путать.

Измеримыми величинами являются точность определения направления источника, подавление внеосевых источников в децибелах, ширина направленной характеристики и устойчивость к реверберации. Речь идет о гипотезах H-N1-52 и H-N1-53.

Взаимность завершает раздел 13.10. Если источник с вращающимся полем возбуждает в приемнике вращающийся режим, проверяется, демонстрирует ли приемник с соответствующей трёхплечевой модальной структурой иную реакцию на поле с измеримой фазовой циркуляцией по сравнению с контрольным полем без неё, иными словами, является ли триаурально приемник избирательно более чувствительным к полю с вращательной составляющей, чем к полю без неё.

Здесь необходимо повторить определение из главы N1/02.6: термин «триаурально» относится исключительно к геометрии резонатора и не имеет отношения ни к трехканальному слуху, ни к психоакустике. Глава, посвящённая приёмнику, является тем местом, где такая путаница наиболее вероятна.

14 РУЧКА КАК ВОЛНОВОД

Ручка — единственная часть, предназначенная для прямого захвата, и одновременно главный механический канал между центральным узлом, возбудителем и рукой оператора. Несмотря на это, она относится к наименее исследованным частям резонатора.

14.1 Почему отдельная глава

Ручка в предыдущем тексте обозначается как волновод. Речь идет об утверждении о функции, которое пока не подкреплено измерениями.

При этом она занимает исключительное положение во всей конструкции. Через рукоятку в резонатор может поступать механическая энергия от FORKER, а при ручном использовании через неё часть механических колебаний передаётся в руку. Таким образом, она является общим интерфейсом возбуждения, крепления и механического воздействия.

Поэтому в данной главе рассматриваются четыре аспекта: какие семейства волн распространяются в стержне, что из этого следует для распознавания вращательного мода, как можно исследовать внутреннее поле напряжений и что определяет передачу в руку.

14.2 Семейства волн в твердом стержне

В твердом цилиндрическом стержне можно выделить три основных семейства механического отклика, имеющих отношение к данной главе: продольное, торсионное и изгибное. В рамках каждого семейства может существовать несколько мод, а при более высоких частотах — и более сложные поперечные структуры.

Продольная волна чередует растяжение и сжатие вдоль оси; стержень поочередно удлиняется и укорачивается. Торсионная волна скручивает стержень вокруг его оси, при этом его длина не изменяется. Изгибная волна изгибает стержень вбок, то есть вызывает поперечное перемещение.

Отдельные семейства имеют разные фазовые и групповые скорости, а также разную степень дисперсии. Волна изгиба, как правило, обладает выраженной дисперсией, в то время как в основных продольных и торсионных режимах в определённом частотном диапазоне зависимость скорости от частоты может быть значительно слабее. При более высоких частотах и размерах, сопоставимых с длиной волны, необходимо использовать полное модальное описание стержня. Классические решения упругих волн в цилиндрических стержнях, включая описание Поххаммера-Кри, дают дисперсионные соотношения, с которыми можно сопоставить экспериментально измеренные моды [51–54].

К объёмным семействам мод при подходящих условиях могут добавляться поверхностные упругие волны [55]. Их возможный вклад в передачу ощущений в руку является отдельным экспериментальным вопросом, поскольку механический контакт происходит на поверхности рукоятки.

14.3 Симметрия и селекция мод

Модальное состояние плеч определяет изменяющиеся во времени силы и моменты, передаваемые в центральный узел и, следовательно, в ручку. Их результирующая комбинация зависит от пространственной симметрии конкретного мода.

При идеально симметричном «дышащем» ходе поперечные вклады трёх плеч могут в значительной степени гасить друг друга в центральном узле. В рукоятке тогда может более выраженно проявиться осевая, то есть продольная, составляющая движения. Однако фактическое соотношение продольной, изгибной и торсионной реакций зависит от геометрии узла и граничных условий и должно определяться путем измерения.

При несимметричном модальном классе гашение поперечных сил и моментов, как правило, изменяется. Поэтому в рукоятку может передаваться поперечная изгибная составляющая, крутящий момент или их изменяющаяся во времени комбинация. При вращательной суперпозиции вырожденной пары может изменяться во времени и направление результирующего поперечного отклика.

Поэтому диагностической величиной является не само наличие кручения, а многокомпонентный механический отклик рукоятки: амплитудное и фазовое соотношение её продольной, тангенциальной и поперечной составляющих. Этот «отпечаток» сравнивается с одновременно измеренным модальным состоянием плеч в соответствии с главой N1/13.4.

Гипотеза H-N1-34 проверяет, можно ли на основе этого многокомпонентного отклика рукоятки воспроизводимо различить рабочие модальные сценарии, определенные в главе N1/09.

Механическое измерение рукоятки и акустическое картирование поля представляют собой два независимых уровня эксперимента. Совпадение их временного и фазового поведения может подтвердить связь между модальным состоянием резонатора и результирующим полем; несовпадение само по себе является диагностическим результатом и требует отдельного объяснения.

14.4 Стоячая волна вдоль рукоятки

Конечный стержень на обоих концах механически связан с различными импедансами — с центральным узлом резонатора и с местом крепления или возбуждения. Частичные отражения механических волн на этих границах

могут создавать стоячие или квазистоячие компоненты с пространственными минимумами и максимумами движения.

Их положение зависит от длины и поперечного сечения рукоятки, соответствующего семейства волн, частоты и граничных условий. Поэтому прогноз, полученный на основе дисперсионной модели, сравнивается с экспериментально измеренной картой движения. Речь идет о гипотезе H-N1-35.

Если место крепления находится в области небольшого перемещения соответствующего мода, механическая нагрузка может влиять на резонанс в меньшей степени, чем при креплении в области большого локального отклонения. Однако величина этого эффекта зависит также от механического импеданса держателя или руки. Поэтому гипотеза H-N1-38 проверяет зависимость коэффициента качества и собственной частоты от положения и импеданса крепления.

14.5 Поток энергии и вращательная механическая составляющая

Торсионная волна представляет собой механическое состояние, при котором отдельные сечения рукоятки отклоняются под углом вокруг её оси. Речь, таким образом, идёт о явно вращательной составляющей деформации твёрдого тела.

Однако само по себе наличие торсионных колебаний не определяет направленный поток момента импульса. При стоячей торсионной волне две встречные бегущие составляющие могут накладываться друг на друга, и усредненная по времени передача энергии или момента импульса может быть небольшой или нулевой. При бегущей торсионной волне, напротив, можно исследовать направленную передачу механической энергии и момента импульса вдоль оси.

Поэтому в эксперименте локальная торсионная амплитуда отделяется от направления фазового хода. Измеряются амплитуда и фаза тангенциальной составляющей в нескольких точках вдоль рукоятки, что позволяет различить стоячий, продвигающийся или гибридный торсионный процесс.

Одновременно сравнивается поток энергии в продольной, изгибной и торсионной составляющих и отслеживается, передается ли энергия преимущественно через объём тела или значительная часть отклика локализуется у поверхности.

Открытым вопросом остаётся, при каких условиях сосуществуют продольные, изгибные и торсионные составляющие в одном и том же режиме возбуждения и какова фазовая связь между ними.

14.6 Измерения на поверхности

Трехосная лазерная виброметрия регистрирует локальную скорость поверхности в нескольких направлениях и позволяет разложить движение на осевую, тангенциальную и поперечную составляющие. Эти составляющие дают экспериментальную характеристику продольного, торсионного и изгибного поведения, причем в сложных модах они могут возникать одновременно в одной точке.

Тензометрические розетки дают прямую информацию о локальной деформации, но из-за своей массы, клея и жесткости могут локально изменять механические свойства рукоятки; поэтому они используются в качестве дополнительного контактного контроля к бесконтактным измерениям.

Голографическая интерферометрия и спекл-корреляция дают бесконтактное изображение деформации по всей поверхности, что удобно для проверки правильности карты, построенной на основе точечных измерений.

Дополнительным методом является съёмка с помощью высокоскоростной камеры с субпиксельным отслеживанием краёв плеч. По положению краёв на отдельных кадрах, после устранения общего смещения, соответствующего движению держателя, получается относительное движение плеч друг относительно друга.

Частота кадров должна быть достаточно выше наблюдаемой частоты колебаний, чтобы можно было реконструировать временной ход с требуемой фазовой точностью; одного лишь соблюдения критерия Найквиста для этой цели недостаточно. Помимо частоты кадров, контролируется также время экспозиции, чтобы движение в течение одного кадра не вызывало значительного смазывания изображения.

14.7 Взгляд внутрь

Поверхностные методы дают представление о том, что происходит на поверхности. О распределении напряжений в поперечном сечении они говорят косвенно.

Прямой путь предлагает фотоупругость. Фотоупругость использует изменение двойного лучепреломления прозрачного материала при механической нагрузке. Между скрещенными поляризаторами различия главных напряжений проявляются в виде интерференционных полос, из которых можно качественно, а при калибровке — и количественно вывести распределение напряжений.

Временное разрешение или фазовая синхронизация съёмки позволяют реконструировать изменение фотоупругого узора в течение колебательного цикла. По временному сдвигу полос можно впоследствии проверить,

содержит ли структура напряжений стоячие, продвигающиеся или гибридные компоненты.

Следует указать ограничение: прозрачная модель имеет другие материальные константы, чем металлический оригинал, поэтому она служит для проверки формы поля напряжений, а не его значений. Числовое сравнение обеспечивает расчетная модель в соответствии с главой N1/17.

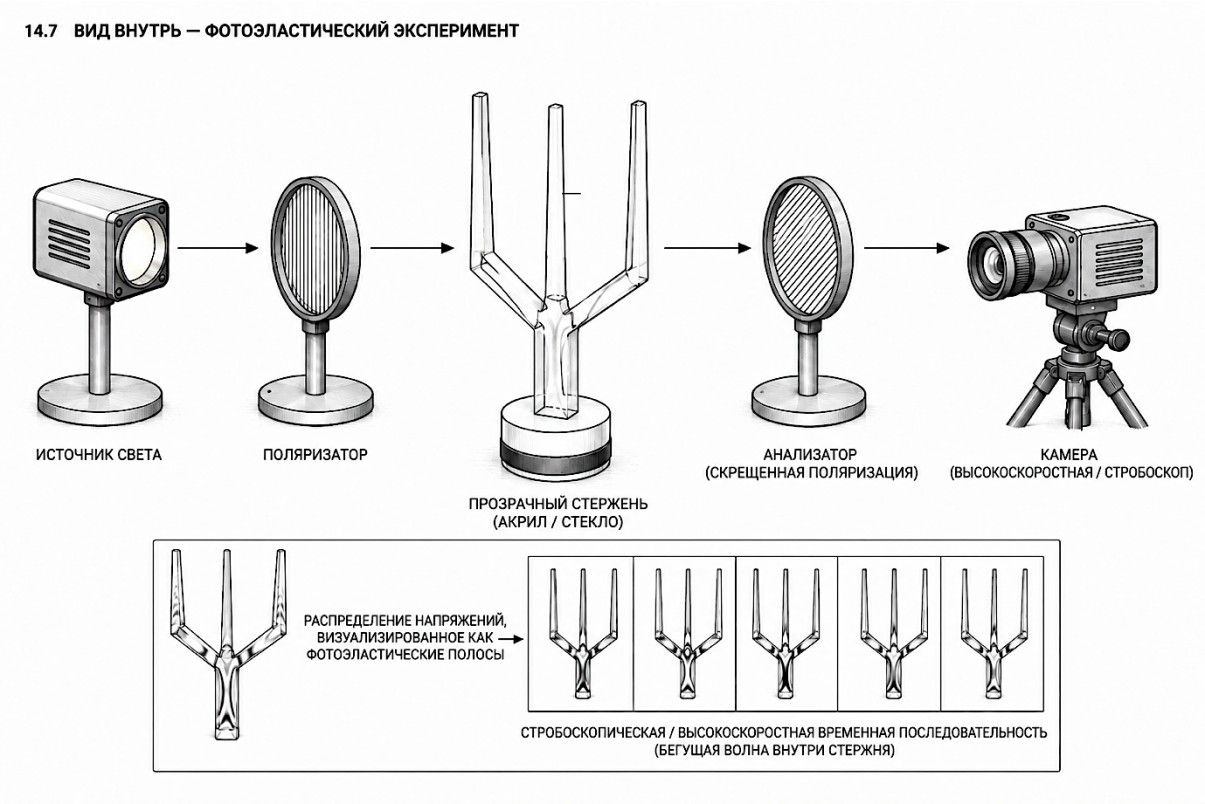


Рис. N1-22: Схема фотоупругого измерения — источник света, поляризатор, прозрачная рукоятка, анализатор, камера.

14.8 Геометрия рукоятки как параметр

Рукоятка определяется длиной, диаметром, возможной коничностью, формой перехода к центральному узлу и окончанием.

Форма перехода между стержнем и центральным узлом является одним из ключевых геометрических параметров, поскольку она определяет локальное изменение механического импеданса и тем самым влияет на отражение, пропускание и преобразование между отдельными волновыми составляющими.

Резкие изменения сечения или жесткости могут усиливать отражение и модальную конверсию, в то время как более плавные переходы могут снижать

несогласование импедансов в определенных частотных диапазонах. Однако конкретный эффект определяется расчетами и измерениями для данной геометрии.

Монолитная рукоятка сравнивается с составной. Граница раздела в соединении может вносить дополнительное несогласование импедансов, трение и затухание. Поэтому сравнение монолитного и составного исполнений позволяет проверить, в какой степени механическая граница изменяет передаточную функцию, модальное расщепление и коэффициент качества.

Поверхностная обработка влияет на поверхностные волны и трение в рукоятке, поэтому она регистрируется наравне с размерами.

14.9 Спиральная и рифлёная рукоятка

Спирально-рифленая рукоятка представляет собой хиральную геометрию, поскольку лево- и правовращающиеся варианты невозможно отождествить простым зеркальным отражением без изменения направленности. Такая геометрическая асимметрия может обеспечивать взаимодействие продольной и торсионной механических реакций. Однако величина и направление этого взаимодействия зависят от глубины, шага, количества витков, поперечного сечения и материала и должны определяться экспериментально.

Из этого следует, что спиральная канавка может действовать как преобразователь между продольной и торсионной волнами. Таким образом, форма элемента становится частью физики конструкции.

Гипотеза H-N1-36 проверяет, демонстрирует ли спирально профилированная ручка при одинаковом возбуждении систематически отличающееся соотношение продольной и торсионной составляющих по сравнению с гладкой контрольной ручкой.

Особым контрольным тестом является изменение «рукости» — изменение направления спирали. Если наблюдаемая взаимосвязь действительно является следствием хиральной геометрии, переход от правовращающегося к левовращающемуся исполнению должен воспроизводимо изменять знак соответствующего торсионного отклика при сохранении остальных условий.

14.10 Самоподобные профили

Профиль рукоятки с геометрическими элементами, повторяющимися в нескольких масштабах, может создавать несколько характерных механических длительных масштабов. Они могут влиять на рассеяние, локальные резонансы и распространение механических волн в различных частотных диапазонах.

Будет ли такой профиль действительно создавать отдельные полосы передачи или полосы задержки, зависит от конкретной геометрии, материала и связи отдельных элементов и должно определяться по передаточной функции или дисперсионной модели.

В эксперименте сравниваются гладкая ручка и ручка с самоподобным профилем при одинаковой общей длине, материале и максимально приближенной массе. Измеряется частотно-зависимая передаточная функция продольной, торсионной и изгибной составляющих и ищутся воспроизводимые полосы повышенной или подавленной передачи.

Историческая справка: фрактальная геометрия возникла, в частности, из анализа ошибок на линиях передачи данных. Бенуа Мандельброт, работая в IBM в 1963–1965 годах, обнаружил, что ошибки группировались не случайным образом, а самоподобно, в структуре, напоминающей множество Кантора.

14.11 Передача в руку

Рука не является жёсткой опорой. Она обладает собственной упругостью, массой и демпфированием, поэтому отбирает энергию у резонатора и изменяет характер его затухания.

Для этого свойства существует стандарт. Механическое сопротивление системы «рука и плечо» определено в стандарте ISO 10068 и указывает, с какой силой рука реагирует на вынужденные колебания в зависимости от частоты.

Передача вибрации на руку зависит, прежде всего, от частоты и направления колебаний, силы захвата, площади контакта, положения захвата на рукоятке и механического импеданса системы «кисть–рука». Положение относительно локальных минимумов и максимумов движения, согласно главе 14.4, является одним из ключевых параметров.

Измеряется передаточная функция между движением рукоятки и реакцией руки в определённых точках измерения. Движение рукоятки регистрируется бесконтактно с помощью виброметра, а реакция руки — например, с помощью лёгкого акселерометрического или оптического датчика в зависимости от требуемой инвазивности метода.

14.12 Наиболее эффективный захват

На вопрос, какой захват является лучшим, существует два ответа, и выбор зависит от поставленной цели.

Если цель состоит в том, чтобы минимизировать механическую нагрузку руки на резонатор и продлить затухание, подходящим вариантом является место с малой локальной амплитудой движения соответствующего мода.

Если же цель, напротив, заключается в максимизации механической передачи в руку, подходящим кандидатом является область с более высокой локальной амплитудой и подходящим механическим импедансом контакта.

Точный оптимум невозможно определить только по положению узла или амплитуде колебаний, поскольку результат зависит также от направления колебаний, силы захвата, площади контакта и частоты. Поэтому гипотеза H-N1-37 сравнивает передачу и демпфирование при систематическом смещении захвата вдоль рукоятки.

Поэтому в документации выделяются две задачи оптимизации: минимизация нагрузки на резонатор и максимизация механической передачи в руку.

14.13 Безопасность при удержании

Удержание вибрирующего предмета регулируется отдельным стандартом. Стандарт ISO 5349 предоставляет методологическую основу для измерения и оценки воздействия вибраций, передаваемых на систему «кисть–рука». Длительное воздействие может быть связано с сосудистыми, неврологическими и опорно-двигательными последствиями; конкретные рабочие и предельные значения оцениваются в соответствии с применимыми правилами безопасности.

Поэтому при каждом эксперименте с ручным удержанием регистрируются частотно-взвешенный уровень вибрации, время воздействия, способ захвата и положение руки. Оценка безопасности отделена от вопроса физического воздействия резонатора.

Дозиметрия воздействия на оператора подробно рассмотрена в главе N1/18. Здесь достаточно отметить, что положение захвата влияет не только на звук, но и на степень воздействия.

15 МАТЕРИАЛЬНАЯ ОСНОВА

Из чего можно изготовить резонатор и что при этом изменится.

15.1 Какие требования предъявляются к материалу

Выбор материала существенно влияет на собственные частоты, демпфирование, механическую стабильность, обрабатываемость и применимость магнитных методов в соответствии с главой N1/13. Однако конечный отклик всегда является результатом сочетания свойств материала, геометрии и граничных условий.

Первым требованием является низкое внутреннее демпфирование. Часть энергии колебаний в любом материале преобразуется в тепло, и эта доля определяет, как быстро затухают колебания. Она выражается коэффициентом качества, обозначаемым буквой Q.

Второе требование — повторяемость. Материал-заготовка, технологический процесс и конечная геометрия должны быть задокументированы таким образом, чтобы можно было отличить разброс свойств материала от производственных и геометрических отклонений.

Третьим требованием является обрабатываемость. Допуски на углы согласно главе N1/06.8 являются одним из результатов программы N1; материал, который невозможно точно обработать, приводит к искажению этого показателя.

Четвертым фактором является стабильность во времени и в зависимости от температуры. Резонансная частота изменяется с температурой, и диапазон этого изменения фиксируется при каждом измерении.

15.2 Базовый набор

Следующие материалы составляют базовый набор. Они доступны, хорошо документированы и охватывают диапазон от высокого коэффициента качества до хорошей обрабатываемости.

- Алюминиевые сплавы авиационного класса — хорошая обрабатываемость, низкий вес, доступность. Базовый материал первых серий.
- Титан и его сплавы — высокая прочность и стабильность, худшая обрабатываемость и более высокая цена.
- Колокольная бронза, то есть оловянная бронза — исторически использовалась именно из-за длительного затухания; подходит для литья, хуже поддается механической обработке.

- Кварцевое стекло — потенциально очень низкое внутреннее затухание и высокий коэффициент качества при правильном изготовлении; недостатком является хрупкость и сложность формовки.
- Латунь, медь и нержавеющие стали — доступны, хорошо поддаются обработке, имеют различную плотность и скорость звука.

Материалы с более высоким внутренним затуханием служат для проверки зависимости исследуемого явления от коэффициента качества и длительности затухания.

В приведенной ниже таблице указаны ориентировочные значения, взятые из литературы по материалам и каталожных данных. Это не значения, измеренные в рамках данной программы; измеренные значения ведут отдельно, и в случае несоответствия с табличными значениями приоритет имеют измеренные данные.

Значения Q и α_f считаются ориентировочными интервалами и перед использованием при разработке конкретного эксперимента проверяются для соответствующего состояния материала и частотного диапазона.

Материал	**ϱ (кг/м³)**	**E (ГПа)**	**c (м/с)**	**Q (ряд)**	**αf (ppm/K)**	**Обрабатываемость**
Алюминиевый сплав 6061 или 7075	2 750	70	5 050	10^3 – 10^4	от −200 до −300	отлично
Титановый сплав Ti-6Al-4V	4 430	114	5 070	10^3 – 10^4	от −150 до −250	плохо
Оловянная бронза, колокольная бронза	8 750	100	3 380	10^3 – 10^4	от −250 до −350	хуже, поддается литью
Кварцевое стекло	2 200	72	5 720	10^5 — 10^7	от +80 до +100	хрупкие, шлифование
Латунь CuZn37	8 470	105	3 520	10^3	от −250 до −350	очень хорошая
Медь	8 960	120	3 660	10^2 — 10^3	от −300 до −400	средняя, липкая
Нержавеющая сталь 304, аустенитная	8 000	193	4 910	10^3	от −200 до −300	средняя
Нержавеющая сталь 430, ферритная	7 700	200	5 100	10^3	от −200 до −300	хорошо

Обозначения столбцов: ϱ — плотность, E — модуль упругости при растяжении, c — скорость звука в стержне, Q — коэффициент качества, αf — температурный коэффициент резонансной частоты.

Скорость звука рассчитана по формуле $c = \sqrt{(E/\varrho)}$ для продольной волны в тонком стержне, чтобы она во всей таблице выводилась одинаково. Для объемной среды и для изгибных мод действуют другие соотношения согласно главе N1/16.

Коэффициент качества указывается порядком, а не числом. Для металлов он зависит от термической обработки, холодной деформации и состояния поверхности настолько, что для одного и того же материала может различаться на порядок и более. Авторитетной таблицы для этой величины не существует, и решающим значением является измерение на конкретном образце.

Обратите внимание на две строки. Кварцевое стекло имеет коэффициент качества на два–четыре порядка выше, чем у металлов, и является единственным материалом в таблице с положительным температурным коэффициентом, поскольку его модуль упругости растёт с температурой; таким образом, при нагревании его частота увеличивается, в то время как у металлов она снижается. Медь во многих механических резонаторах обладает более высоким внутренним демпфированием, чем подходящие колокольные бронзы. Добавление олова значительно изменяет микроструктуру, упругие и демпфирующие свойства сплава; однако конкретное значение Q зависит от состава, термической обработки, формовки и состояния конкретного экземпляра.

Материалы с более высоким внутренним демпфированием, а именно дерево, полимеры и композиты, в таблице не приводятся. Они служат в качестве контрольных образцов, и их табличные значения настолько зависят от конкретного экземпляра, что ориентировочное число было бы вводящим в заблуждение.

15.3 Магнитострикционные материалы

Методы, описанные в главе N1/13.3, требуют использования материала, размеры которого изменяются в магнитном поле. Не каждый ферромагнитный материал одинаково подходит для этой цели, и решающим критерием является сочетание величины эффекта с обрабатываемостью.

- Сплав железа и галлия, известный как Галфенол, представляет собой один из наиболее подходящих кандидатов в тех случаях, когда требуется сочетание выраженной магнитострикции и относительно хорошей обрабатываемости.
- Никель — классический магнитострикционный материал, легко поддающийся механической обработке и недорогой, с меньшим эффектом, чем у гальфенола.
- Терфенол-D демонстрирует очень высокую магнитострикцию, однако его хрупкость и сложность обработки значительно затрудняют

изготовление прецизионного монолитного резонатора; более целесообразным может быть его использование в качестве активного элемента или слоя в композитной конструкции.

При работе с магнитострикционными материалами необходимо учитывать, что их механические свойства зависят от состояния намагниченности. Это является основой настройки частоты в соответствии с главой N1/13.7 и одновременно причиной, по которой при каждом измерении регистрируется присутствующее поле.

15.4 Контрольная пара нержавеющих сталей

Для отделения магнитного вклада от других влияний полезна контрольная пара материалов с резко отличающейся магнитной реакцией и максимально схожими основными механическими свойствами.

Такую пару представляют нержавеющие стали. Аустенитные нержавеющие стали, как правило, слабомагнитные или практически немагнитные в отожженном состоянии, тогда как ферритные и мартенситные марки являются ферромагнитными.

Поэтому два геометрически идентичных резонатора из удачно подобранных аустенитных и ферритных классов могут служить в качестве практической контрольной пары с значительно различающейся магнитной реакцией и относительно схожими основными механическими параметрами. Однако речь не идёт о паре, отличающейся исключительно магнетизмом; остальные различия в материалах фиксируются и учитываются при интерпретации.

Точное обозначение марок и их состав указываются после проверки наличия у поставщика, поскольку фактический состав варьируется от партии к партии, а магнитные свойства аустенитных сталей, кроме того, изменяются при холодной деформации.

Конкретные марки сталей выбираются в зависимости от наличия у поставщика и указываются в протоколе каждого изделия вместе с номером плавки и сертификатом.

Проницаемость берется из аттестата и указывается в документе как принятое значение в соответствии с правилом, изложенным в главе N1/15.2. Табличное значение для класса материала не используется, поскольку проницаемость аустенитных сталей изменяется при холодной деформации, и поставляемый материал может значительно отличаться от табличных значений.

При приемке материала проверяется, соответствует ли значение из сертификата действительности. Сравнительное испытание с помощью постоянного магнита служит лишь в качестве входного отбора. Если магнитный отклик экспериментально находится в критическом диапазоне, фиксируется также количественное значение проницаемости или

характеристики намагничивания, указанные в сертификате или полученные в результате дополнительных измерений. Точное измерение проницаемости не является предметом настоящего документа и не проводится; контрольная пара предназначена для отличия магнитного материала от немагнитного, а не для определения их магнитных свойств.

Если при приемке выявляется несоответствие сертификату, изделие не включается в серию, и этот факт фиксируется.

15.5 Тетраэдрическая топология как производственная гипотеза

Угол 109,47°, указанный в главе N1/06.3, встречается также в связях атома углерода в конфигурации sp^3 и в кремний-кислородном тетраэдре, который является основной структурной единицей силикатов, включая кварцевое стекло.

Это совпадение в документе не приводится в качестве аргумента. Оно формулируется как вопрос, имеющий измеримую форму: имеет ли монолит с тетраэдрической топологией иной коэффициент качества мод, связанных с этим углом, чем тело из того же материала без такой топологии?

Само по себе числовое совпадение между макроскопическим углом резонатора и микроскопическими углами связи не представляет собой физический механизм. Поэтому эксперимент проверяет не «резонанс угла с материалом», а вопрос о том, демонстрирует ли геометрически привилегированная конфигурация при одном и том же материале воспроизводимо иные модальные свойства, чем близкие конфигурации того же геометрического семейства.

Основным контролем служит серия геометрически схожих резонаторов с углом φ, систематически смещенным вокруг значения 109,47°. Простое тело из того же материала и примерно того же объема может служить дополнительным эталонным образцом, но не единственным контролем.

Гипотеза была независимо сформулирована двумя внешними рецензентами документа, что повышает её ценность как идеи, поступившей извне. Речь идёт о гипотезе H-N1-55.

15.6 Сравнение топологий на одном полуфабрикате

На вопрос, отличается ли поведение четырёхлучевого резонатора от поведения трёхлучевого, можно ответить с помощью измерений, проводимых в исключительно чёткой конфигурации.

Оба образца изготавливаются из одного и того же полуфабриката, в одной производственной серии, на одном и том же станке и измеряются с помощью одной и той же метрологической аппаратуры. Использование одного полуфабриката значительно ограничивает разброс материалов между

образцами, хотя локальная микроструктура, внутренние напряжения и различия, возникшие в результате механической обработки, могут сохраняться.

При сравнении конструкций с разным количеством плеч отдельно фиксируются общая масса, момент инерции, характерные размеры и собственные частоты. Эти величины не обязательно полностью совпадают между различными топологиями; поэтому их изменение рассматривается как часть физического следствия изменения топологии и явно указывается при интерпретации.

H-N1-56 — При использовании одного и того же материала и сопоставимой характерной масштабной единицы трёхлучевая и четырёхлучевая топологии демонстрируют воспроизводимо различающуюся модальную структуру.

15.7 Влияние производства на материал

Материал после механической обработки не является тождественным материалу в полуфабрикате. Стружечная обработка может создавать или перераспределять остаточные напряжения, изменять поверхностный слой и локально влиять на микроструктуру.

Внутреннее напряжение при этом является одной из причин, вызывающих разделение частот вырожденной пары в соответствии с главой N1/09.4. Асимметрично распределенное остаточное напряжение может изменять модальное расщепление вырожденной пары и тем самым влиять на стабильность или соотношение вращательной и гибридной составляющих.

Отсюда вытекает требование к документации производства. Для каждой детали фиксируются полуфабрикат и его партия, процесс обработки, возможное отжигание и поверхностная обработка. Без этих данных невозможно объяснить различия в поведении двух деталей.

Отжиг для снятия остаточных напряжений исследуется как отдельная производственная переменная. Сравнение отжигаемых и неотжигаемых деталей позволит определить, в какой степени термическая история производства влияет на модальные свойства; этот эффект нельзя объяснить исключительно снятием напряжений без учета других микроструктурных изменений.

15.8 Серия образцов

Измерения, описанные в данном документе, требуют серии образцов, которая позволит разделить отдельные факторы влияния. Серия состоит из пяти ветвей.

- Материальная ветвь: одинаковая геометрия, изготовленная из различных материалов.

- Ветвь допусков: один и тот же материал с контролируемым отклонением угла в соответствии с главой N1/06.8.
- Топологическая ветвь: различные конфигурации из одного и того же полуфабриката.
- Контрольная ветвь: пара нержавеющих сталей и двухплечевой резонатор в качестве сравнительного источника.
- Масштабная ветвь: та же конфигурация, уменьшенная таким образом, чтобы основная частота попадала в ультразвуковой диапазон в соответствии с главой N1/09.12.

К масштабной ветви предъявляются три требования, которых нет у других ветвей. Она должна содержать по крайней мере одну конфигурацию, совпадающую с конфигурацией в слышимой части серии; без этого гипотеза H-N1-63 о масштабном сходстве не может быть проверена, поскольку сравнивать можно только одно и то же в двух масштабах. Кроме того, она должна содержать как минимум два разных размера, чтобы можно было отслеживать зависимость от отношения размера к длине волны, а не только одну точку. И, наконец, в неё входит как минимум одна деталь с управляемым отклонением угла, что позволит отслеживать чувствительность фазовой сингулярности к контролируемому нарушению симметрии согласно H-N1-62.

Образцы этой ветви изготавливаются методом точной механической обработки у внешнего поставщика. Для эталонной ветви предпочтительна точная механическая обработка или другая технология, способная обеспечить требуемые допуски. Пригодность конкретного производственного процесса оценивается с учетом материала, размера и требуемой геометрической точности.

Каждая деталь получает постоянную маркировку и собственный регистрационный лист. Маркировка штампуется или гравируется на рукоятке в месте, которое не влияет на колебания плеч.

Количество изделий в отдельных ветвях определяется следующим образом:

Линия	**Шт.**	**Чем отличаются детали**
Материал	8	одинаковая геометрия, восемь материалов базового набора
Допуски	6	одинаковый материал, контролируемое отклонение угла от нуля до предела допуска
Топологическая	9	три конфигурации в трёх вариантах изготовления из одного и того же полуфабриката
Контрольная	3	две марки нержавеющей стали и двухлучевой резонатор
Измерительная	6	два размера, одна одинаковая конфигурация с слышимой серией, одна штука с отклонением
Всего	**32**	

Предлагаемая базовая серия состоит из 32 экземпляров и представляет собой рабочий минимум для пилотного разделения указанных экспериментальных ветвей. Окончательное количество образцов может быть скорректировано после пилотных измерений в зависимости от измеренного разброса и требуемой статистической мощности. Материальная ветвь с одним образцом на каждый материал служит на первом этапе в качестве скрининга; сама по себе она не позволяет отделить материальный эффект от межобразцовой производственной вариабельности. Поэтому после первого скрининга кандидатные материалы проверяются с помощью повторных образцов.

Количество отражается в бюджете в статьях EQ-N1-01 для производства слышимой части серии и EQ-N1-37 для масштабной ветви. Брак при производстве отражается отдельной строкой в главе N1/19.7, поскольку при контролируемом отклонении угла в десятых долях градуса часть изделий выходит за пределы допуска и подлежит повторному изготовлению.

15.9 Ориентация кристалла как параметр геометрии

В предыдущем тексте материал рассматривается преимущественно как эффективно изотропная среда, механические свойства которой в первом приближении можно описать одним набором упругих параметров. Для поликристаллических металлов такое описание часто бывает достаточным, поскольку вклады большого числа разноориентированных зерен на макроскопическом уровне частично усредняются.

Монокристалл ведет себя иначе. Его упругие свойства анизотропны и зависят от направления в кристаллической решетке. Поэтому одно и то же тело, изготовленное из монокристалла, может демонстрировать различную модальную реакцию в зависимости от того, как кристаллическая решетка ориентирована по отношению к его геометрическим осям.

Для конфигурации TORAMID возникает особенно интересный случай. Её три несущих направления можно геометрически соотнести с тремя взаимно перпендикулярными направлениями, соответствующими рёбрам куба, а центральную ось — с направлением пространственной диагонали. Поэтому для кубического монокристалла можно выбрать ориентацию, при которой направление [111] лежит вдоль центральной оси резонатора, а три плеча выровнены по направлениям [100], [010] и [001].

Направления [100], [010] и [001] в кубической кристаллической системе кристаллографически эквивалентны, а направление [111] представляет собой ось тройной ротации. При таком выравнивании тройная симметрия тензора материала может напрямую совпадать с макроскопической тройной геометрией резонатора.

В отличие от чисто численного совпадения углов, обсуждаемого в главе N1/15.5, эта ориентация имеет непосредственное механическое значение. При повороте кристаллической решетки относительно неизменной

макроскопической геометрии изменяются эффективные упругие свойства в направлениях отдельных сегментов, при этом сама форма резонатора остаётся неизменной.

Это позволяет провести чистый тест на симметрию материала без изменения геометрии тела.

При целенаправленном повороте кристаллической решетки относительно осей резонатора отслеживается изменение собственных частот, форм мод и расщепления соответствующей вырожденной или почти вырожденной пары. Таким образом, ориентация решетки становится плавно регулируемой материальной переменной, которая может нарушать или восстанавливать соответствие между геометрической и кристаллической симметрией.

Гипотеза H-N1-65

В монокристаллическом теле с тройной геометрией модальная структура и расщепление соответствующей вырожденной или почти вырожденной пары зависят от ориентации кристаллической решетки относительно осей резонатора. В частности, проверяется, представляет ли выравнивание кубических направлений [100], [010] и [001] с тремя плечами и направления [111] с центральной осью симметрически привилегированную или экстремальную ориентацию.

Гипотеза не определяет заранее, будет ли при данной ориентации расщепление минимальным, максимальным или будет соответствовать другой характерной точке. Это определят результаты расчетов и экспериментов.

Первичный расчетный тест

Перед изготовлением монокристаллического образца гипотеза проверяется с помощью анизотропной расчетной модели в соответствии с главой N1/17.

Геометрия резонатора в модели остается фиксированной, а тензор упругой жёсткости выбранного монокристалла численно поворачивается относительно неё. Для каждой ориентации фиксируются, в частности:

- собственные частоты наблюдаемых мод,
- величина модального расщепления Δf,
- пространственные формы мод,
- ориентация модальных осей,
- соотношение симметричной и асимметричной модальных составляющих.

Особое внимание уделяется сравнению ориентации с совпадением [111] // центральная ось и [100], [010], [001] // плечи с слегка повернутыми ориентациями решетки.

Таким образом, расчетный прогон позволит установить, существует ли вообще измеримый эффект ориентации кристалла и какое изменение угла необходимо для его различения.

Экспериментальное изготовление монокристаллического образца производится только в том случае, если модель предсказывает разницу, превышающую ожидаемую экспериментальную погрешность и производственный разброс.

Экспериментальная проверка

Если расчетная модель предсказывает достаточно значительный эффект, изготавливаются монокристаллические образцы с известной кристаллографической ориентацией. Ориентация решетки проверяется до обработки и, по возможности, после неё с помощью подходящего кристаллографического метода.

Сравниваются как минимум две ориентации:

1. эталонное совпадение кристаллической и геометрической симметрии,
2. определённое поворотное расположение при неизменной макроскопической геометрии.

Измерение включает те же модальные величины, что и расчетная модель, и проводится при одинаковых условиях закрепления, возбуждения и температуры.

Потенциальные материалы и ограничения

Монокристаллические металлы размером, необходимым для всего резонатора, могут быть сложны в производстве и дорогостоящими. Кроме того, механическая обработка может изменять поверхностный слой и вносить дефекты или остаточные напряжения, которые при интерпретации результатов необходимо отделить от самой кристаллической ориентации.

Кроме того, в случае мягких металлов, например меди, фактор качества может быть ограничен внутренним затуханием и движением дислокаций. Поэтому с практической точки зрения подходящими кандидатами являются также более жесткие монокристаллические материалы с хорошо охарактеризованным упругим тензором, например монокристаллический кремний.

Эта ветвь в N1 представлена как материально-геометрическая гипотеза. Её значение заключается в том, что она позволяет изменять симметрию механических свойств без изменения внешней формы резонатора и тем самым отделить геометрический и материальный вклады в модальное расщепление.

16 МАТЕМАТИЧЕСКИЕ СВЯЗИ

Как рассчитать частоту по размерам — и где именно расчёт перестаёт быть надёжным.

16.1 Задачи модели

Цель аналитической модели — оценить взаимосвязь между размерами, параметрами материала и характеристическими собственными частотами резонатора, а также определить чувствительность результата к изменению отдельных параметров. Без этого пришлось бы изготавливать и измерять каждую деталь, что при серийном производстве с контролируемым отклонением в соответствии с главой N1/06.8 является невыполнимым.

Модель должна дать ответы на три вопроса. Какую частоту будет иметь тело заданных размеров. Как изменится частота при изменении одного из размеров. И насколько точно должен соблюдаться размер, чтобы частота укладывалась в выбранный допуск.

В данной главе рассматривается аналитический подход, то есть формулы. Численный подход, в котором тело рассматривается как единое целое, является предметом главы N1/17.

16.2 Изгибные колебания плеча

Плечо резонатора ведёт себя как стержень, закреплённый на одном конце и свободный на другом. Его изгибные колебания описываются классической теорией, носящей имена Эйлера и Бернулли [ссылка].

Частота колебаний такой балки зависит от четырёх величин: длины, размера поперечного сечения в направлении изгиба, модуля упругости материала и его плотности. Соотношение между ними имеет вид:

$$f \propto (h/L^2) \cdot \sqrt{(E/\rho)}$$

где h — толщина плеча в направлении колебаний, L — его длина, E — модуль упругости, а ρ — плотность. Полная формула содержит ещё числовой коэффициент, который определяется краевыми условиями и формой поперечного сечения.

Из вида соотношения вытекают два практических следствия. Частота уменьшается пропорционально квадрату длины, так что плечо вдвое большей длины звучит в четыре раза ниже при неизменном сечении и материале. А частота растёт прямо пропорционально толщине, так что более тонкое плечо звучит ниже.

Корень из отношения модуля упругости к плотности имеет размерность скорости и соответствует скорости, с которой в данном материале распространяется продольная волна. В рамках простой модели Эйлера–

Бернулли материал входит в собственную частоту через комбинацию $\sqrt{(E/\varrho)}$. Поэтому два материала с одинаковым значением этого отношения могут иметь при одинаковой геометрии схожую частоту основного изгибного мода. Однако в более точной модели на результат могут влиять и другие упругие параметры, анизотропия, демпфирование и сдвиговая деформация.$\sqrt{E/\rho}$

16.3 Почему простого соотношения недостаточно

Указанное соотношение справедливо для отдельного стержня, закреплённого на неподвижной опоре. Однако плечо резонатора не закреплено — оно соединено с центральным узлом, который сам перемещается.

Соединение плеч через центральный узел означает, что их движение нельзя описывать как три независимых закреплённых стержня. Движение одного сегмента изменяет динамические условия остальных, и собственные моды, следовательно, относятся ко всей соединённой структуре.

При идеальной тройной симметрии этой связанной системы соответствующий несимметричный модальный класс может образовывать двумерную вырожденную пару согласно главе N1/09.2. Механическая связь определяет конкретные формы и частоты мод, в то время как их симметричная классификация вытекает из симметрии всего тела.

Поэтому аналитическое соотношение служит для оценки и определения, в каком направлении следует изменять размер. Точное значение и, в частности, расщепление вырожденной пары дает только численная модель.

16.4 Влияние других размеров

Помимо длины и толщины плеча в результат входят и другие размеры, влияние которых меньше, но не пренебрежимо мало.

- Ширина плеча в направлении, перпендикулярном изгибу — в простой модели Эйлера–Бернулли при изгибе в одной главной плоскости ширина прямоугольного сечения сокращается из выражения для результирующей частоты. Однако в полной модели она влияет на торсионную и поперечную жесткость, распределение массы и связь с центральным узлом.

- Форма и размер центрального узла — определяют жёсткость соединения и, следовательно, степень взаимодействия.

- Длина и диаметр рукоятки — изменяют её массу, механический импеданс и собственное волновое поведение, тем самым влияя на граничные условия центрального узла и положение минимумов и максимумов движения в соответствии с главой N1/14.4.

- Угол φ согласно главе N1/06.1 — изменяет направление, в котором плечо действует на узел, и, следовательно, распределение сил.

Порядок, в котором эти величины влияют на частоту, является предметом анализа чувствительности в главе N1/17.4.

16.5 Температурная зависимость

Для большинства обычных металлов в рассматриваемом температурном диапазоне с ростом температуры эффективный модуль упругости уменьшается, а размеры тела увеличиваются. Поэтому оба этих фактора, как правило, смещают собственную частоту в сторону понижения. Однако величина и знак температурного смещения зависят от материала; например, кварцевое стекло может демонстрировать противоположную тенденцию, согласно главе N1/15.2.

Для простой модели изгиба согласно главе N1/16.2 действует приближенная зависимость:

$$f \propto (1/L^2) \cdot \sqrt{(E/\varrho)}$$

Поэтому температурный коэффициент резонансной частоты не тождественен только температурному коэффициенту модуля упругости. Он включает в себя совокупное влияние изменений упругих свойств, размеров и плотности материала. Поэтому на практике для каждого материала он определяется экспериментально как относительное изменение собственной частоты на единицу температуры.

$$\alpha f = (1/f) \cdot (df/dT)$$

где αf — температурный коэффициент резонансной частоты, f — измеряемая собственная частота, а T — температура. При небольшом температурном интервале изменение можно аппроксимировать линейно:

$$\Delta f/f \approx \alpha f \cdot \Delta T$$

При сравнительных измерениях регистрируется не только температура помещения, но и температура самого резонатора или его достаточно близкой опорной точки после достижения теплового равновесия. При измерениях, в которых сравниваются частоты двух образцов или отслеживается расщепление вырожденной пары, температурный дрейф может быть сопоставим с измеряемой разницей.

Поэтому при каждом измерении температура резонатора регистрируется вместе с частотой. При проведении сравнительных серий образцы перед измерением дают установиться на одинаковой температуре, а температурный коэффициент для соответствующего материала проверяется экспериментально. Ориентировочные значения приведены в главе N1/15.2.

16.6 Расщепление вырожденной пары

Расщепление вырожденной пары, обозначаемое Δf, относится к ключевым величинам документа, поскольку непосредственно характеризует степень нарушения вырожденности исследуемой модальной пары.

$$\Delta f = |f_1 - f_2|$$

где f_1 и f_2 — собственные частоты двух мод, составляющих рассматриваемую пару.

Нарушение идеальной симметрии может привести к расщеплению вырожденной пары. В динамике тел с ротационной симметрией это явление хорошо известно [57], причем на конкретную величину расщепления могут влиять несколько различных нарушений: отклонение угла, различие в длине или толщине плеч, неравномерное остаточное напряжение, анизотропия материала, магнитная нагрузка или несимметричное крепление.

Для небольших нарушений симметрии в первом приближении можно ожидать плавной зависимости расщепления от величины нарушения. В некоторых режимах первый член этой зависимости может быть приблизительно линейным, однако конкретный ход зависит от типа нарушения и модальной структуры и должен быть определен путем измерения или с помощью численной модели.

Исследование допусков в соответствии с главой N1/06.8 поэтому отслеживает Δf как функцию управляемого геометрического отклонения, а численная модель в соответствии с главой N1/17.4 позволяет выделить влияние отдельных параметров. Аналитическая модель предоставляет, в частности, оценку чувствительности и порядка; точное значение Δf определяется на основе модального расчета и экспериментального спектра.

При интерпретации Δf не оценивается изолированно. Одновременно регистрируются коэффициент качества, ширина резонансных пиков, модальные формы, а также амплитудное и фазовое разложение движения в соответствии с главами N1/09 и N1/13. Таким образом можно отличить само частотное расщепление от изменения демпфирования или от перехода между симметричным, несимметричным и гибридным модальным поведением.

16.7 Масштабирование

Для геометрически подобных тел из одного и того же материала и при динамически подобных граничных условиях собственные механические частоты в линейной упругой модели масштабируются приблизительно обратно пропорционально характерному размеру. Если все размеры тела увеличить в s раз, соответствующие собственные частоты изменятся приблизительно в 1/s раз.

$$L \rightarrow sL \quad \Rightarrow f \rightarrow f/s$$

Это правило позволяет разработать одну геометрию и изготовить её в нескольких масштабах с предсказуемым смещением собственных частот. Однако оно действует при механическом сходстве тела и само по себе не гарантирует полного сходства излучаемого акустического поля.

При сравнении различных масштабов необходимо сохранить или, по крайней мере, зафиксировать соответствующие безразмерные параметры. Основным из них является отношение характерного размера источника D к акустической длине волны λ или, соответственно, эквивалентный волновой параметр:

$$D/\lambda$$

$$kD = 2\pi D/\lambda$$

где k — акустическое волновое число. Кроме того, на сходство могут влиять коэффициент качества, потери в материале, гидродинамическая нагрузка, вязкость среды, способ крепления и другие граничные условия.

Поэтому гипотеза H-N1-63 проверяет масштабное сходство, а не абсолютную масштабную инвариантность. Если после учета соответствующих безразмерных параметров в разных масштабах проявится одинаковый тип модальной и фазовой организации, это подтвердит представление о том, что исследуемый механизм является геометрико-модальным свойством системы. Если сходство нарушается, различие интерпретируется как информация о физическом параметре, который не сохранился при простом масштабировании.

Масштабная ветвь экспериментальной серии определена в главе N1/15.8, а переход в ультразвуковой диапазон — в главе N1/09.12.

16.8 TRIAURAL Calculator

Соотношения из данной главы переносятся в вычислительный инструмент TRIAURAL Calculator. Инструмент на основе заданных размеров и параметров материала оценивает характерные собственные частоты в рамках выбранной аналитической модели, а также позволяет выполнить обратный расчет приблизительных размеров для требуемой частоты.

Аналитические результаты в инструменте всегда обозначаются как приблизительные. Триауральный резонатор не соответствует точно условиям отдельного прямого стержня с идеальными краевыми условиями; плечи механически соединены через центральный узел, а ручка представляет собой дополнительный динамический элемент. Поэтому точные собственные частоты и модальные формы определяются с помощью численной модели в соответствии с главой N1/17 и последующих экспериментальных измерений.

Инструмент публикуется в виде открытого исходного кода вместе с документацией. Для каждой модели указываются её область применимости, использованные допущения и сравнение расчётных значений с измерениями

на уже изготовленных экземплярах. Таким образом, пользователь получает не только итоговое значение, но и информацию об эмпирически установленном отклонении аналитической оценки.

Изгибные колебания вставленного свободного стержня

$$f_n = (\mu_n^2 / 2\pi) \cdot (\varkappa / L^2) \cdot \sqrt{(E/\varrho)}$$

где f_n — собственная частота n-го изгибного мода, L — длина стержня, E — модуль упругости, ϱ — плотность, $\varkappa = \sqrt{(I/A)}$ — радиус инерции сечения, а μ_n — безразмерный собственный параметр, вытекающий из граничных условий [54]. Для идеального закреплённого свободного стержня приблизительно выполняется:

$$\mu_1 = 1{,}875 \qquad \mu_2 = 4{,}694 \qquad \mu_3 = 7{,}855$$

Для более высоких мод приблизительно:

$$\mu_n \approx (2n - 1)\pi/2$$

Обозначение μ_n используется намеренно, чтобы не путать его с геометрическим параметром β, введенным в главе N1/06.5, или с акустической длиной волны λ.

Радиус инерции поперечного сечения $\varkappa$

Поперечное сечение	Характеристический размер	$\varkappa = \sqrt{(I/A)}$
Круглый	диаметр d	d/4
Квадратный	сторона a	$a/\sqrt{12} \approx 0{,}2887a$
Прямоугольный	толщина h в направлении колебаний	$h/\sqrt{12} \approx 0{,}2887h$
Межкольцо	внешний диаметр D, внутренний d	$\sqrt{(D^2 + d^2)}/4$

Продольные колебания тонкого однородного стержня

Для стержня с обоими концами одного типа — свободный-свободный или закрепленный-закрепленный — в идеальной одномерной модели справедливо:

$$f_n = (n / 2L) \cdot \sqrt{(E/\varrho)} \qquad n = 1, 2, 3, \ldots$$

При комбинации «закрепленный-свободный» возникают четвертьволновые режимы:

$$f_n = ((2n - 1) / 4L) \cdot \sqrt{(E/\varrho)} \qquad n = 1, 2, 3, \ldots$$

Фактические граничные условия ручки триаурального резонатора не соответствуют точно ни одному из этих идеальных случаев. Поэтому приведенные соотношения служат в качестве ориентировочных пределов и первоначальной оценки.

Положение узлов и частоты колебаний

Положение узлов и частота колебаний определяются по форме функции конкретного мода и по фактическим граничным условиям. В высших модах внутренние узлы не располагаются на равных расстояниях. Для ручки резонатора их положение определяется численно, а затем проверяется с помощью виброметрических измерений в соответствии с главой N1/14.

Приведённые аналитические соотношения справедливы для идеализированных прямых стержней с постоянным сечением. Триауральный резонатор не удовлетворяет этим условиям: сегменты отходят от общего узла под пространственными углами, их сечение может изменяться по длине, а ручка имеет собственный динамический отклик. Поэтому аналитический расчет служит для первоначальной оценки, проверки порядка и определения чувствительности. Точные значения дает численная модель, описанная в главе N1/17, а их достоверность подтверждается измерениями.

17 РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ И ЕЕ ВАЛИДАЦИЯ

Модель способна предсказать, что произойдет, еще до начала производства. Однако она не может заменить измерения — и в данной главе объясняется, почему эта разница важна.

17.1 Значение данной главы

Расчетная модель решает задачу, с которой аналитические соотношения из главы N1/16 не справляются: поведение всего тела с учетом его взаимодействия, асимметрий и креплений.

Место модели в программе N1 определяют четыре принципа, которые действуют без исключений.

- Модель служит для прогнозирования и определения порядка измерений. Она не является инструментом, который заменяет измерения.
- Непроверенная модель не является результатом. Модель и измерения развиваются как параллельные ветви и взаимно проверяют друг друга.
- Несоответствие модели измерениям является результатом, пригодным для публикации. Оно показывает, что какое-либо допущение, входной параметр, граничное условие или физический механизм модели не соответствует эксперименту и должно быть выявлено.
- Расчетная модель может исключить определенное состояние только в рамках физических допущений, геометрии, параметров материалов и граничных условий, которые она содержит. Поэтому отрицательный результат модели не выдается за общее доказательство невозможности явления в реальной системе.

  Например, если модальный анализ для конкретной геометрии показывает, что в рассматриваемом частотном диапазоне не существует соответствующей вырожденной или почти вырожденной пары, это является достоверным отрицательным результатом для данной модели. Следующим шагом является проверка чувствительности результата к параметрам материала, геометрии, креплению и численным настройкам, а затем его сравнение с экспериментом.

  Таким образом, модель определяет не то, что «допускает» физика в общем, а то, что предсказывает конкретное математическое представление конкретного эксперимента.

Анализ чувствительности может показать, какие параметры оказывают наибольшее влияние на результат.

17.2 Модальный анализ

Модальный анализ определяет собственные частоты тела и соответствующие им формы колебаний. Тело разбивается на большое количество мелких элементов, для каждого из которых записываются соотношения между силой и деформацией, а полученная система решается как задача собственных значений.

Для программы N1 из результатов важны три параметра: значения собственных частот, формы отдельных мод и, прежде всего, наличие в рассматриваемом частотном диапазоне несимметричного модального класса, образующего вырожденную или почти вырожденную пару согласно главе N1/09.2.

Именно эта пара является предметом главы N1/09.2. Модель способна определить, существует ли она, какую форму имеет и какова её частота — то есть именно то, что впоследствии проверяется измерениями.

Результатом также является разность частот в пределах этой пары. В случае идеально симметричной математической модели соответствующая вырожденная пара ожидается при одинаковой собственной частоте. Однако численная дискретизация может привести к появлению небольшого кажущегося расщепления, поэтому перед введением физических возмущений проводится проверка сходимости сетки и сохранения симметрии.

Только расщепление, которое является устойчивым при увеличении точности сетки и изменяется воспроизводимо при введении конкретного нарушения симметрии, интерпретируется как свойство моделируемого тела.

17.3 Гармонический анализ

Модальный анализ показывает, какие моды имеет тело. Он не говорит, что произойдет при конкретном возбуждении.

Для этого служит гармонический анализ. В модель вводится возбуждающая сила в точке, где на тело действует FORKER, с заданной частотой и амплитудой, и вычисляется установившийся отклик.

Из него следует, какие моды возбуждаются при данном возбуждении и с какой силой. Это важно, поскольку само существование моды ещё не означает, что она будет возбуждена — всё зависит от того, где и как подаётся энергия.

Гармоническая модель также учитывает затухание, поскольку именно оно определяет амплитуду и ширину отклика в окрестностях резонанса. Величина затухания сначала оценивается по экспериментально измеренному коэффициенту качества или коэффициенту затухания, а затем вводится в модель в качестве отдельного входного параметра.

Гармонический анализ также позволяет проверить трехфазное возбуждение в соответствии с главой N1/13.3 до начала монтажа. Задавая три пространственно определённые гармонические силы с относительными фазами 0°, 120° и 240°, можно проверить, какую амплитудную и фазовую комбинацию мод создаст такое идеальное механическое возбуждение. Особое внимание уделяется тому, возникнет ли вращательная суперпозиция вырожденной пары. Для сравнения с магнитострикционным экспериментом впоследствии используется откалиброванная зависимость между электрическим возбуждением катушек и фактической механической силой в соответствии с главой N1/13.3.

Гармонический анализ описывает установившийся линейный отклик. Импульсное возбуждение, ход затухания, переход между модальными состояниями или возможные нелинейные явления требуют временного или нелинейного анализа и не могут быть автоматически выведены из гармонического решения.

17.4 Анализ чувствительности

Анализ чувствительности отвечает на вопрос, какой параметр оказывает наибольшее влияние на результат. На первом этапе используется локальный анализ чувствительности, при котором отдельные параметры изменяются независимо друг от друга вокруг эталонной геометрии. Это позволяет получить производную или относительную чувствительность наблюдаемой величины по каждому параметру.

Параметры, оказывающие наибольшее влияние, впоследствии исследуются совместно, чтобы учесть их взаимное взаимодействие. При учете производственных допусков можно также добавить статистическое моделирование дисперсии, в котором геометрические и материальные отклонения генерируются в соответствии с измеренными или производственными распределениями.

Для программы N1 наблюдаемой величиной является, прежде всего, расщепление вырожденной пары. Поэтому нас интересует, какая асимметрия расщепляет её наиболее эффективно.

Кандидатов несколько, и их порядок заранее не очевиден: отклонение угла между плечами, разная длина плеч, неравномерная толщина, форма перехода к центральному узлу, несимметричное крепление и внутреннее напряжение, возникающее при производстве, согласно главе N1/15.7.

Результат имеет прямое практическое значение. Если окажется, что решающим фактором является, например, равномерность толщины, а не точность угла, это изменит требования как к производству, так и к контролю изделий.

Анализ чувствительности одновременно позволяет спрогнозировать кривую допусков из главы N1/06.8, так что обе кривые можно сравнить точка за точкой.

17.5 Акустическое поле в окрестностях

Предыдущие анализы касаются тела. Поле, создаваемое телом в воздухе, требует дополнительного шага.

Скорости на поверхности, рассчитанные с помощью гармонического анализа, могут служить граничным условием для расчета акустического поля в окрестностях резонатора. Результатом является комплексное распределение акустического давления, а также, в зависимости от выбранной модели, других величин поля в пространстве.

На основании этого расчёта можно непосредственно предсказать амплитудную и фазовую структуру поля в соответствии с главами N1/09 и N1/10. Сравнение с киматической картиной является косвенной проверкой и требует специальной модели взаимосвязи между акустическим полем, жидкостью, сосудом и свободной поверхностью.

Таким образом, модель позволяет записать ожидаемый результат до проведения измерения. Заранее записанный прогноз — это то, что отличает эксперимент от демонстрации.

17.6 Известные ограничения модели

Модель требует входных данных, значения которых известны не точно, и это следует признать до того, как возникнет несоответствие с измерениями.

- Модуль упругости конкретного изделия отличается от табличного значения и варьируется от партии к партии.
- Внутреннее напряжение после обработки можно оценить лишь приблизительно.
- Демпфирование в модели задается в виде коэффициента, и его значение сначала определяется по измерению резонанса.
- Граничное условие в месте крепления является, как известно, наиболее сложной для моделирования частью такой задачи. Реальный держатель не является ни идеально жестким, ни идеально свободным.

Ожидаемая точность определяется не общим процентным показателем, а эмпирически на основе валидационной серии. Однако тонкое расщепление вырожденной пары — это именно та величина, которая наиболее чувствительна к тому, что модель знает хуже всего.

Отсюда следует следующий подход:

Валидация модели отделяется от её калибровки.

На этапе калибровки на заранее определённом подмножестве образцов уточняются неопределённые входные параметры, например, эффективные упругие свойства, демпфирование или механическое сопротивление крепления. Диапазон параметров, которые можно таким образом корректировать, и критерий соответствия определяются до начала калибровки.

После калибровки эти параметры фиксируются. Затем модель тестируется на независимом валидационном наборе образцов, которые не участвовали в калибровке. Соответствие на валидационном наборе является решающим показателем предсказательной способности модели.

Только после успешной валидации модель используется для прогнозирования характеристик геометрии или образцов, которые ещё не были изготовлены.

17.7 Инструменты и открытость

Расчеты можно выполнять с помощью открытых инструментов, поэтому для их повторения не требуется платная лицензия. Это имеет такое же важное значение для воспроизведения результатов, как и публикация данных.

Поэтому вместе с результатами публикуются также входные файлы, сетка элементов, параметры материалов и вычислительные скрипты. Без них расчет невозможно повторить, и его приведение имело бы значение утверждения, а не результата. Вместе с входными файлами фиксируются версия и настройки решателя, тип элементов, допуски сходимости и способ построения сетки. При повторении расчета разница может возникнуть не только из-за физической модели, но и из-за численных настроек.

Конвергенция оценивается не только по собственной частоте, но и, в случае критических задач, по модальной форме, расщеплению Δf и выбранным локальным величинам в области центрального узла.

Частью публикации являются также данные о плотности сетки и о том, как результат изменяется при её уточнении. Речь идёт о стандартной проверке, которая показывает, является ли результат свойством тела или свойством расчёта.

17.8 Статья бюджета

Расчетная модель имеет отдельную строку в бюджете. Она включает время специалиста, затраченное на модальный анализ, вычислительную мощность и валидационные измерения, без которых модель не дает результатов.

Она указывается вместе с другими статьями в главе N1/19, и её включение в бюджет является частью принципа, согласно которому исследование начинается с финансирования.

Инструменты указываются по классу, а не по конкретной версии. Причина практическая: версия, указанная в документе, через год устаревает, в то время как класс инструмента и требования к нему остаются в силе. Конкретные версии записываются в протокол при каждом запуске и публикуются вместе с результатом в соответствии с главой N1/17.7.

Используется открытый инструмент для метода конечных элементов с возможностью модального и гармонического анализа, генератор сетки, позволяющий осуществлять управляемое уточнение в окрестностях узла, а также среда для обработки результатов со скриптовым интерфейсом. Для акустического поля в окрестностях тела используется решатель, способный учитывать взаимодействие упругого тела и окружающей среды.

Объем серии валидации определяется серией образцов в соответствии с главой N1/15.8. Модель калибруется на заранее определённом калибровочном наборе, состоящем из ветвей материалов и допусков, в общей сложности из четырнадцати экземпляров. После фиксации откалиброванных параметров его прогнозирующая способность проверяется на топологической и масштабной ветвях, в общей сложности на пятнадцати образцах, которые не участвуют в калибровке. Такое разделение является условием того, чтобы соответствие модели измерениям представляло собой независимую проверку её прогнозирующей способности.

Контрольная ветвь используется для отдельной проверки материальных и магнитных контролей и не входит ни в калибровку, ни в основной валидационный балл модели.

Бюджетная статья включает время специалиста на модальный анализ в соответствии с EQ-N1-26 и вычислительную мощность в соответствии с EQ-N1-25 и EQ-N1-30. Лицензии не учитываются, поскольку будут использоваться открытые инструменты.

17.9 Вычислительная инфраструктура

Программа генерирует данные в объеме, который невозможно обрабатывать по ходу работы и вручную. Создаются записи многоканальных измерений, данных лазерного виброметра, высокоскоростной камеры, результатов анализа изображений кристаллов и расчетных моделей, а также протоколы измерений, заметки по ходу работы и документация по процедуре. Объём видео- и аудиозаписей превышает объём числовых данных на несколько порядков.

Поэтому узел N1 создает собственную вычислительную инфраструктуру с локально работающими моделями машинного обучения и генеративного ИИ. Её задача — предварительная обработка и сортировка записей, преобразование измерений в форму, позволяющую сравнивать данные между сериями, подготовка материалов для документации и поддержка

координации исследований, включая работу с текстом, таблицами, изображениями и звуком.

Работа ведётся локально по трём причинам. Неопубликованные измерения не покидают рабочее место. Вычисления не зависят от доступности и условий внешнего сервиса, что имеет существенное значение для многолетней программы. Кроме того, процесс можно повторить, поскольку при каждом выходе, созданном с помощью ИИ, фиксируются идентификационные данные модели и её веса, версия среды инференции, соответствующие параметры генерации, версия входного шаблона или подсказки, а также использованный процесс предварительной обработки. Для воспроизводимости результата недостаточно знать только название модели. В случае использования внешнего сервиса модель может измениться без предварительного уведомления, что нарушит воспроизводимость так же, как если бы сменился измерительный прибор.

Используются модели с открытыми весами. Закрытые модели, веса которых не публикуются, невозможно запустить локально; разница в возможностях между лучшей открытой и лучшей закрытой моделью в документе не скрывается и принимается как данное условие.

Комплектация включает три бюджетные позиции:

- EQ-N1-30, сервер инференции с несколькими вычислительными картами и объемом памяти, достаточным для моделей с открытыми весами.
- EQ-N1-31 — стоечный шкаф с резервированным питанием и охлаждением.
- EQ-N1-32 — сетевая инфраструктура и хранилище мультимедийных данных.

Данная конфигурация также представляет собой подготовку инфраструктуры к возможному будущему подключению к мультирезонансной камере AURIS, описание которой является частью документа N3. В рамках узла N1 данное соединение не реализуется, и ни одна статья бюджета N1 не связана с ним; оно указывается для того, чтобы инфраструктура не была спроектирована таким образом, который впоследствии исключил бы его возможность.

Эксплуатационные расходы данной установки, а именно расходы на электроэнергию, охлаждение и внешнюю техническую поддержку, отражаются отдельными строками в главе N1/19.7. При непрерывной работе это не является незначительной статьёй расходов, и включение её в аренду и энергозатраты рабочего места исказило бы картину фактических затрат.

Результаты, полученные с помощью ИИ, подпадают под тот же эпистемический регистр, что и остальные утверждения в документе в соответствии с разделом N1/01.3. Интерпретация, предложенная моделью, без проверки не становится

результатом. ИИ не используется в качестве авторитетного элемента принятия решений при классификации гипотез. Он может предлагать анализ, выявлять потенциальные закономерности или готовить исходные материалы, но решающий результат должен быть прослеживаем до измеренных данных и определённой аналитической процедуры.

18 БЕЗОПАСНОСТЬ, ДОЗИМЕТРИЯ И ЭТИКА

Прежде чем что-либо начать использовать, необходимо знать, как оно работает в контролируемой среде. Эта глава предшествует применению, а не следует за ним.

18.1 Почему безопасность предшествует применению

Резонатор — это предмет, который держат в руке, прикладывают к телу и который издает звук в непосредственной близости от человека. Таким образом, речь идет об устройстве, способном передавать акустическую или механическую энергию в тело пользователя, независимо от того, в какой степени пользователь способен физически осознать это воздействие.

Поэтому данная глава расположена не в конце документа в качестве приложения, а перед разделами, посвящёнными практическому применению. Её цель — определить, что необходимо измерить и задокументировать до того, как резонатор попадёт в руки кого-либо за пределами команды.

Предметом данной главы не является доказательство пользы. Цель состоит в том, чтобы охарактеризовать воздействие, выявить известные риски, проверить соблюдение соответствующих критериев безопасности и обозначить неопределённости, которые остаются нерешёнными.

18.2 Утверждение об эффекте — это одновременно утверждение о риске

Этот принцип является определяющим для всего документа и формулируется следующим образом: если устройство способно что-то изменить в организме, оно способно изменить это и в нежелательном направлении.

Это имеет неприятные последствия для любого, кто утверждает, что его изделие оказывает физиологическое воздействие. Заявляя о воздействии, он одновременно утверждает, что изделие является физиологически активным — и тем самым берет на себя обязанность доказать, что его действие безопасно.

Каждое утверждение о физиологическом эффекте одновременно влечет за собой требование о характеристике дозы, механизма воздействия и возможных побочных эффектов.

Отсюда вытекает позиция программы N1. Пока не доказано, как и с какой интенсивностью поле воздействует на ткани, никакое физиологическое действие не указывается, и устройство не передается в руки общественности.

При ожидаемых уровнях эксплуатации серьёзное повреждение не считается вероятным, однако это предположение не заменяет дозиметрических измерений или мониторинга физиологической реакции.

Неотъемлемой частью процедуры обеспечения безопасности считается также контролируемое исследование воздействия на человека. Сама по себе физическая дозиметрия позволяет определить, какому акустическому и механическому воздействию подвергается человек, однако она не может самостоятельно доказать, возникает ли при таком воздействии физиологическая реакция.

Поэтому в рамках N1 проводится исследование безопасности, посвящённое физиологическим реакциям на воздействие и направленное на изучение острых и отсроченных реакций на точно определённую дозу. Его целью не является доказательство пользы для здоровья или терапевтического эффекта. Цель состоит в том, чтобы установить, вызывает ли воздействие воспроизводимые физиологические изменения, выявить возможные нежелательные явления и определить условия, при которых дальнейшие исследования могут проводиться безопасно.

Поэтому каждое воздействие сопровождается физической дозиметрией и заранее определённым набором физиологических и субъективных показателей. Отслеживается состояние до воздействия, во время него, непосредственно после него, а также, в соответствии с протоколом, через определённый промежуток времени. Неожиданные события регистрируются независимо от того, считаются ли они в момент наблюдения вероятно связанными с воздействием.

Временная последовательность сама по себе не считается доказательством причинно-следственной связи. Отдельное наблюдение может послужить поводом для выдвижения гипотезы, которую впоследствии можно проверить с помощью контролируемого и, по возможности, слепого метода.

Углубленное изучение биологических механизмов, долгосрочной физиологической адаптации, пользы для здоровья или клинической эффективности относится к документу N3. Документ N1 создает его основу в области безопасности и дозиметрии.

18.3 Три пути воздействия

Для целей дозиметрии различают три ситуации воздействия, которые измеряются и оцениваются отдельно. Хотя все они могут сочетаться в конкретном применении, каждая представляет собой иной путь передачи энергии и требует собственного способа характеристики.

- Через воздух — в виде акустического воздействия, действующего главным образом на слуховую систему и поверхность тела.
- Контакт через рукоятку — в виде механических вибраций, передаваемых на руку и систему «кисть–рука».
- Контакт при прикосновении — как локальная механическая передача в конкретную точку тела.

Смешение этих ситуаций является источником неверных выводов. Измерение уровня шума не характеризует контактное воздействие, а измерение вибраций на рукоятке не характеризует всё акустическое поле. Поэтому отдельные составляющие измеряются и указываются отдельно, и только после этого оценивается их совокупное воздействие.

18.4 Воздушное воздействие

Измеряется уровень акустического давления в точках, соответствующих положению головы подвергающегося воздействию человека, и его изменение во времени. Измерительная цепь должна быть пригодной для наблюдаемого частотного диапазона и при измерениях в слышимом диапазоне соответствовать требованиям стандарта IEC 61672-1 для шумомеров [58]. Стандарт определяет два класса точности; класс 1 является более строгим и соответствует позиции EQ-N1-05.

Оценка шумового воздействия и его связи с риском повреждения слуха проводится в соответствии с соответствующими стандартами и правовыми актами, действующими в стране, где находится рабочее место, включая ISO 1999 [59] и соответствующие европейские или национальные требования.

Регистрируются, как минимум, уровень, спектральный состав, время воздействия, расстояние до источника, ориентация источника и положение точки измерения. Отдельно картографируется также непосредственное окружение концов плеч, где локальный уровень может значительно отличаться от значения в положении головы.

При измерениях, затрагивающих низкочастотный или инфразвуковой диапазон, не следует полагаться исключительно на уровень с A-взвешиванием. Также регистрируется невзвешенный или соответствующим образом разбитый по частотам спектр, чтобы низкочастотные составляющие не были подавлены используемой кривой взвешивания.

18.5 Контактная передача на руку

Удержание вибрирующего предмета представляет собой отдельное механическое воздействие. Порядок оценки вибраций, передаваемых на кисть и руку, устанавливается стандартом ISO 5349-1 [60]; механический отклик системы «кисть–рука» описывается в стандарте ISO 10068 [61]. При этом стандарт ISO 5349-1 не определяет диапазон, в котором можно было бы исключить возникновение вибрационного повреждения, и поэтому значения, полученные на основе данного стандарта, не считаются абсолютным пределом безопасности.

Длительное воздействие вибраций, передаваемых через руку, может повреждать сосудистые, нервные и костно-мышечные структуры. Поэтому при N1 контактное воздействие регистрируется даже в том случае, если отдельное измерение является кратковременным.

Измеряется ускорение на поверхности рукоятки по трем осям, его спектр и частотно-взвешенное значение в соответствии с соответствующей

процедурой стандарта. Также регистрируются время удержания, положение захвата, сила захвата, способ возбуждения и используемый образец.

Положение захвата влияет на передаваемую дозу в соответствии с главой N1/14.12. Один и тот же резонатор, удерживаемый в области механического минимума и в области большей амплитуды движения, может представлять разное воздействие. Поэтому положение захвата является частью каждого протокола измерений.

18.6 Передача энергии в организм при прикладывании

При прямом прикладывании резонатора к телу возникает локальное контактное воздействие, которое отличается от удержания в руке местом поступления энергии, контактной поверхностью, а также механическим сопротивлением ткани.

Стандарт ISO 2631-1 [63] предоставляет методологическую основу для вибраций, передаваемых на всё тело, однако его нельзя автоматически использовать в качестве предельного значения для локального точечного прикладывания резонатора. Поэтому при локальном контакте регистрируются фактическое ускорение и его спектр, сила контакта, площадь контакта, ориентация, время воздействия и анатомическое место.

Передача вглубь в рамках N1 сначала характеризуется на механическом фантоме или другой контролируемой модели ткани. Измерения на человеке проводятся только в рамках утвержденного протокола воздействия в соответствии с главой N1/18.12.

Контакт с костью может создавать иной и более эффективный путь механической передачи, чем контакт только с мягкими тканями, поэтому он оценивается отдельно. Прикладывание вблизи головы, шейного отдела позвоночника, крупных сосудов или других чувствительных областей не осуществляется до тех пор, пока для такого воздействия не будет определен и профессионально оценен протокол.

18.7 Механизмы, которые необходимо проверить или исключить

Следующие механизмы представляют собой возможные пути биологического воздействия механического или акустического воздействия. Их перечисление не означает, что они имеют место в случае триаурального резонатора. Каждый из них оценивается в зависимости от фактически измеренной дозы и масштаба конкретного эксперимента.

- Нагрев за счет поглощения — его величина зависит от интенсивности, частоты, времени воздействия и свойств подвергаемой воздействию среды. В случае N1 его величина заранее не предполагается; возможное изменение температуры определяется путем измерения в соответствии с главой N1/11.9.
- Кавитация — её возникновение зависит, прежде всего, от амплитуды акустического давления, частоты, свойств жидкости и наличия

зародышевых ядер. При ожидаемых эксплуатационных амплитудах этот механизм не считается вероятным, однако при увеличении мощности её отсутствие проверяется экспериментально.

- Механотрансдукция — клеточная реакция на механический стимул является известным биологическим явлением, однако N1 не предполагает и не определяет взаимосвязь между конкретной дозой триаурального воздействия и клеточной реакцией. Если она будет исследовать, то относится к отдельному биологическому протоколу.
- Вестибулярная реакция — механическое или акустическое воздействие может при определенных условиях вызвать головокружение, нистагм, тошноту или нарушение равновесия. Такое проявление регистрируется как нежелательное явление и является основанием для немедленного прекращения воздействия.
- Низкочастотная механическая реакция тела — при режимах в диапазоне от единицы до десятков герц могут проявляться резонансные или усиленные механические реакции отдельных частей тела. Данный вопрос не касается обычного слышимого режима, но рассматривается в случае низкочастотного колебательного режима в соответствии с главой N1/03.3.

Если в ходе исследования обнаруживается иное воспроизводимое биологическое или физиологическое явление, которое не подпадает под указанные категории, оно не относится дополнительно к ближайшему известному механизму. Оно регистрируется как открытое наблюдаемое явление и исследуется отдельно.

18.8 Предварительные противопоказания и критерии исключения

До подтверждения безопасности целенаправленное воздействие не проводится на лиц, для которых механическое, акустическое или связанное с ними экспериментальное воздействие может представлять повышенный риск. Список носит рабочий характер и перед началом первого исследования на людях оценивается врачом-специалистом и этической комиссией.

- Эпилепсия или другие судорожные состояния, если по результатам экспертной оценки они признаны значимыми для используемого протокола.
- Кардиостимуляторы, имплантированные дефибрилляторы и другие активные имплантаты при проведении экспериментов, включающих магнитные или электромагнитные элементы.
- Известные тромбозы, состояние после эмболии или другое состояние, при котором механическое воздействие может представлять повышенный риск.
- Беременность, пока не будет доступна специальная экспертная оценка для конкретного типа воздействия.

- Значительные вестибулярные нарушения, повторяющиеся головокружения или текущий шум в ушах при выполнении протоколов, которые могут создавать нагрузку на слуховую или вестибулярную систему.
- Свежие раны, переломы, послеоперационные состояния или острые болевые процессы в месте планируемого контакта.

Противопоказание не следует выводить исключительно из названия диагноза. Решающим является экспертная оценка конкретного протокола воздействия, используемого оборудования и дозы.

18.9 Риски, связанные с исследовательской деятельностью

Помимо воздействия самого резонатора, при измерениях возникают риски, связанные с используемым лабораторным оборудованием. Они оцениваются отдельно и включают, как минимум:

- Высокое напряжение при электростатическом возбуждении согласно главе N1/13.2 — поражение электрическим током, энергия заряженных конденсаторов, разряды, образование озона и риск возгорания.
- Сильные постоянные магниты согласно главе N1/13.6 — защемление, резкое притяжение ферромагнитных предметов, повреждение имплантатов или приборов и риск образования осколков при повреждении хрупких магнитов.
- Лазерные источники при визуализации согласно разделам N1/10.5 и N1/10.13 — опасность для зрения и необходимость контролируемого пространства луча.
- Разрядные и плазменные установки — высокое напряжение, ультрафиолетовое излучение, тепловая нагрузка и риск, связанный с давлением или механическим воздействием на сосуд.
- Аэрозоли, химические вещества и жидкие образцы — вдыхание, контакт с кожей, разливы и загрязнение рабочего места.
- Подвижные механические установки, вращающиеся манипуляторы или автоматизированное позиционирование — риск удара, защемления или столкновения.

Для каждого узла перед первым использованием составляются краткая оценка риска, рабочая инструкция, перечень средств защиты и порядок действий в чрезвычайных ситуациях.

18.10 Протокол дозиметрии и воздействия

Для обеспечения сопоставимости данных между измерениями при каждой серии регистрируется одинаковый базовый набор величин. Протокол дополняется в зависимости от конкретной ситуации воздействия.

- Уровень звукового давления, спектр и временной ход в определённых точках измерения.
- Ускорение и спектр колебаний на рукоятке по трем осям, а при локальном контакте — также в месте прилегания.
- Время воздействия, количество повторений, интервалы между экспозициями и режим возбуждения.
- Температура образца, места контакта или фантома в зависимости от характера эксперимента.
- Расстояние, положение и ориентация резонатора относительно подвергаемого воздействию человека или фантома.
- Используемый образец резонатора, материал, собственная частота, способ крепления и режим возбуждения.
- Субъективные или физиологические события, зарегистрированные в соответствии с утвержденным протоколом, без предварительного вывода о их причинно-следственной связи.

Измеренные значения публикуются вместе с другими экспериментальными данными в том объеме, который не нарушает защиту персональных и медицинских данных. Дозиметрия позволяет независимому читателю оценить фактический уровень воздействия, не полагаясь на словесные заверения производителя или исследовательской группы.

18.11 Медицинский надзор за работниками

Участник эксперимента подвергается точно определённому разовому воздействию. Сотрудник лаборатории может неоднократно подвергаться низким или косвенным уровням воздействия в течение месяцев и лет. С точки зрения кумулятивного воздействия эта группа, таким образом, может представлять особый риск.

Для работников ведётся накопительная карта воздействия и осуществляется медицинский надзор в соответствии с принципами медицины труда. Речь не идёт об экспериментальном использовании работников в качестве подопытных; работник никогда не считается автоматически доступным субъектом только потому, что он находится на рабочем месте.

Надзор состоит как минимум из трёх компонентов:

- Вступительное медицинское обследование перед началом регулярной работы с экспериментальными источниками, которое определяет исходное состояние.

- Регулярные осмотры с периодичностью, определяемой врачом гигиены труда и в зависимости от характера фактического воздействия.
- Текущий учет воздействия и симптомов, содержащий дату, продолжительность, используемое оборудование, режим воздействия и любое новое или необычное изменение состояния здоровья, даже если на момент записи оно не считается связанным с воздействием.

Объем обследований определяет врач гигиены труда. Программа N1 предоставляет полное описание путей воздействия и измеренных доз, чтобы можно было адаптировать объем наблюдения к реальному риску.

Данные о состоянии здоровья подлежат защите медицинской и личной информации и не публикуются в форме, позволяющей идентифицировать личность. Можно публиковать только анонимизированный объем наблюдения и методику.

Если у работника обнаруживается изменение, которое может быть связано с воздействием или представляет риск для здоровья, работа, связанная с соответствующим воздействием, приостанавливается до проведения экспертной оценки.

18.12 Этические рамки исследований на людях

Любое проспективное исследование, в ходе которого человек намеренно подвергается воздействию поля и одновременно регистрируется его физиологическая или субъективная реакция в исследовательских целях, в рамках программы N1 считается исследованием на людях.

В рамках программы N1 может проводиться контролируемое исследование безопасности с экспозицией и физиологическим мониторингом. Его целью не является доказательство пользы для здоровья или терапевтического эффекта. Цель состоит в том, чтобы установить, вызывает ли точно определённое воздействие воспроизводимые острые или отсроченные физиологические изменения, выявить возможные нежелательные явления и определить условия, при которых можно продолжить дальнейшие исследования.

Перед началом такого исследования протокол представляется на независимую этическую экспертизу в соответствии с правилами, действующими в стране проведения исследования. Программа N1 применяет эту процедуру даже в случае сомнений относительно того, подлежит ли конкретный объем измерений формально обязательному одобрению.

Условием участия является информированное согласие. Участник знакомится с экспериментальным характером устройства, известными и неизвестными рисками, объемом сбора данных, возможностью в любой момент прекратить воздействие, а также с тем фактом, что устройство не является медицинским изделием или проверенным терапевтическим методом.

Протокол предварительно регистрируется до начала сбора данных. Заранее определяются уровни воздействия, продолжительность, количество повторений, отслеживаемые показатели, контрольные или имитационные условия, критерии прерывания, способ регистрации нежелательных явлений и план анализа.

Каждая экспозиция сопровождается физической дозиметрией и заранее определённым набором физиологических и субъективных показателей. В соответствии с протоколом отслеживается состояние до экспозиции, во время неё, непосредственно после неё и в определённые моменты времени после окончания экспозиции, чтобы можно было зафиксировать даже отсроченные реакции.

Воздействие начинается с минимального уровня, необходимого для проведения измерения, и увеличивается только в соответствии с заранее определённым протоколом. Ни исследователь, ни участник не увеличивают дозу импровизированно на основании субъективного благоприятного самочувствия или отсутствия немедленного эффекта.

Появление новых или необычных физиологических изменений регистрируется как нежелательное явление без предварительного вывода о причинно-следственной связи.

Временная последовательность сама по себе не является доказательством причинно-следственной связи, однако отдельное наблюдение может послужить основой для гипотезы, которая впоследствии проверяется с помощью контролируемого и, по возможности, слепого метода.

Измерение биологической реакции в документе N1 служит для оценки безопасности и характеристики воздействия. Углубленное изучение биологических механизмов, долгосрочной адаптации, пользы для здоровья или клинической эффективности относится к документу N3.

N1 не предполагает, что измеримая биологическая или физиологическая реакция существует. Точно так же он не предполагает, что её нет. Поэтому он измеряет её в рамках протокола безопасности.

18.13 Порядок действий перед предоставлением доступа лицам, не входящим в исследовательскую группу

Резонатор не предоставляется для целенаправленного использования лицам, не входящим в исследовательскую группу, до тех пор, пока не будут выполнены все условия, соответствующие данному режиму воздействия.

- Дозиметрия в соответствии с главой N1/18.10 проводится и документируется.
- Измеренные значения сопоставляются с действующими на данный момент нормами, рекомендациями и правовыми требованиями для соответствующей юрисдикции.

- Предварительные противопоказания и критерии исключения были оценены врачом-специалистом с учетом планируемого способа использования.
- Для устройства подготовлена инструкция, содержащая описание способа применения, максимальный режим воздействия, условия прерывания процедуры и четкое определение того, чем данное устройство не является и что в отношении него не было доказано.
- Документально подтверждено, какие механизмы риска из главы N1/18.7 были экспериментально проверены, при каких из них в тестируемых условиях не проявилось измеримого эффекта и какие остаются невыясненными.
- Если использование включает намеренное воздействие на человека в исследовательских целях, должен существовать утвержденный этический протокол в соответствии с главой N1/18.12.

Невыполнение любого из соответствующих условий означает, что данный режим использования не будет разрешен. Процедура не сокращается даже в том случае, если промежуточные результаты кажутся благоприятными.

Соблюдение известных на сегодняшний день предельных значений считается необходимым условием, а не доказательством абсолютной безопасности. Предельное значение может быть установлено только для риска, который был выявлен и достаточно охарактеризован. Поэтому уровень воздействия поддерживается на минимальном уровне, при котором можно надежно измерить наблюдаемое явление, и не повышается только потому, что формальное предельное значение это еще позволяет.

Практическим следствием этого является тщательный учет. Регистрируются даже те параметры, значение которых на сегодняшний день может быть неочевидным, если их можно разумно измерить без нарушения хода эксперимента. Запись можно проанализировать задним числом; отсутствующие данные — нет.

В данном документе для каждого стандарта указаны его идентификация и область применения. Конкретные эксплуатационные предельные значения не принимаются в качестве постоянно обязательных цифр. При создании рабочего места они берутся из действующей на данный момент редакции стандарта или правового акта в соответствующей юрисдикции и заносятся в производственный регламент вместе с указанием источника и издания.

Приобретение соответствующих стандартов и специализированной документации учитывается как отдельная статья эксплуатационных расходов в главе N1/19.7.

18.14 Воздушный ультразвук

В соответствии с главой N1/09.12 диапазон измерительных приборов выходит за пределы слышимости. В связи с этим меняется оценка безопасности, и воздушный ультразвук поэтому оценивается отдельно.

Для воздушного ультразвука методологическая и нормативная ситуация не совпадает с обычным слышимым шумом. В литературе и рекомендациях используются уровни воздействия с разбивкой по частотам, при этом обоснование некоторых исторически сложившихся пределов менее убедительно, чем в случае стандартного шумового воздействия. Поэтому в N1 рекомендации рассматриваются как наилучшая доступная система отсчёта, а не как доказательство полной безопасности.

Исторические, национальные и более поздние международные рекомендации и оценки, цитируемые в источниках [64]–[66], используют значительно отличающиеся эталонные уровни вблизи верхнего предела слышимости и в более высоком ультразвуковом диапазоне. Числовые значения, приведенные в источниках, служат в данном документе для объяснения резкого изменения оценки между диапазонами; обязательный эксплуатационный предел всегда берется из действующего на данный момент нормативного акта или рекомендации в стране, где находится рабочее место.

Решающим параметром безопасности является не только несущая или основная частота источника. При нелинейном возбуждении или нелинейном отклике системы могут возникать гармонические, субгармонические, разностные или иные спектральные составляющие, которые затрагивают нижнюю часть ультразвукового или слышимого диапазона. Поэтому нельзя оценивать только узкий интервал вокруг рабочей частоты.

Уровень оценивается в третиоктавных или соответствующих узких полосах по всему соответствующему диапазону, включая верхнюю часть слышимого диапазона. Особое внимание уделяется всем непреднамеренным спектральным составляющим, поскольку именно они могут подлежать более строгой оценке, чем сама рабочая частота.

При мониторинге безопасности также регистрируются острые субъективные проявления, например головная боль, тошнота, шум в ушах, ощущение давления в ухе, усталость или нарушение равновесия. Их появление не интерпретируется автоматически как следствие воздействия ультразвука; оно регистрируется как нежелательное явление и сопоставляется с дозой, контрольными условиями и другими источниками шума.

Для ультразвукового направления применяются как минимум следующие меры:

- Измерение частотного спектра перед каждой серией и после каждого изменения мощности, геометрии или режима возбуждения.
- Работа в контролируемом помещении с проверенной акустической обработкой для фактически используемого частотного диапазона.
- Дистанционное управление и наблюдение за экспериментом вне основного помещения воздействия, когда это позволяет эксперимент.
- Использование подходящих средств защиты слуха при необходимости входа в помещение во время работы, при этом

оценивается их реальное поглощение в соответствующем частотном диапазоне.

- Запрещается присутствие лиц, не участвующих в утвержденных измерениях или обслуживании.
- Немедленное прекращение воздействия при появлении вестибулярных, слуховых или других неожиданных симптомов.

Противопоказания, указанные в главе N1/18.8, применяются к данной отрасли в соответствии с экспертной оценкой и дополняются всеми состояниями, при которых ультразвуковое воздействие или сопутствующее слышимое воздействие могут представлять риск.

19 ОБОРУДОВАНИЕ И ОЦЕНОЧНЫЕ ЗАТРАТЫ

Что необходимо для качественного измерения и сколько это стоит.

19.1 Как составлен бюджет

Бюджет основан на измерениях, описанных в предыдущих главах. Каждая статья связана с конкретным экспериментом, поэтому можно отследить, для чего она предназначена, и в случае возможного сокращения объема работ становится ясно, какие измерения будут исключены.

Статьи обозначены в формате EQ-N1-xx и в таком виде приводятся также в приложениях, что позволяет ссылаться на них по отдельности.

В бюджете в качестве консервативной общей базы используются цены с учетом НДС; окончательный налоговый режим будет скорректирован в соответствии с организационно-правовой формой и юрисдикцией места работы. В отношении приборов указывается диапазон цен, поскольку разница между базовой и лабораторной комплектацией может быть многократной.

Местонахождение места работы не определено. В отношении аренды, энергоносителей, медицинского обслуживания и части услуг указанный диапазон также учитывает разницу в ценовых уровнях между возможными местоположениями. Затраты на заработную плату на данном этапе учитываются как единая эталонная модель персонала; после выбора места работы они пересчитываются с учетом местных условий в области заработной платы, отчислений и налогообложения. В случае измерительных приборов географические различия меньше, чем в случае заработной платы и аренды, поскольку базовая закупочная цена, как правило, определяется международным рынком. Однако окончательная цена может включать транспортные расходы, таможенные пошлины, налоги, условия обслуживания и курсовые разницы.

Окончательная сумма затрат будет уточнена после выбора местоположения в соответствии с главой N1/20. До этого момента бюджет указывается в виде диапазона и считается приблизительной оценкой.

19.2 Объем оснащения

Рабочее место проектируется как полностью оборудованное и самодостаточное. Основное оборудование закупается таким образом, чтобы ход и результаты измерений не зависели от краткосрочной доступности чужой камеры, свободных мощностей другой лаборатории или готовности третьей стороны предоставить услугу.

Измерения, описанные в настоящем документе, требуют повторения, проведения длинных серий и возможности вернуться к установке через

несколько недель в неизменном состоянии. В случае использования внешней или совместно используемой рабочей станции невозможно автоматически гарантировать долгосрочную доступность, стабильность конфигурации и возможность повторения измерений в любое время. Поэтому для базовой исследовательской инфраструктуры N1 предпочтительны собственная рабочая станция и собственное ключевое измерительное оборудование.

Бюджет не предусматривает внешнюю замену ключевой исследовательской инфраструктуры, которая должна быть доступна в долгосрочной перспективе. Специализированные разовые операции, такие как точная механическая обработка, отжиг, метрология или внешний экспертный анализ, могут заказываться в качестве услуги, если собственное оборудование для N1 не является экономически целесообразным.

Бюджет, указанный в настоящем документе, относится к узлу N1. Документы N2 и N3 имеют собственные бюджеты, и их сумма не является предметом настоящего текста.

19.3 Категории оборудования

В приведённых ниже списках оборудование классифицировано по назначению. Для каждой позиции указана глава, в которой она требуется.

Изготовление образцов

- EQ-N1-01 Обработка серии образцов, включая ветвь допусков — главы N1/06.8 и N1/15.8. Предполагается производство по заказу, а не использование собственного станка.
- EQ-N1-02 Материал полуфабрикатов, включая сертификаты — глава N1/15.
- EQ-N1-03 Термическая обработка и отжиг деталей серии — глава N1/15.7.
- EQ-N1-04 Контрольная метрология размеров и углов — глава N1/06.8.

Акустические измерения

- EQ-N1-05 Калиброванный шумомер класса 1 и измерительный микрофон для дозиметрии безопасности; при необходимости — отдельные измерительные микрофоны для пространственного картирования поля — главы N1/12.3 и N1/18.4.
- EQ-N1-06 Многоканальная измерительная станция с синхронной записью — главы N1/12.3 и N1/13.4.
- EQ-N1-07 Позиционирующее устройство для сетчатого сканирования поля — глава N1/12.3.

- EQ-N1-08 Полубезотражательная камера, включая антивибрационную опору — цена зависит от рабочего объема, нижней предельной частоты, требуемого уровня фонового шума и антивибрационной изоляции в соответствии с главой N1/20.2.

Возбуждение

- EQ-N1-09 Многоканальный генератор с фазовым управлением и усилитель — главы N1/03.3 и N1/12.2.
- EQ-N1-10 FORKER, включая запасные части и гибкие муфты — глава N1/03.2.
- EQ-N1-11 Установка для электростатического возбуждения, включая источник высокого напряжения — глава N1/13.2.
- EQ-N1-12 Возбуждающие и измерительные катушки, магниты и источник управляемого тока — главы N1/13.3–N1/13.7.

Вибрационные измерения

- EQ-N1-13 Лазерный виброметр; для полной пространственной кинематики предпочтительна трехосная конструкция, одноосная может служить в качестве базовой или промежуточной конфигурации — главы N1/14.6 и N1/17.6.
- EQ-N1-14 Акселерометры и тензометрическая система — главы N1/14.6 и N1/18.5.
- EQ-N1-15 Установка для фотоэластических измерений, включая прозрачные модели — глава N1/14.7.

Визуализация

- EQ-N1-16 Лазерный источник со световым сечением и оптикой — главы N1/10.5 и N1/10.13.
- EQ-N1-17 Высокоскоростная камера и система съемки — главы N1/10 и N1/14.7.
- EQ-N1-18 Киматическая станция, сосуды, порошки и посевная среда — главы N1/10 и N1/11.
- EQ-N1-19 Стеклянная камера для объемной визуализации — глава N1/10.9.

Жидкие образцы

- EQ-N1-20 Оптические зонды для растворенных газов — глава N1/11.6.
- EQ-N1-21 Тензиометр и вискозиметр с термостатом — глава N1/11.6.

- EQ-N1-22 Прибор для измерения динамического рассеяния света — глава N1/11.6.
- EQ-N1-23 Термисторный мост и оптоволоконные датчики температуры — глава N1/11.9.
- EQ-N1-24 Микроскоп и комплект для анализа изображений кристаллов — раздел N1/11.8.

Расчеты, данные и обработка

- EQ-N1-25 Вычислительная станция и хранилище данных — глава N1/17.
- EQ-N1-27 Публикация данных и документации, включая постоянные идентификаторы — глава N1/17.7.
- EQ-N1-30 Сервер инференции для локальных моделей ИИ — глава N1/17.9.
- EQ-N1-31 Стойка, резервное питание и охлаждение — глава N1/17.9.
- EQ-N1-32 Сетевая инфраструктура и хранилище мультимедийных данных — глава N1/17.9.

Ветвь масштабирования и ультразвук

Элементы этой группы относятся к измерительной ветви согласно главе N1/09.12 и к требованиям безопасности согласно главе N1/18.14.

- EQ-N1-33 Измерительный микрофон и предусилитель с частотным диапазоном до 100 кГц — глава N1/09.12.
- EQ-N1-34 Широкополосный сбор данных и спектральный анализ для ультразвукового диапазона, включая оценку в третиоктавах — глава N1/18.14.
- EQ-N1-35 Ультразвуковые преобразователи и возбуждающая система до 200 кГц — глава N1/09.12.
- EQ-N1-36 Точное позиционирование для сканирования поля с точностью до миллиметра — раздел N1/09.12.
- EQ-N1-37 Изготовление образцов масштабной ветви методом внешней прецизионной обработки — глава N1/15.8.
- EQ-N1-38 Звукопоглощающая обработка помещения для работы с ультразвуком — глава N1/18.14.

Безопасность и контроль

- EQ-N1-28 Средства защиты, экранирование лазерного пучка и обеспечение безопасности высоковольтной части — глава N1/18.9.

- EQ-N1-29 Медицинский надзор за рабочим местом — вступительное обследование и регулярные проверки в соответствии с главой N1/18.11; оплата производится ежегодно.

Исследование безопасности, экспозиции и физиологических показателей

- EQ-N1-39 Базовый физиологический мониторинговый комплекс — многопараметрическая регистрация основных физиологических показателей во время исследования безопасности при воздействии и физиологических реакций в соответствии с главой N1/18.12. В соответствии с протоколом позволяет синхронно регистрировать, в частности, частоту сердечных сокращений и ВСР, артериальное давление, SpO_2, температуру и, при необходимости, электрокожную активность или другие неинвазивные показатели.

- EQ-N1-40 Датчики и расходные материалы для измерений на человеке — одноразовые электроды, контактные элементы, средства гигиены и дезинфекции, возможно, одноразовые датчики и другие расходные материалы, требуемые утвержденным протоколом N1/18.12. Эта статья учитывается в операционных расходах в зависимости от фактического количества измерений.

- EQ-N1-41 Экспертное и этическое обеспечение исследований безопасности физиологических реакций на воздействие — экспертная подготовка и оценка протокола, медицинское сопровождение, подготовка документации для этической экспертизы и экспертный надзор за реализацией в соответствии с главой N1/18.12. Конкретный объем будет адаптирован к правовым и этическим требованиям страны проведения исследования.

- EQ-N1-42 Расходы, связанные с участием добровольцев и возможным страховым обеспечением исследования — возмещение разумных расходов участников, возможная компенсация за потраченное время и страхование или иное обеспечение, требуемое утвержденным протоколом и юрисдикцией места проведения исследования. Данная статья расходов применяется только в пределах, разрешенных этической экспертизой и действующими правилами.

Услуги и программные статьи

Следующие статьи не являются разовой закупкой оборудования. Они указываются отдельно от оборудования, чтобы не смешивать капитальные и операционные расходы.

- EQ-N1-26 Работа специалиста по модальному анализу — раздел N1/17.8. Оплачивается единовременно за весь период программы как внешняя экспертная услуга, выходящая за рамки постоянной команды.
- EQ-N1-41 Экспертное и этическое сопровождение исследования — учитывается за протокол или за программу в зависимости от фактического объема работ.
- EQ-N1-42 Участие добровольцев и возможное страховое обеспечение — оплачивается за программу в соответствии с утвержденным протоколом.
- EQ-N1-29 является годовой статьёй и включена непосредственно в операционные расходы в соответствии с главой N1/19.7. EQ-N1-40 также включена в годовые операционные расходы.

Оценка разовых статей

В столбцах «От» и «До» указана общая стоимость за весь количество единиц в соответствующей строке, а не цена за единицу.

EQ	Статья	Шт.	От (€)	До (€)
EQ-N1-01	Обработка серии образцов	1	18 000	45 000
EQ-N1-02	Материал заготовок, включая сертификаты	1	3 000	9 000
EQ-N1-03	Термическая обработка и отжиг	1	1 500	4 000
EQ-N1-04	Контрольная метрология размеров и углов	1	15 000	60 000
EQ-N1-05	Измерительный микрофон и шумомер, класс 1	1	3 000	12 000
EQ-N1-06	Многоканальная измерительная станция	1	6 000	25 000
EQ-N1-07	Устройство позиционирования, три оси	1	9 000	35 000
EQ-N1-08	Полубезотражательная камера	1	80 000	300 000

EQ	Статья	Шт.	От (€)	До (€)
EQ-N1-09	Многоканальный генератор и усилитель	1	4 000	15 000
EQ-N1-10	FORKER, включая запасные части	3	1 200	4 500
EQ-N1-11	Электростатическое возбуждение с источником высокого напряжения	1	3 000	12 000
EQ-N1-12	Катушки, магниты, источник управляемого тока	1	2 500	9 000
EQ-N1-13	Лазерный виброметр	1	35 000	250 000
EQ-N1-14	Акселерометры и тензометрическая система	1	4 000	14 000
EQ-N1-15	Комплект для фотоупругого измерения	1	3 000	10 000
EQ-N1-16	Лазерный источник со световым сечением	1	3 000	12 000
EQ-N1-17	Высокоскоростная камера	1	30 000	120 000
EQ-N1-18	Киматическая станция и принадлежности	1	2 000	6 000
EQ-N1-19	Стеклянная камера для объемной визуализации	1	2 000	8 000
EQ-N1-20	Оптические зонды для растворенных газов	1	4 000	12 000
EQ-N1-21	Тензиометр и вискозиметр	1	8 000	28 000
EQ-N1-22	Прибор для измерения динамического рассеяния света	1	35 000	100 000
EQ-N1-23	Термисторный мост и оптоволоконные датчики	1	5 000	18 000
EQ-N1-24	Микроскоп и анализ изображений	1	6 000	25 000
EQ-N1-25	Вычислительная станция и хранилище данных	1	8 000	25 000

EQ	Статья	Шт.	От (€)	До (€)
EQ-N1-27	Публикация данных и постоянные идентификаторы	1	2 000	8 000
EQ-N1-28	Средства защиты и безопасность	1	3 000	10 000
EQ-N1-30	Сервер инференции для локальных моделей ИИ	1	40 000	250 000
EQ-N1-31	Стойка, питание и охлаждение	1	5 000	25 000
EQ-N1-32	Сетевая инфраструктура и хранилище данных	1	7 000	40 000
EQ-N1-33	Микрофон и предусилитель до 100 кГц	1	6 000	25 000
EQ-N1-34	Широкополосный ультразвуковой сбор и анализ данных	1	8 000	35 000
EQ-N1-35	Ультразвуковые преобразователи и возбуждающий блок	1	5 000	20 000
EQ-N1-36	Точное позиционирование для измерительной ветви	1	7 000	30 000
EQ-N1-37	Изготовление образцов масштабной ветви	1	12 000	45 000
EQ-N1-38	Амортизирующая обработка для ультразвукового режима работы	1	4 000	20 000
EQ-N1-39	Комплект для физиологического мониторинга	1	5 000	20 000
Итого одноразовых статей			**395 200**	**1 686 500**

Указанные цены являются рабочей оценкой классов O и P в соответствии с классификацией, приведенной в приложении к бюджету: класс V обозначает публичный прейскурант поставщика, класс P — запрошенное у поставщика предложение, а класс O — оценку на основе сопоставимых товаров. На данном этапе большинство позиций относятся к классу O. Перед

заключением контракта по каждой значимой позиции будут запрошены конкретные предложения.

Позиции EQ-N1-30–EQ-N1-32 составляют вычислительную инфраструктуру для локально развернутых моделей ИИ в соответствии с главой N1/17.9. Диапазон для сервера инференции представляет собой разницу между возможными классами исполнения и перед закупкой пересчитывается с учётом доступного на тот момент оборудования.

Две крупнейшие позиции — камера EQ-N1-08 и виброметр EQ-N1-13 — составляют значительную часть верхнего предела бюджета на оборудование. Их цена зависит, прежде всего, от параметров камеры и от того, будет ли закуплен одноосевой или трехосевой виброметр.

Оценка стоимости услуг и программных позиций

EQ	Статья	Период	От (€)	До (€)
EQ-N1-26	Работа специалиста по модальному анализу	за программу	20 000	60 000
EQ-N1-41	Обеспечение профессионального и этического проведения исследования	за протокол/программу	5 000	20 000
EQ-N1-42	Участие добровольцев и возможное страховое обеспечение	за программу	2 000	10 000
Разовые/программные услуги, всего			**27 000**	**90 000**

** Диапазон EQ-N1-42 является рабочей оценкой. Фактическая стоимость будет уточнена в зависимости от количества участников, решения этического комитета, страховых требований и юрисдикции места работы.*

19.4 Связь с другими узлами

Часть оборудования, приобретенного для данного узла, может использоваться также при измерениях, предусмотренных документами N2 и N3. Речь идет, прежде всего, об акустически обработанном помещении, вычислительной и записывающей технике, многоканальном возбуждении и комплексе визуализации.

Этот факт указывается для того, чтобы было ясно, что бюджеты других узлов не включают повторную закупку тех же приборов. Бюджет N1 не сокращается с учётом этого факта; речь идёт об оборудовании, которое необходимо данному узлу независимо от того, будут ли созданы последующие узлы.

При совокупном финансировании нескольких узлов общие статьи учитываются только один раз.

19.5 Резервы

Резервы указываются отдельно в зависимости от характера риска. Их основания не должны пересекаться без явного указания, чтобы один и тот же риск не учитывался дважды.

- Технический резерв — 10 % от стоимости одноразового приборного и технического оборудования, за исключением статей, на которые распространяется отдельный строительный резерв. Он покрывает ценовые колебания, валютный риск, необходимое приспособление и разницу между рабочей сметной стоимостью и конкретным предложением.
- Строительный резерв в размере от 15 до 20 % от затрат на строительную и акустическую отделку помещения и камеры. В сводной модели используется 18 %; в качестве основы выступает, в частности, статья EQ-N1-08 и возможные непосредственно связанные с ней строительные работы.
- Эксплуатационный резерв в размере 5 % от планируемых годовых эксплуатационных расходов без учета уже заложенных резервов. Он покрывает непредвиденные эксплуатационные расходы, а не расширение объема программы.
- Резерв на повторные измерения — от 5 до 8 % в виде целевого фонда для независимого повторения измерений с неожиданным или решающим результатом. Конкретная основа этого резерва указывается в сводном бюджете, чтобы было ясно, к каким экспериментальным расходам он относится.

Резерв на повторные измерения используется исключительно для проверки результата в соответствии с заранее определённым решением программы, например, путем повторного проведения измерений другим оператором, с использованием нового набора образцов или на другой рабочей площадке.

Неиспользованные средства автоматически не считаются свободными средствами для произвольного использования. Они остаются связанными с целью и правилами финансирования программы; их перенос на другие исследования, публикацию результатов, вознаграждения или иные виды деятельности возможен только в пределах, разрешенных договором, и после соответствующего одобрения и отчетности.

Программа не предполагает, что члены команды будут доплачивать за её функционирование из собственных средств. Соответствующие кадровые расходы и вознаграждение за труд планируются непосредственно в бюджете, а не дополнительно за счёт случайно сэкономленных статей расходов.

Отдельно от резервов указывается инфляционная оговорка. Программа рассчитана на несколько лет, поэтому цены на оборудование, материалы и работу меняются в течение её срока реализации. При многолетнем финансировании поэтому указывается время закупки позиций и используется подходящий опубликованный показатель динамики цен для соответствующей категории.

Финансирующая сторона имеет право на прозрачное отчетность об использовании средств в объеме, согласованном в договоре; это право не толкуется как разрешение вмешиваться в научные результаты или ставить продолжение отдельных экспериментальных направлений в зависимость от их содержания.

19.6 Статьи расходов, которые легко недооценить

Следующие расходы в исследовательских проектах легко недооцениваются и поэтому указываются отдельно.

- Калибровка и сервисные контракты. В рабочей бюджетной смете используется примерно 5–10 % от стоимости выбранного измерительного оборудования в год; это не является универсальной ставкой на обслуживание, и окончательная стоимость будет определяться на основе конкретных условий обслуживания и калибровки.
- Общие лабораторные расходные материалы, не входящие в EQ-N1-40: порошки, посевные среды, химикаты, электроды, одноразовые датчики, контактные и соединительные элементы.
- Брак при изготовлении образцов. При производстве серии с допусками учитывается, что часть изделий может не соответствовать требованиям выходного контроля.
- Расходы на публикацию, включая сборы за открытый доступ и публикацию отрицательных результатов. Расходы на постоянные идентификаторы и публикацию данных учитываются отдельно как EQ-N1-27.
- Приобретение стандартов и технической документации, требуемых в соответствии с рамками безопасности и эксплуатации согласно главе N1/18.13.
- Время на документирование, анонимизацию, управление и архивирование данных. Без этой работы получаются измерения, которые впоследствии невозможно надежно оценить или воспроизвести.
- Административное сопровождение исследования по безопасности, защита персональных и медицинских данных, а также подготовка

материалов для этической экспертизы в соответствии с главой N1/18.12.

- EQ-N1-29 касается медицинского наблюдения за работниками; EQ-N1-41 касается профессиональной и этической поддержки исследований с участием людей, и эти пункты не пересекаются.

19.7 Эксплуатационные расходы

Помимо единовременных затрат возникают текущие расходы, которые указываются в годовом исчислении.

- Затраты на заработную плату команды в зависимости от количества человек и рабочих мест.
- Аренда и энергозатраты рабочего места.
- Калибровка, техническое обслуживание и расходные материалы.
- Эксплуатация и техническая поддержка вычислительной инфраструктуры.
- Медицинское наблюдение за персоналом и расходные материалы для проведения исследования безопасности.
- Возможные вознаграждения сверх заработной платы, только если они соответствуют правилам финансирования и заранее определенным критериям.

Затраты на заработную плату указываются в совокупном виде. Распределение должностей, рабочих мест и заработной платы является частью внутреннего приложения к бюджету; публикуется общая годовая сумма расходов, включая отчисления и накладные расходы работодателя.

Общая численность персонала в рамках рабочей модели составляет примерно 9,5 полных рабочих мест (FTE). В нее входят руководство программой, два старших научных сотрудника, два исследователя на уровне докторанта или постдокторанта, лаборант, программная и административная поддержка, а также должность, отвечающая за документацию и коммуникацию. Внешнее бухгалтерское обслуживание и управление вычислительной инфраструктурой осуществляются в соответствии с конкретной договорной моделью либо в качестве услуги, либо как часть операционных расходов.

В расчёте затрат на заработную плату используется эталонная годовая сумма в размере 488 300 евро, включая отчисления и накладные расходы работодателя. После выбора места расположения кадровая модель пересчитывается с учётом местных условий оплаты труда и отчислений.

Калибровка и сервисные контракты учитываются в рабочем бюджете в соответствии с главой N1/19.6. Основой служит выбранное измерительное оборудование, включая приборы измерительной ветви EQ-N1-33–EQ-N1-36; вычислительная инфраструктура не подвергается калибровке, а её техническое обслуживание учитывается отдельно.

Статья	От (€)	До (€)
Затраты на заработную плату команды, включая отчисления и накладные расходы работодателя	488 300	488 300
Вознаграждения сверх заработной платы, привязанные к результатам работы	0	39 100
Аренда и энергозатраты рабочего места	14 400	42 000
Энергия и охлаждение вычислительной инфраструктуры	10 000	25 000
Калибровка и сервисные договоры на измерительное оборудование	16 100	128 600
Внешняя техническая поддержка вычислительной инфраструктуры	3 000	12 000
Расходные материалы	3 000	12 000
Отходы при изготовлении образцов	1 500	6 000
Приобретение стандартов	500	1 500
Расходы на публикацию	2 000	8 000
Документация и архивирование данных	2 000	6 000
Медицинский надзор за рабочим местом (EQ-N1-29)	800	3 000
Расходные материалы для исследования безопасности (EQ-N1-40)	1 000	5 000
Общие эксплуатационные расходы (в год)	**542 600**	**776 500**

EQ-N1-26, EQ-N1-41 и EQ-N1-42 не указаны в годовой таблице, поскольку они учитываются как разовые или программные услуги. EQ-N1-29 уже включена в годовые эксплуатационные расходы и не должна учитываться повторно.

Сводка базового трёхлетнего бюджета N1

Статья	От (€)	До (€)
Единовременные статьи	395 200	1 686 500
Единовременные/программные специализированные услуги (EQ-N1-26, 41, 42)	27 000	90 000
Эксплуатационные расходы за 3 года	1 627 800	2 329 500
Базовый трёхлетний бюджет без учёта резервов и инфляции	**2 050 000**	**4 106 000**

** Итоговая сумма не включает резервы на техническое обслуживание, строительство, эксплуатацию и репликацию, а также не учитывает инфляционную поправку. Они применяются только в сводной финансовой модели в соответствии с установленными принципами. Также не включает расходы N2, N3, а также юридические и корпоративные расходы, указанные в главе N1/19.8.*

19.8 Что не входит в бюджет

Бюджет данного узла включает оборудование и услуги, необходимые для проведения базового исследования по безопасности с анализом физиологических реакций на воздействие в соответствии с главой N1/18.12. Он не включает оборудование, персонал и эксплуатационные расходы, связанные с расширенными биологическими, механистическими или клиническими исследованиями, направленными на оценку пользы для здоровья или терапевтической эффективности; они относятся к документу N3.

Бюджет N1 не включает камеру AURIS и специализированную инфраструктуру N3. Он также не включает оборудование для электромагнитных измерений, которое является предметом документа N2.

Не включает расходы на создание и управление юридическим лицом, юридическое представительство и связанные с этим сборы. Они рассматриваются отдельно от материального бюджета исследований и должны учитываться при расчете итоговой суммы финансирования. Текущее бухгалтерское и административное обеспечение деятельности включено в соответствии с кадровой и договорной моделью N1/19.7.

Указанный бюджет представляет собой материально-технические и операционные финансовые рамки программы N1. Он не включает отдельную компенсацию учредителям за принятие на себя многолетнего

исполнительного обязательства, связанного с руководством программой, возможным переездом в страну реализации и существенным ограничением их другой профессиональной деятельности. Конкретный размер этой компенсации устанавливается отдельным соглашением до начала реализации в зависимости от места, правовой формы, продолжительности и объема обязательств. Её полное финансовое обеспечение является частью условий, при которых команда может взять на себя реализацию программы.

Бюджет также не включает окончательные расходы на завершение программы и ликвидацию рабочих мест. Поэтому до запуска N1 будет разработан отдельный план завершения, включающий, в частности, кадровые и договорные обязательства, демонтаж, перемещение или вывод из эксплуатации инфраструктуры, архивирование данных и образцов, прекращение аренды и услуг, а также приведение рабочего места в требуемое состояние. Эти расходы будут включены в финансовую рамку запуска после выбора местоположения и организационно-правовой формы.

Бюджет также не содержит экономичных альтернатив ключевому оборудованию. Если какая-либо позиция будет приобретена на более выгодных условиях или резерв не будет исчерпан, дальнейшее использование средств регулируется соглашением о финансировании и правилами, изложенными в главе N1/19.5 и сводной финансовой главе.

20 ПРОЕКТ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ ЛАБОРАТОРИИ

Как должно выглядеть место, которое обеспечит полноценные условия для проведения пилотных исследований, имеющих эталонное значение?

20.1 Что должна обеспечивать исследовательская лаборатория

Лаборатория должна обеспечивать проведение ряда видов деятельности с различными техническими требованиями и требованиями безопасности: точные акустические и вибрационные измерения, оптические и жидкостные эксперименты, работу с образцами и данными, эксперименты с высоким напряжением и сильными магнитами, а также контролируемое воздействие на человека в соответствии с главой N1/18.12.

Эти виды деятельности, в зависимости от степени взаимных помех и риска, разделяются пространственно или во времени.

Поэтому проект основан на разделении отдельных функциональных зон. Их размеры и оснащение зависят от измерений, описанных в предыдущих главах; ничто на рабочем месте не размещается без привязки к конкретной задаче. Представленный проект носит концептуальный характер. Конкретные размеры и техническое решение зависят от доступного пространства и определяются при его выборе.

20.2 Акустически обработанное помещение

Измерение свободного или приблизительно свободного акустического поля требует среды, в которой отражения от границ помещения в исследуемом частотном диапазоне достаточно подавлены и охарактеризованы. В противном случае микрофон регистрирует суперпозицию поля резонатора и резонанса помещения.

Рассматриваются три уровня, которые различаются по сложности и стоимости.

- Безотражательная камера, в которой обшиты все стены, включая пол. Она обеспечивает самые чистые условия и является самой дорогой.
- Полубезотражательная камера представляет собой эталонное решение, предложенное для N1. Её пригодность для отдельных измерений зависит от рабочего частотного диапазона, нижней граничной частоты и требуемой точности пространственного картирования.
- Акустически обработанное помещение с поглощающими элементами на стенах. Подходит для сравнительных измерений, когда речь идет о разнице между двумя установками, а не об абсолютных значениях.

При каждом измерении указывается рабочий частотный диапазон, в котором помещение соответствует требуемым условиям; обозначение «безотражательное» или «полубезотражательное» не считается свойством, действительным для всех частот.

Решающим параметром является не только поглощающая способность, но и уровень фона. Резонатор, возбуждаемый с малой амплитудой, создает поле, настолько слабое, что его заглушает шум с улицы или от технического оборудования здания.

Поэтому на момент измерения регистрируется уровень фона и указывается вместе с результатом. Измерения планируются на период с наименьшим фоном, если позволяют другие обстоятельства.

Помещение должно быть также изолировано от вибраций здания. Вибрации из коридора, лифта или от транспорта передаются через конструкцию на штатив, а оттуда — на резонатор, где их не улавливает микрофон, но улавливает виброметр.

20.3 Измерительная станция

Ядром рабочего места является измерительная позиция, где закреплен резонатор, а вокруг него перемещаются датчики.

Закрепление резонатора является одним из критических элементов. Держатель поглощает энергию и изменяет затухание в соответствии с главой N1/14.4, поэтому он изготавливается как повторяемый, и его влияние измеряется отдельно. Один и тот же образец, закрепленный дважды, должен давать одинаковый результат.

Устройство позиционирования позволяет измерять поле в сетке точек в заданном объеме вокруг резонатора и наблюдаемой области поля в соответствии с главой N1/12.3. Точность позиционирования указывается вместе с измеренными картами, поскольку она определяет, насколько мелкую структуру поля можно различить.

Стойка также содержит крепление для трёх источников при измерениях на уровне L3 в соответствии с главой N1/04, с возможностью настройки расстояния между ними и угла наклона, а также документирования их положения и ориентации в общей системе координат.

20.4 Оптическая и жидкостная установка

Измерения в соответствии с главами N1/10 и N1/11 требуют темного помещения, стабильного положения камеры и доступа к образцам без вибраций.

Станция включает в себя оптический стол или, по крайней мере, виброгасящую платформу, калибруемое крепление камеры в заданном положении относительно снимаемой области, а также выделенное

пространство для лазерного пучка с защитным кожухом в соответствии с главой N1/18.9.

Для объемной визуализации необходима вентиляция, поскольку глицериновый туман скапливается в закрытом пространстве. Вентиляция отключается или изолируется во время самого измерения, если поток воздуха может повлиять на трассер; после измерения пространство контролируемо проветривается.

Для работы с жидкостями предусмотрен отдельный рабочий стол с подачей воды, местом для терморегулирования образцов и зоной для временного хранения образцов во время воздействия, где с ними не проводятся никакие манипуляции.

20.5 Зона высокого напряжения и магнитов

Электростатическое возбуждение и работа с сильными магнитами осуществляются в отдельном помещении, которое изолировано и обозначено соответствующим образом.

Причина двоякая. Во-первых, это безопасность в соответствии с главой N1/18.9. Во-вторых, сильное магнитное поле может влиять на магниточувствительные измерительные приборы, некоторые типы устройств хранения данных и другое оборудование, находящееся поблизости; одновременно оно представляет механическую опасность для свободно лежащих ферромагнитных предметов.

Зона включает в себя запираемое хранилище магнитов, разрядную цепь для конденсаторов высоковольтной части, вентиляцию для случаев, когда высоковольтный режим работы приводит к образованию озона или других продуктов реакции, а также обозначение ограничения доступа для лиц с активными или магниточувствительными имплантатами в соответствии с оценкой риска конкретной установки.

20.6 Образцы и их учет

Серия образцов в соответствии с главой N1/15.8 содержит большое количество единиц, которые отличаются друг от друга небольшими геометрическими отклонениями, включая угловые различия порядка десятых долей градуса, и многие из них невозможно надежно различить визуально.

Высоковольтные и сильные магнитные установки эксплуатируются в соответствии с отдельными рабочими процедурами и не обязательно должны работать одновременно.

Каждое вмешательство, изменяющее магнитное или тепловое состояние образца, регистрируется как часть его истории.

Поэтому хранение является частью проекта рабочего места. Каждый образец имеет своё место, постоянную маркировку и регистрационную карточку, которая ведётся от момента изготовления до списания.

В помещении для образцов поддерживается постоянная температура, поскольку резонансная частота изменяется в зависимости от температуры в соответствии с главой N1/16.5. Изделие, принесенное из холодного склада, перед измерением оставляют для стабилизации, и время стабилизации фиксируется.

Магнитно-насыщенные и немагнитно-насыщенные образцы хранятся отдельно, чтобы избежать их перепутывания или нежелательного намагничивания контрольного образца.

20.7 Инфраструктура данных

Измерения генерируют большие объемы записей, в частности высокоскоростное видео и многоканальные временные сигналы.

Рабочее место оснащено основным рабочим хранилищем, отдельным резервным хранилищем и вычислительной инфраструктурой в соответствии с главами N1/17.9 и N1/19.3. Критически важные данные не хранятся только на одном физическом устройстве.

Исходные данные хранятся отдельно от обработанных результатов и не должны перезаписываться в ходе последующей обработки.

Частью системы является также способ привязки условий измерения к записям. Запись без указанных условий со временем становится непригодной для использования, поэтому она сохраняется вместе с протоколом в машиночитаемом виде.

20.8 Контролируемая установка для воздействия на человека

Исследование безопасности в области экспозиции и физиологии в соответствии с главой N1/18.12 использует акустически обработанную Зону 1 также в качестве контролируемого места экспозиции. В N1 речь не идет ни о клиническом помещении, ни о терапевтическом рабочем месте. Положение служит исключительно для оценки безопасности точно определённого воздействия и одновременной регистрации физиологической реакции.

Во время измерения участник находится в Зоне 1 без присутствия оператора, если утвержденный протокол не требует иного. Измерение, возбуждение и физиологическая регистрация управляются с отдельного рабочего места за пределами акустического измерительного пространства. Это снижает влияние постороннего человека на акустическое поле и одновременно сохраняет стабильность измерительных условий между отдельными экспозициями.

Визуальный контроль обеспечивается одной или несколькими стационарными камерами с достаточным охватом участника и экспериментальной установки. Частью рабочего места является двусторонняя голосовая связь и возможность немедленно прервать стимуляцию с контрольного рабочего места. Участник также имеет собственный, однозначно доступный способ подачи сигнала или немедленного прекращения экспозиции.

Помещение содержит место для сидящего или, в соответствии с протоколом, лежащего участника, физиологическую мониторинговую установку EQ-N1-39 и механически заданные точки или систему позиционирования, позволяющую воспроизводимо настраивать расстояние, ориентацию и положение резонатора относительно тела. Положение участника и оборудования регистрируется как часть протокола воздействия.

Большое смотровое окно между экспозиционным и контрольным помещениями не считается обязательной частью N1. В случае его использования его акустическое воздействие должно быть учтено при характеристике помещения. Поэтому предпочтительным решением является видеонаблюдение, которое позволяет сохранить более однородную акустическую отделку стен.

Оборудование для возбуждения и измерения по возможности управляется дистанционно, что одновременно позволяет реализовать имитационное или слепое испытание без визуального контакта участника с оператором или с настройками источника.

Оператор остается доступным для немедленного вмешательства на протяжении всего периода воздействия, а путь до участника остается свободным; дистанционное управление не означает оставление участника без присмотра.

Во время воздействия на человека в Зоне 1 не проводится никакая другая экспериментальная деятельность. Устройства высокого напряжения, мощные магниты, открытые лазерные пучки, аэрозоли или другие опасные установки не должны быть одновременно активными, если это прямо не требуется конкретным утвержденным протоколом и не предусматривает отдельных мер безопасности.

Медицинские и идентификационные данные участника хранятся отдельно от обычных экспериментальных данных в соответствии с главой N1/18.12. Записи с камер видеонаблюдения считаются частью персональных данных и хранятся только в объеме, необходимом для утвержденного протокола.

20.9 Условия эксплуатации

Температура в измерительном помещении поддерживается на постоянном уровне и регистрируется непрерывно. Это требование вытекает непосредственно из главы N1/16.5, поскольку температурный дрейф при

точных модальных измерениях может быть сопоставим с небольшими наблюдаемыми разностями частот.

Влажность также регистрируется. Она влияет на затухание в деревянных и полимерных образцах и изменяет условия при измерениях жидкостей.

При акустических измерениях также регистрируется атмосферное давление, если его изменение может повлиять на скорость звука или сопоставимость пространственных карт.

Вентиляция должна быть организована таким образом, чтобы воздушные потоки не мешали измерениям. При объемной визуализации вентиляция во время записи отключается, и этот факт фиксируется, поскольку он также влияет на контроль температуры в соответствии с главой N1/10.12.

Серверная инфраструктура не должна нарушать тепловую стабильность хранилища образцов.

20.10 Этапы строительства

Рабочее место не создаётся сразу. Отдельные части создаются в порядке, соответствующем графику в соответствии с главой N1/21.

- Первый этап: измерительная станция, закрепление, возбуждение и запись. Достаточно помещения с акустической обработкой.
- Второй этап: оптическая и жидкостная станции, визуализация.
- Третий этап: зона с высоким напряжением и магнитами.
- Четвёртый этап: полубезотражательная камера в качестве эталонного акустического рабочего места N1. Её окончательные параметры будут определены на основе первых измерений фонового шума, рабочего частотного диапазона и требуемого пространственного охвата. Ранние эксперименты могут проводиться в акустически обработанном помещении ещё до завершения строительства камеры.

Такая последовательность позволяет начать пилотные измерения до полного завершения строительства рабочей зоны. Результаты первых серий будут использованы для уточнения технических параметров камеры, а не для принятия решения о том, будет ли камера закупаться в рамках полной программы N1.

Контролируемые исследования воздействия на людей не начинаются автоматически после технического завершения строительства Зоны 1. Они активируются только после физической и дозиметрической характеристики соответствующего режима воздействия и после выполнения этических условий и условий безопасности в соответствии с главами N1/18.10 и N1/18.12.

План проекта исследовательской лаборатории

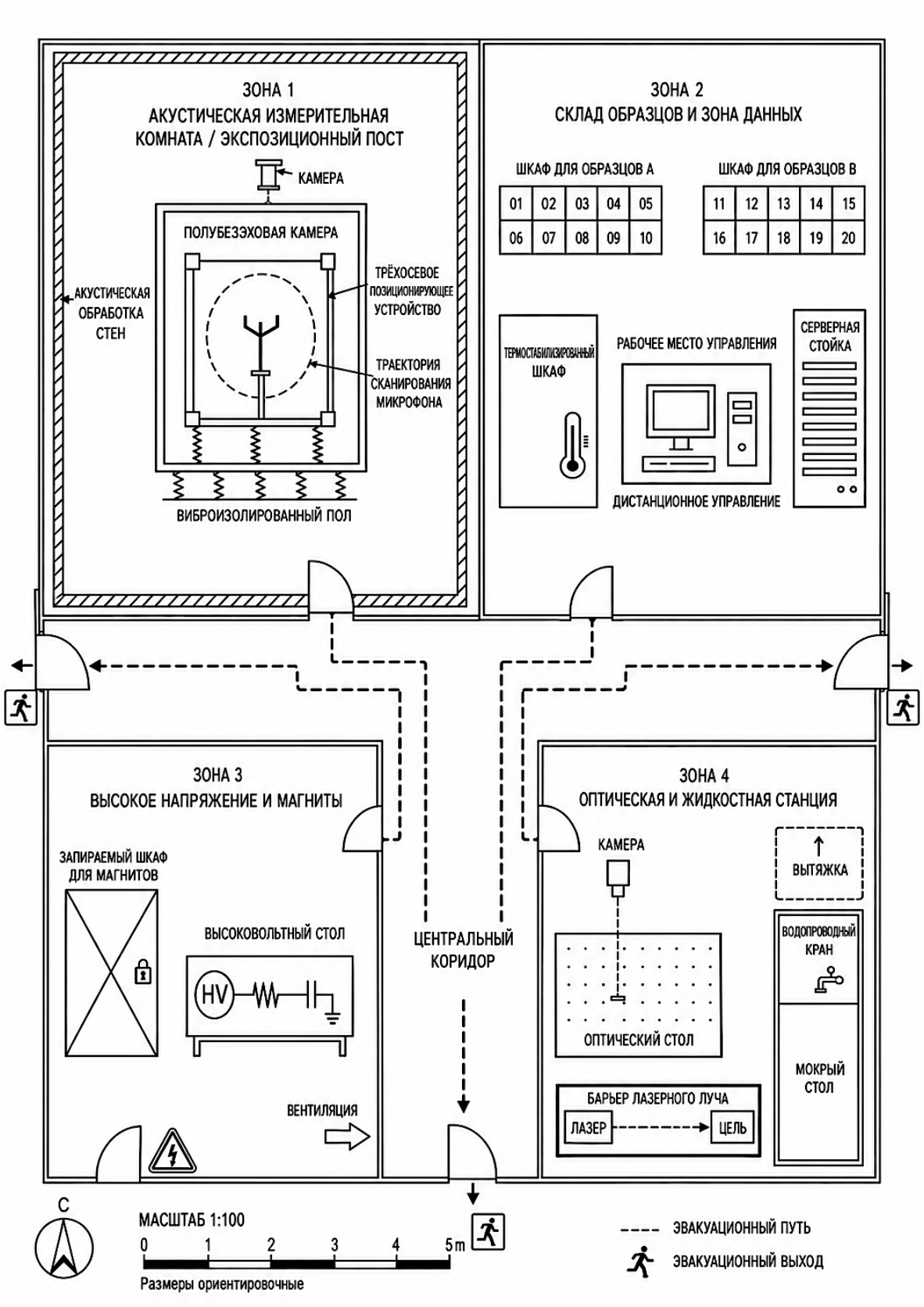


FIG-N1-23: План проекта исследовательской лаборатории

21 ГРАФИК РАБОТ

В каком порядке и почему именно так.

21.1 Как составлен план

План разбивает программу на этапы, которые следуют друг за другом по результатам, а не только по времени. Переход к следующему этапу осуществляется только тогда, когда известен результат предыдущего.

Этапы представляют собой научные и операционные вехи, а не отдельные раунды финансирования. Первичная финансовая модель N1 предполагает обеспечение всего запланированного объема программы единовременным целевым взносом или пожертвованием до начала основной реализации. Средства впоследствии управляются в рамках утвержденного бюджета N1 в соответствии с фактическим ходом исследований.

Решение о продолжении, изменении или прекращении конкретного направления исследований принимается на основе результатов измерений и методологических критериев документа, а не на основании необходимости неоднократно обращаться к финансирующей стороне с просьбой о выделении следующей части бюджета.

Такая организация позволяет научно завершить или переориентировать программу на границе фазы без того, чтобы исследовательские решения зависели от текущего внешнего финансирования. Неиспользованные средства остаются в управлении в соответствии с целью финансирования и соответствующим договором.

21.2 Этап F0 — подготовка

Содержание этапа заключается в приведении рабочей площадки в состояние, при котором можно проводить измерения, и получении эталонных значений, с которыми будет производиться сравнение.

- Установка первого этапа измерительной цепи в соответствии с главой N1/20.10.
- Калибровка измерительной цепи и определение уровня фона.
- Изготовление серии образцов в соответствии с главой N1/15.8, включая производственную документацию на каждый экземпляр.
- Составление расчетной модели и ее калибровка на заранее определенном калибровочном наборе в соответствии с главой N1/17.6.

- Вступительные медицинские осмотры работников, задействованных в регулярной экспериментальной эксплуатации, в соответствии с главой N1/18.11.
- Подготовка протокола безопасности по экспозиционно-физиологическим исследованиям, его предварительная регистрация и представление на независимую этическую экспертизу в соответствии с главой N1/18.12.
- Предварительная регистрация протоколов для измерений фазы F1.

Результатами этапа являются функциональное базовое рабочее место, задокументированная серия образцов, откалиброванная расчетная модель с заранее заданными прогнозами и подготовленные протоколы для этапа F1.

21.3 Этап F1 — первичная валидация

На данном этапе дается ответ на вопрос, присутствует ли в резонаторе соответствующая вырожденная или почти вырожденная пара и какая амплитудная и фазовая организация движения формируется между плечами.

- Физическая и дозиметрическая характеристика планируемого режима воздействия в соответствии с главами N1/18.3–N1/18.10.
- После выполнения дозиметрических и этических условий, а также условий безопасности — базовое исследование безопасности воздействия и физиологических эффектов в соответствии с главой N1/18.12.
- Модальное измерение и сравнение с моделью; проверка наличия вырожденной пары.
- Трёхканальное магнитное считывание в соответствии с главой N1/13.4.
- Возбуждение одного плеча и проверка циклической симметрии в соответствии с главой N1/13.5.
- Измерение резонанса, коэффициента качества и влияния зажима.
- Киматическое измерение с контрольными измерениями согласно главе N1/10.4.

Точка принятия решения в конце фазы однозначна. Если соответствующая вырожденная или почти вырожденная пара не обнаруживается даже после проверки численной сходимости, экспериментальной чувствительности и исследуемого диапазона геометрических и граничных условий, модальный механизм, предполагаемый в главе N1/09, не находит подтверждения для тестируемой конфигурации. Соответствующие гипотезы обозначаются как неподтвержденные, и программа, в соответствии с заранее определенным

правилом принятия решения, либо переходит к корректировке геометрии, либо данная ветвь исследования закрывается.

21.4 Этап F2 — систематизация

На этом этапе отдельные наблюдения преобразуются в зависимости. Измеряется не одна деталь, а ряды деталей и ряды настроек.

- Исследование допусков в соответствии с главой N1/06.8 с измерением рассеяния в зависимости от отклонения.
- Сравнение L2 и L3 в соответствии с главой N1/04.5, включая метрику соответствия.
- Измерение момента импульса с помощью торсионной мишени и дискриминация по отношению к потоку в соответствии с главой N1/09.6.
- Объемная визуализация с испытанием зависимости расстояния между слоями от частоты в соответствии с главой N1/10.11.
- Измерения ручки, включая соотношение торсионной и продольной составляющих, согласно главе N1/14.3.
- Измерения жидких образцов, включая ротационный тест и термическую калибровку в соответствии с главами N1/11.4 и N1/11.9.
- Сравнение материалов и измерение контрольной пары в соответствии с главами N1/15.4 и N1/15.6.

Решающий момент в конце этапа касается всего публикационного комплекса. Если поля наборов L2 и L3 при заранее заданной метрике и чувствительности измерения не различаются воспроизводимым образом, гипотезы, предполагающие особый вклад монолитной топологии за пределами управляемого набора источников, теряют обоснование для тестируемых условий. Впоследствии программа переориентируется на свойства, которые можно отнести к геометрии и управлению отдельными источниками.

21.5 Промежуточные результаты

Публикация данных не происходит только в конце. После каждого этапа публикуются измеренные данные, протоколы и результат, независимо от того, подтвердилось ли предположение.

Причина заключается в воспроизводимости. Если данные будут опубликованы только по окончании программы, никто не успеет их проверить в тот момент, когда это ещё могло бы повлиять на ход программы.

Вторая причина — защита от непреднамеренной корректировки. Опубликованный промежуточный результат нельзя задним числом переформулировать в зависимости от того, какими оказались более поздние измерения.

21.6 Порядок первых измерений

Следующие измерения проводятся сразу после калибровки. Они не требуют готовой камеры или полного набора приборов, и их результат определит, в каком направлении пойдет остальная часть фазы F1.

Гипотеза	Измерение	Предположение
H-N1-17	Трёхканальное магнитное считывание фаз с наконечников плеч	намагниченный образец, измерительные катушки
H-N1-18	Возбуждение одного плеча, считывание остальных двух	канал возбуждения, синхронизация
H-N1-19	Проверка циклической симметрии путем последовательного возбуждения плеч	то же самое
H-N1-27	Модальное измерение и сравнение с расчетом	виброметр; микрофон в качестве дополнительного акустического измерения; расчетная модель
H-N1-10	Основная физическая дозиметрия режима воздействия	калиброванная акустическая цепь

Порядок не является обязательным для всего этапа; он является обязательным для его начала. Если какое-либо из этих измерений даст неожиданный результат, план оставшейся части этапа пересматривается перед его продолжением.

21.7 Что может изменить план

План корректируется по трем причинам, и в каждом случае изменение фиксируется с указанием даты и обоснования.

- Результат измерения, который изменяет исходное предположение. Это желательная причина, и план с ней рассчитан.
- Эксплоративный результат согласно главе N1/01.4, требующий отдельной проверки. Для таких случаев предусмотрен резерв на повторные испытания согласно главе N1/19.5.

- Внешние обстоятельства, в частности сроки поставки оборудования и доступность внешних услуг.

Изменение плана по причине того, что результат не соответствует ожиданиям, не входит в число указанных причин.

21.8 Связь графика с бюджетом и независимость финансирования

Первичная финансовая модель N1 предполагает единовременное безвозвратное финансирование программы без права финансирующей стороны на возврат вложенных средств. Конкретная правовая форма финансирования, целевое назначение средств и правила их управления определяются договором до начала основной реализации.

Финансирование не дает финансирующей стороне права вмешиваться в результаты измерений, интерпретацию данных, классификацию гипотез или принятие решений о научном подходе. Обнародование положительного, отрицательного или неопределённого результата не может быть обусловлено согласием финансирующей стороны.

Этапы определяют последовательность закупок, экспериментов и операционных расходов в рамках уже обеспеченного бюджета. Они не означают отдельных раундов финансирования или требования о повторном одобрении продолжения финансирования со стороны финансирующей стороны.

Единовременное финансирование всей программы позволяет закупать оборудование с длительными сроками поставки с достаточным запасом времени и в то же время оставляет научной группе возможность изменять порядок проведения экспериментов в зависимости от полученных результатов без нарушения финансовой непрерывности.

Этапы увязаны со сроками закупок и операционных расходов в рамках уже обеспеченного бюджета N1. Минимальный функциональный объем охватывает этапы F0 и часть F1, целевой объем — этапы от F0 до F2.

На границе каждой фазы создаётся самостоятельный, завершённый и готовый к публикации результат. Если результаты обосновывают прекращение или переориентацию определённой ветви, проведённая до этого работа остаётся полноценно применимой и воспроизводимой.

Предполагаемая продолжительность и связь с закупками:

Этап	Продолжительность	Закупки на данном этапе
F0 — подготовка	9–12 месяцев	EQ-N1-01–07, 09, 10, 25, 28; начало реализации EQ-N1-41; подготовка EQ-N1-39; первый этап работы
F1 — первичная валидация	10–12 месяцев	EQ-N1-11–20, 26, 27; EQ-N1-39–42 в соответствии с утвержденным протоколом; второй и третий этапы работы на рабочем месте
F2 — систематика	12–15 месяцев	EQ-N1-21–24, 30–32; завершение работы над эталонной камерой EQ-N1-08
F3 — масштабная ветвь	параллельно с F1 и F2	EQ-N1-33–38
Всего	**31–39 месяцев**	

Пункт EQ-N1-41 активируется уже на этапе F0, поскольку профессиональная и этическая подготовка к исследованию по безопасности физиологических реакций на воздействие должна предшествовать самому воздействию на человека. Комплект EQ-N1-39 можно приобрести уже на этапе F0, однако его использование на участниках начинается только на этапе F1 после достижения контрольного показателя безопасности G-HUMAN. Позиции EQ-N1-40 и EQ-N1-42 используются только в соответствии с утвержденным протоколом и фактическим объемом исследования.

Масштабная ветвь F3 технически может проводиться параллельно с F1 и F2, однако её сравнительная интерпретация требует эталонных результатов из слышимой серии. Поэтому сбор данных F3 может начаться до завершения F2, а окончательная оценка масштабного сходства завершается только после получения соответствующих эталонных данных.

Базовая финансовая модель рассчитана на 36 месяцев. График работ имеет рабочий диапазон 31–39 месяцев; в случае превышения 36 месяцев дополнительные эксплуатационные расходы финансируются и отражаются отдельно в соответствии с фактическим продлением программы.

G-HUMAN — веха безопасности для исследований на людях: целенаправленное воздействие на человека активируется только после завершения физической дозиметрии запланированного режима, проверки критериев остановки и получения необходимого этического одобрения. Эта веха не зависит от того, подтверждают ли предыдущие физические результаты основную гипотезу программы.

Указанная продолжительность является оценкой для команды в диапазоне, предусмотренном главой N1/19.7. Этот диапазон учитывает сроки поставки оборудования, которые для лазерного виброметра и камеры исчисляются месяцами, а не неделями, и поэтому закупка начинается в начале этапа, а не в его ходе.

Масштабная ветвь F3 может технически осуществляться параллельно с F1 и F2, однако её сравнительная интерпретация требует эталонных результатов из слышимой серии. По этой причине сбор данных F3 может начаться до завершения F2, однако окончательная оценка масштабного сходства завершается только после получения соответствующих эталонных данных.

22 ГИПОТЕЗЫ

Исчерпывающий перечень всего, что в данном документе рассматривается как открытый вопрос, включая то, что могло бы закрыть тот или иной вопрос.

22.1 Два вида вопросов

В документе используются два вида утверждений, которые имеют разный характер и разную роль.

Гипотеза задает вопрос о том, верно ли что-либо. У неё есть критерий подтверждения и критерий опровержения, поэтому можно показать, что она неверна. Обозначается как H-N1-xx.

Открытый вопрос задает, как или почему что-то происходит. Его невозможно опровергнуть, поскольку он не утверждает, а выясняет. Он обозначается как Q-N1-xx.

Оба вида необходимы и выполняют разные задачи. Гипотеза придаёт документу проверяемость и защищает его от того, чтобы его можно было подстроить под результат. Открытый вопрос позволяет исследовать явления, которые наблюдаются, но пока не имеют объяснения, и которые не укладываются в форму «да» или «нет».

Открытый вопрос имеет одно обязательное условие: определённый результат. Указывается, что будет результатом — карта, кривая, каталог или классификация. Без этого у вопроса не было бы границ, и было бы невозможно определить, когда на него дан ответ.

22.2 Свод гипотез

Следующая таблица содержит все гипотезы документа с кратким изложением, реестром и этапом. Полный текст, включая критерий опровержения, приводится в главе, в которой вводится гипотеза. Статус гипотезы обновляется в рабочем реестре в соответствии с правилами данной главы.

ID	Формулировка (сокращённая)	Рег.	Этап
H-N1-01	В фокальной области возникает тороидальная вращающаяся структура вокруг оси	[H]	F1
H-N1-02	Частота предсказывается адаптированной моделью изгиба	[H]	F2
H-N1-03	Конфигурация изменяет пространственное распределение поля в фокальной области	[H]	F2
H-N1-04	Базовую таксономию можно расширить за счёт дополнительных геометрически однозначных конфигураций.	[H]	F1-2

ID	Формулировка (сокращённая)	Рег.	Этап
H-N1-05	Четырёхлучевые резонаторы имеют аналогичные варианты поля	[H]	F2
H-N1-06	Резонатор генерирует ненулевой акустический момент импульса	[H]	F2
H-N1-07	В акустическом поле триаурального резонатора при определенных условиях возбуждения сосуществуют стоячая и вращательная составляющие.	[H]	F2
H-N1-08	Киматическая картина является «подписью» геометрии источника	[H]	F1
H-N1-09	По статической фигуре можно восстановить конфигурацию	[H]	F2
H-N1-10	Измеренный профиль воздействия планируемого режима соответствует применимым критериям безопасности и действующим предельным значениям для данного типа воздействия и юрисдикции, в которой работает лаборатория.	[H]	F1
H-N1-11	Контактная передача по волноводу поддается измерению и количественной оценке	[H]	F1
H-N1-12	Многоисточниковый синтез воспроизводит узловую сеть монолита	[H]	F2
H-N1-13	Ромбокубооктаэдрическая конфигурация дает идентичную узловую структуру	[H]	F2
H-N1-14	Существует минимальное количество источников для точного синтеза	[H]	F2
H-N1-15	Электростатическое возбуждение имеет меньшую дисперсию, чем удар	[H]	F1
H-N1-16	Трехфазное электростатическое возбуждение вызывает вращательное состояние	[H]	F1
H-N1-17	Трёхканальное магнитное считывание выявляет фазовый сдвиг	[H]	F1
H-N1-18	Возбуждение одного плеча даст фазово-сдвинутый отклик	[H]	F1
H-N1-19	Отклик является циклически симметричным при постепенном возбуждении	[H]	F1
H-N1-20	Магнитострикционное трехфазное возбуждение вызывает вращательное состояние	[H]	F1
H-N1-21	Магнитное поле обеспечивает плавную настройку частоты	[H]	F1
H-N1-22	Магнитизация изменяет коэффициент качества и резонанс	[H]	F1

ID	Формулировка (сокращённая)	Рег.	Этап
H-N1-23	Магнитизация управляемо расщепляет вырожденную пару	[H]	F2
H-N1-24	Конфигурация с изгибом внутрь дает магнитный нуль	[H]	F2
H-N1-25	Геометрически привилегированные конфигурации, описанные в главе N1/06, демонстрируют различающиеся друг от друга модальные или полевые отклики.	[H]	F2
H-N1-26	Существует пороговое отклонение, при превышении которого явление исчезает	[H]	F2
H-N1-27	Модальный анализ предсказывает вырожденную пару, что согласуется с результатами измерений	[H]	F1
H-N1-28	Узор на поверхности соответствует нестабильности Фарадея	[H]	F1
H-N1-29	Осаждение повторяет узловую структуру поля	[H]	F1
H-N1-30	Симметрия узора зависит от геометрии источника	[H]	F1
H-N1-31	Воздействие изменяет состав растворённых газов и поверхностное натяжение	[H]	F1
H-N1-32	Разница во вкусе подтверждается в ходе слепого теста	[H]	F2
H-N1-33	Воздействие изменяет параметры нуклеации при замораживании	[H]	F2
H-N1-34	Соотношение торсионной и продольной составляющих в рукоятке систематически изменяется между различными модальными состояниями.	[H]	F1
H-N1-35	Расположение узлов вдоль рукоятки предсказуемо	[H]	F1
H-N1-36	Спиральная рифленость обеспечивает сопряжение тяги и кручения	[H]	F2
H-N1-37	Передача усилия на руку зависит больше от положения захвата, чем от силы	[H]	F2
H-N1-38	Длина рукоятки изменяет коэффициент качества через положение узла	[H]	F1
H-N1-39	Вращательная составляющая имеет характер фазовой сингулярности	[H]	F2
H-N1-40	В аэрозоле возникают структуры, связанные с положением плеч	[H]	F1
H-N1-41	Расстояние между структурами обратно пропорционально частоте	[H]	F1
H-N1-42	Скорость течения растёт пропорционально квадрату амплитуды	[H]	F2

ID	Формулировка (сокращённая)	Рег.	Этап
H-N1-43	При достаточном объеме течение ограничивается пределами ячейки	[H]	F2
H-N1-44	Воздействие вносит в образец измеримое тепло	[H]	F1
H-N1-45	Тепловая мощность различается между триауральным и классическим источником	[H]	F1
H-N1-46	Кристаллизация в поле изменяет габитус и распределение размеров	[H]	F2
H-N1-47	В дальнем поле отклик не зависит от типа источника	[H]	F1
H-N1-48	В ближнем поле связь зависит от взаимного ориентирования	[H]	F2
H-N1-49	Резонатор, выступая в качестве источника, возбуждает в приемнике вращающийся режим	[H]	F2
H-N1-50	При сильной связи проявляется расщепление нормальных мод	[H]	F2
H-N1-51	Рассеяние монотонно растёт с угловым отклонением	[H]	F2
H-N1-52	Триауральное приемное поле имеет иную направленную точность	[H]	F2
H-N1-53	Триауральный приемник более чувствителен к вращательной составляющей	[H]	F2
H-N1-54	Классификатор присваивает фигуре топологию, выходящую за пределы случайности	[H]	F2
H-N1-55	Конфигурация TETRAMID при $\varphi = 109{,}47°$ демонстрирует при одном и том же материале и сопоставимой масштабной воспроизводимо отличающийся модальный отклик по сравнению с близкими конфигурациями того же геометрического семейства C3.	[H]	F2
H-N1-56	При использовании одного и того же материала и сопоставимой характерной величины трёхлучевая и четырёхлучевая топологии демонстрируют воспроизводимо отличающуюся модальную структуру.	[H]	F2
H-N1-57	Двухчастотное возбуждение близких модальных составляющих создает изменяющуюся во времени пространственную суперпозицию, характерная скорость эволюции которой соответствует разности возбуждаемых частот.	[H]	F2
H-N1-58	EQUATOR демонстрирует иную передачу механической энергии в центральный волновод по сравнению с соседними конфигурациями основной ветви.	[H]	F2

ID	Формулировка (сокращённая)	Рег.	Этап
H-N1-59	Зеркальные конфигурации с одинаковым φ демонстрируют различия в механическом или полевом отклике вследствие противоположной осевой ориентации несущих плеч.	[H]	F2
H-N1-60	Трехплечевой резонатор при возбуждении без намеренно введенного азимутального фазового градиента может создавать воспроизводимую фазовую циркуляцию акустического поля, которая связана с его собственной модальной динамикой.	[H]	F2
H-N1-61	Основное вращательное состояние, связанное с несимметричной вырожденной парой трёхлучевого резонатора, создаёт фазовую сингулярность с топологическим зарядом $\lvert l \rvert = 1$, причём знак l меняется на противоположный при изменении направления фазовой циркуляции.	[H]	F2
H-N1-62	Управляемое нарушение тройной симметрии систематически изменяет положение, устойчивость или топологическую структуру фазовой сингулярности, связанной с вращающимся состоянием.	[H]	F2
H-N1-63	В случае геометрически схожих трёхлучевых резонаторов характер модального и акустического вращательного отклика сохраняется при различных масштабах, если сопоставимы соответствующие безразмерные параметры системы, включая отношение характерного размера к длине волны.	[H]	F3
H-N1-64	При определённых условиях возбуждения колебания трёхлучевого резонатора могут одновременно содержать измеримые симметричную и несимметричную модальные составляющие.	[H]	F2
H-N1-65	В монокристаллическом теле с тройной геометрией модальная структура и расщепление соответствующей вырожденной или почти вырожденной пары зависят от ориентации кристаллической решетки относительно осей резонатора. В частности, проверяется, представляет ли выравнивание кубических направлений [100], [010], [001] с плечами и направления [111] с центральной осью	[H]	F2

ID	Формулировка (сокращённая)	Рег.	Этап
	экстремальную или симметрически привилегированную ориентацию.		

22.3 Открытые вопросы

Следующие вопросы основаны на явлениях, которые неоднократно наблюдались при работе с устройствами и которые пока не имеют объяснения. Они приводятся вместе с результатами, на основании которых считается, что на них даны ответы.

ID	Вопрос	Результат
Q-N1-01	Что определяет симметрию киматического образа?	карта узоров в плоскости частоты и амплитуды для каждой конфигурации
Q-N1-02	Как развивается картина во время затухания и при каких условиях она остается пространственно стабильной?	запись развития узора с временным разрешением от возбуждения до затихания с количественной оценкой стабильности
Q-N1-03	В какой степени форма узора зависит от материала, частоты и геометрии источника?	сравнительная серия по различным материалам, частотам и конфигурациям с количественной оценкой сходства узоров
Q-N1-04	Какую форму имеет пространственная сеть узлов вокруг резонатора?	трехмерная карта поля с обозначенными узлами при нескольких частотах
Q-N1-05	Почему в некоторых положениях источник звука кажется расположенным в другом месте?	карта положений с этим явлением, сопоставленная с измеренным полем
Q-N1-06	Что пульсация звука говорит о состоянии мод?	время-частотный анализ пульсации, оценка Δf и пространственно-фазовое сравнение с модальными измерениями
Q-N1-07	Являются ли пространственные узлы сечениями той же структуры, которую визуализирует киматика?	сравнение плоскостной и объемной карт при одинаковых условиях; совпадение расстояний, совместное вращение с источником и одинаковый отклик на изменение частоты

ID	Вопрос	Результат
Q-N1-08	Как модальная структура и пространственное поле непрерывно изменяются в зависимости от угла φ поперек основной и зеркальной ветвей?	кривые/матрицы наблюдаемых величин как функции φ и осевой ветви.
Q-N1-09	Каковы временные и амплитудные характеристики симметричной и асимметричной модальных составляющих при колебаниях трехлучевого резонатора?	разложение модальных составляющих с временным разрешением и классификация хода колебаний по сценариям A–C или идентификация другого хода колебаний

Вопросы Q-N1-04 и Q-N1-05 относятся также к установке без монолита, то есть к пространственному расположению источников согласно главе N1/12.6. Поэтому они не зависят от результата сравнения L2 и L3 согласно главе N1/04.5 и остаются открытыми даже в том случае, если поля обеих установок не различаются.

22.4 Примечания к отдельным вопросам

Q-N1-02 Динамика и стабильность узора

Узоры Фарадея могут переходить из одного состояния в другое при изменении амплитуды. Предварительные наблюдения [O] указывают на то, что при определённых условиях наблюдаемый узор может сохраняться в течение значительной части затухания. Поэтому его временная стабильность измеряется и количественно оценивается без предварительных допущений.

Q-N1-03 Независимость от материала и частоты

Согласно имеющимся на данный момент предварительным наблюдениям [O], у некоторых резонаторов из разных материалов и с разными собственными частотами появлялись визуально схожие узоры. Степень этого сходства пока не была систематически количественно оценена.

Если высокое сходство подтвердится в ходе контролируемой серии экспериментов, станет возможным исследовать, в какой степени доминирующая симметрия образа связана с геометрией источника и какие его свойства остаются чувствительными к материалу, частоте, амплитуде и граничным условиям.

Проверка требует управляемого изменения отдельных параметров и количественной оценки совпадения в соответствии с главой N1/10.3.

Q-N1-06 Пульсация звука

Пульсация звучащего резонатора может возникать в результате суперпозиции двух спектральных составляющих с близкими частотами. В простом двухчастотном случае характерная частота огибающей определяется разностью их частот, так что по временной записи можно оценить соответствующее частотное расщепление.

Однако само по себе наличие записи не определяет пространственный характер суперпозиции. Две близкие моды могут создавать стоячую, вращающуюся, прецессирующую или более общую изменяющуюся во времени кривую в зависимости от своих модальных форм, относительных амплитуд и фаз.

Поэтому в дискриминационном измерении используется несколько синхронных каналов, расположенных под разными азимутами. Отслеживается не только частота огибающей, но и относительная фаза, а также пространственное изменение комплексной амплитуды. Систематический азимутальный сдвиг может подтверждать интерпретацию движущейся или прецессирующей структуры; общая модуляция всех направлений совместима с неподвижным или глобально амплитудно-модулированным откликом.

При точной вырожденности сигнал, вызванный частотной разностью, исчезает. Само по себе это не позволяет различить стоячее и вращающееся состояния, поскольку оба могут быть созданы различной суперпозицией одной и той же вырожденной пары. Решающим является пространственно-фазово-разрешенное измерение в соответствии с главами N1/09 и N1/13.

Таким образом, пульсация предоставляет информацию о наличии близких по частоте составляющих, а не является самостоятельным доказательством вращения.

22.5 Условные гипотезы

Некоторые гипотезы имеют смысл только в том случае, если они прошли проверку на более низком уровне лестницы сложности. В документе эти связи указываются заранее, и автор обязуется пересмотреть гипотезу, если условие не выполняется.

Гипотеза	Условная	Что выводится	Что не падает
H-N3-01–07	L2 по сравнению с L3 (N1/04.5)	требование к специфичности для монолита	влияние поля как такового
H-N1-01, 06, 07, 39	Наличие вырожденной пары	механизм суперпозиции двух мод	вращение, обусловленное другим механизмом
H-N1-34	Возбуждение ротационного мода	объяснение соотношения составляющих в ручке	измерение составляющих как таковое

В таком случае гипотеза не снимается как тема, а переходит в состояние «без подтверждения». Фальсификация относится к конкретному утверждению с конкретным механизмом, но никогда не касается всей области.

Гипотеза, перешедшая в состояние без подтверждения или опровергнутая, остается в реестре с указанием этого исторического статуса. Если новый механизм, метод измерения или эксплоративное открытие обосновывают проведение дальнейшего теста, формулируется новая или явно пересмотренная гипотеза с собственной идентификацией и связью с исходным результатом. Исходное состояние задним числом не изменяется.

Объем N1 не является исчерпывающим перечнем всех экспериментов, которые можно провести с данной системой. В ходе реализации могут возникнуть дополнительные эксплоративные ветви, основанные на полученных результатах измерений или новых технических возможностях. Они могут включать, например, управляемое механическое вращение всего резонатора или другие геометрические варианты. Такие измерения обозначаются как эксплоративные, документируются отдельно и не изменяют задним числом ни состояние, ни критерии предварительно зарегистрированных гипотез. Более значимый новый механизм или отдельная гипотеза вводится только в качестве новой версии исследовательской позиции.

22.6 Что остается ценным независимо от результата

Часть результатов программы не зависит от того, подтвердится ли вращательная составляющая поля. Поэтому они приводятся отдельно.

- Кривая допусков расщепления в зависимости от отклонения угла согласно главе N1/06.8.
- Модальное описание монолита с симметрией C3, включая сравнение с расчётом.

- Сравнение трёхлучевой и четырёхлучевой топологии одного и того же полуфабриката в соответствии с главой N1/15.6.
- Угловая зависимость симпатической связи согласно главе N1/13.10.
- Соотношение торсионной и продольной составляющих в рукоятке согласно главе N1/14.3.
- Минимальное количество источников для точного синтеза поля согласно главе N1/12.7.
- Карта киматических и поверхностных узоров и их зависимости от экспериментальных условий.
- Геометрическая параметризация согласно главе N1/06 и нормативная терминология согласно главе N1/08.

Данный перечень является частью обоснования целесообразности программы. Даже в случае неподтверждения основной гипотезы результатом остаётся набор систематических измерений, геометрических параметризаций, экспериментальных протоколов и определений, обладающих самостоятельной методологической и репликационной ценностью.

23 АНАЛИЗ ФИНАНСИРОВАНИЯ И ОТКРЫТАЯ ВОЗМОЖНОСТЬ

Что нужно исследованию, на каких условиях и почему оно не начинается до тех пор, пока не будет профинансировано.

23.1 О чем эта глава

В предыдущих главах описано, что и как следует измерять. В этой главе речь идет о том, при каких условиях это можно осуществить.

Речь не идет о заявке на грант. Этот документ не подаётся ни в какое агентство и не претендует на выделение средств в рамках конкурса. Это анализ, который должен позволить любому оценить, что требует программа и что она предоставит в обмен.

Эта глава намеренно написана без попыток убеждения. Тот, кто задумывается о поддержке исследований, нуждается в цифрах и условиях, а не в обосновании их важности; именно это и является содержанием остальной части документа.

23.2 Принцип, на котором основана программа

Исследование начинается с финансирования, а не до него. Вклад команды на сегодняшний день исчерпан и далее не увеличивается.

Ни одна из статей программы, включая подготовительные измерения, не предполагается в качестве работы, выполняемой бесплатно или за счёт собственных средств. Этот принцип действует независимо от того, насколько несложными кажутся некоторые измерения.

Причина этого носит практический характер. Программа, часть работы по которой выполняется без финансового обеспечения, не имеет возможности определить фактические затраты и не может предоставить надёжную оценку для дальнейшей работы.

23.3 Объем работ и его составление

Бюджет составлен для одного оснащенного и самодостаточного рабочего места в соответствии с главой N1/19.2. Он не предлагается по уровням и не содержит экономичных вариантов.

Указанная разбивка на этапы F0–F3 определяет график закупок и расходов в рамках утвержденного бюджета; она не представляет собой альтернативные уровни финансирования или отдельные транши.

Это решение имеет объективное обоснование. Программа основана на повторных измерениях, на длинных сериях и на том, что конфигурация

оборудования остается неизменной между измерениями. Сокращение объема привело бы к результатам, которые пришлось бы позже повторять, а затраты на повторные измерения превышают экономию.

Резервы включены в бюджет в качестве отдельных статей с указанными ставками в соответствии с главой N1/19.5, а не в виде неуказанной надбавки. Их состав публикуется наравне с остальной частью бюджета.

Указанная сумма относится к узлу N1. Документы N2 и N3 имеют собственные бюджеты.

Бюджет составлен на три года в соответствии с графиком, приведённым в главе N1/21. Приведённая ниже таблица представляет собой сводку статей, указанных в главах N1/19.3, N1/19.5 и N1/19.7.

Статья	**От (€)**	**До (€)**
Оборудование — разовое приобретение	395 200	1 686 500
Услуги — единовременная оплата за период	27 000	90 000
Эксплуатационные расходы за три года	1 627 800	2 329 500
Промежуточный итог	**2 050 000**	**4 106 000**
Технический резерв, 10 % от суммы выплат	31 520	138 650
Строительный резерв, 18 % от камеры EQ-N1-08	14 400	54 000
Эксплуатационный резерв, 5 % от эксплуатационных расходов	81 390	116 475
Резерв на репликацию, 8 % от промежуточного итога	164 000	328 480
Резервы, всего	**291 310**	**637 605**
Итого бюджета	**2 341 310**	**4 743 605**

Инфляционная поправка — определяется в зависимости от сроков закупки и эксплуатационных расходов, а также в соответствии с выбранным публичным ценовым индексом; в рабочем бюджете указывается отдельно от резервов.

Указанные суммы являются приблизительной оценкой. Нижняя граница соответствует базовой комплектации оборудования и местоположению с более низким уровнем цен, верхняя граница — лабораторной комплектации, а также закупкам и найму персонала в Европейском союзе. Разница между этими двумя пределами поэтому значительна и будет уточнена только после выбора места расположения и запроса конкретных предложений.

Указанная трёхлетняя сводка представляет собой публичную технико-эксплуатационную калькуляцию N1, а не окончательную сумму, необходимую для запуска программы. С учётом локализационных, правовых и организационных условий, временного риска реализации, специальной компенсации учредителям, затрат на закрытие рабочего места и других

статей, которые на сегодняшний день невозможно адекватно оценить, предварительная финансовая рамка запуска проекта N1 оценивается в 6–10 миллионов евро. Речь идет об ориентировочной сумме; точный расчет будет составлен только в ходе переговоров с серьезным заинтересованным инвестором после определения конкретной модели реализации.

Активационная структура также предусматривает соответствующий резерв на дополнительные исследовательские работы, которые могут возникнуть на основе результатов программы или новых технических возможностей. Их включение документируется отдельно и не должно вносить изменения в предварительно зарегистрированные гипотезы или их критерии задним числом.

23.4 Что входит в бюджет

Бюджет включает оборудование в соответствии с главой N1/19.3, эксплуатационные расходы в соответствии с главой N1/19.7, резервы в соответствии с главой N1/19.5 и поправку на инфляцию при многолетнем финансировании.

Он также включает статьи, которые в аналогичных бюджетах обычно опускаются: калибровку и обслуживание приборов, расходные материалы, потери при изготовлении образцов, приобретение стандартов, расходы на публикацию, включая публикацию отрицательных результатов, а также время на документирование и архивирование данных.

Бюджет N1 включает оборудование и услуги, необходимые для базового исследования по безопасности, экспозиции и физиологии в соответствии с главой N1/18.12. Он не включает расширенные биологические, механистические или клинические исследования, направленные на оценку пользы для здоровья или терапевтической эффективности; они относятся к N3. Также он не включает камеру AURIS, специализированную инфраструктуру N3 и оборудование для электромагнитных измерений, которое относится к категории N2. Не включает правовое и организационное обеспечение.

23.5 Резервы и неиспользованные средства

Отдельно указывается статья, которая редко встречается в бюджетах исследовательских программ.

Резерв на повторные измерения — это зарезервированная часть средств, предназначенная для независимого повторения измерения, которое дало неожиданный результат. Он используется исключительно в том случае, если измерение дало неожиданный, решающий или методологически значимый результат, который в соответствии с заранее установленными критериями требует независимого повторения.

Выделение средств на проверку собственного результата является частью подхода, который документ применяет и в других случаях: предварительная регистрация, публикация отрицательных результатов и заранее заявленные условия, при которых гипотеза теряет обоснование.

23.6 Что даст программа

Результаты будут три, и они будут предоставлены независимо от того, какими окажутся результаты измерений.

- Исходные данные в необработанном виде вместе с протоколами и условиями измерений, публикуемые после каждого этапа.
- Документация, позволяющая провести независимое повторение: производственные чертежи образцов, расчетные файлы, методики измерений и скрипты обработки данных.
- Геометрическая параметризация в соответствии с главой N1/06 и нормативная терминология в соответствии с главой N1/08.

Список результатов, не зависящих от подтверждения основного допущения, приведён в главе N1/22.6.

Программа не задумывалась как замкнутая серия измерений. Если на указанные вопросы будут даны ответы, из них возникнут новые, и часть из них выйдет за рамки акустики. Программа учитывает это и построена с учётом этого; документы N2 и N3 являются первым шагом в этом расширении.

Этот факт указывается в качестве отправной точки, а не в качестве прогноза. Масштаб дальнейшего развития зависит от результатов измерений и на сегодняшний день не поддаётся количественной оценке.

23.7 Открытость и её последствия

Все результаты публикуются. Результатом программ N1–N3 проекта TRIAURAL не является коммерческий продукт. Проект TRIAURAL не продает устройства, созданные на основе этих программ, и не коммерциализирует результаты исследований. Однако открытая лицензия или публичное обнародование результатов не исключают их независимого использования третьими сторонами на условиях соответствующей лицензии и в рамках правового поля.

Из этого следует, что поддержка данной программы не предоставляет исключительных прав на результаты, а также приоритетного доступа к ним. Этот факт указывается заранее, чтобы не возникали ожидания, которые программа не может оправдать.

Открытость имеет также последствие, о котором заявляется заранее: опубликованные результаты может использовать любой, в том числе

субъекты, с которыми проект не установил бы сотрудничества. Контроль над финансированием не является контролем над использованием результатов. Проект считает открытость правильным решением даже с учетом этого последствия, поскольку она защищает результаты от присвоения.

23.8 Форма финансирования

Программа N1 рассчитана на капитальное финансирование со стороны финансово дееспособного финансирующего субъекта или небольшого числа таких субъектов. Она не работает по модели постепенного публичного сбора частичных пожертвований в качестве условия запуска программы.

Основная реализация N1 начнется только после обязательного обеспечения всего согласованного бюджета запуска. Точная сумма будет определена до заключения соглашения о финансировании в зависимости от местоположения, организационно-правовой формы, кадровой модели, временных рамок, договорных условий и других пунктов, указанных в главах N1/19 и N1/23.3.

Финансирование может быть предоставлено одной или несколькими сторонами, действующими на договорной основе. Если в финансировании участвуют несколько субъектов, их обязательства должны быть организованы таким образом, чтобы ход научной работы не зависел от текущего получения или утверждения последующих финансовых траншей.

Получение финансирования не влечет за собой права на возмещение вложенных средств, а также права вмешиваться в направление исследований, интерпретацию данных, классификацию гипотез или публикацию результатов. Конкретная правовая форма, целевое назначение средств, порядок отчетности и другие условия определяются договором до перечисления средств.

Дополнительная поддержка, полученная после обеспечения базового финансирования N1, может быть использована для расширения или ускорения исследовательской деятельности, повышения репликационной способности, создания дополнительных резервов или для подготовки и реализации последующих программ N2 и N3. Решение о конкретном распределении средств принимается с учетом текущего состояния отдельных программ, их утвержденных бюджетов и целей, на которые были выделены средства.

Если финансирующая сторона проявит интерес к комплексной поддержке проекта TRIAURAL, выходящей за рамки программы N1, финансирование может быть договорным образом распределено между программами N1, N2 и N3 или зарезервировано для их последующей реализации. Тот факт, что программа N1 уже полностью профинансирована, не исключает, таким образом, принятия дальнейшей поддержки проекта.

Возможная незначительная поддержка текущей издательской деятельности или работы веб-сайта, если TRIAURAL официально предоставит к ней доступ, отделена от финансирования программ N1–N3 и не учитывается в их финансовой рамке.

TRIAURAL не уполномочивает и не будет уполномочивать третьи стороны организовывать публичные сборы средств для финансирования программ N1–N3 или других программ проекта TRIAURAL. Любое официальное финансирование проверяется исключительно через официальные контактные данные и информацию, опубликованную на домене triaural.com. Проект TRIAURAL категорически дистанцируется от всех публичных сборов средств, кампаний или иных инициатив по сбору средств третьих сторон, которые заявляют о поддержке программ N1-N3 проекта TRIAURAL или любых других программ и мероприятий проекта TRIAURAL, и не несет за них никакой ответственности.

Прозрачная отчетность об использовании средств предоставляется в объеме и с периодичностью, согласованными в договоре. Данное право не дает финансирующей стороне право на текущее одобрение отдельных экспериментальных направлений или на установление условий их продолжения в зависимости от достигнутых результатов.

При крупных переводах платежные данные проверяются непосредственно между сторонами договора, а способ перевода выбирается в соответствии с требованиями безопасности и законодательства соответствующей юрисдикции.

23.9 Условия, устанавливаемые самим проектом

Следующие условия действуют независимо от того, кто будет финансировать программу.

- Результаты публикуются, включая те, которые не подтверждают исходную гипотезу.
- Протоколы регистрируются до сбора данных и не редактируются после сбора.
- Оборудование не предоставляется в распоряжение лиц, не входящих в состав команды, до тех пор, пока не будут выполнены условия, указанные в главе N1/18.13.
- Не указываются лечебные или иные физиологические утверждения, не подтвержденные измерениями.
- Направление исследования определяется не ожидаемым результатом, а последовательностью уровней сложности в соответствии с главой N1/04.

- Проект оставляет за собой право отказаться от финансирования.
- Финансирование не дает финансирующей стороне права налагать вето на публикацию положительного, отрицательного или неопределённого результата.

Если предоставление поддержки будет обусловлено отказом от какого-либо из указанных условий, программа не примет такую поддержку.

Право отказаться от поддержки распространяется также на случаи, когда происхождение средств, условия их предоставления или цель, с которой они предлагаются, противоречат принципам настоящего документа. Оценка является частью подготовки договора в соответствии с главой N1/23.8.

24 РЕЗЮМЕ И ОТКРЫТОЕ ПРИГЛАШЕНИЕ

Что устанавливает документ, что оставляет открытым, и приглашение к независимому воспроизведению.

24.1 Что устанавливает документ

Документ устанавливает пять элементов, которые с этого момента являются нормативными для всего публикационного цикла.

- Геометрическую параметризацию и угловые соотношения в соответствии с главой N1/06, а также нормативную терминологию частей резонатора в соответствии с главой N1/08. Определения не переопределяются в последующих документах.
- Способ обозначения утверждений в зависимости от их доказательной силы и разграничение гипотез от открытых вопросов в соответствии с главами N1/01.3 и N1/22.1.
- Шкала сложности от L0 до L7 в качестве референсной оси последовательности в соответствии с главой N1/04.
- Геометрическая таксономия конфигураций и соотношение между углом между плечами и наклоном к оси в соответствии с главой N1/06.
- Условия, при которых устройство может быть предоставлено лицам, не входящим в состав команды, согласно главе N1/18.13.

Эти пункты являются результатом документа независимо от того, какими будут результаты предлагаемых в нём измерений.

24.2 Что не утверждается в документе

Резюме отрицательных ограничений из главы N1/01.5 также приводится в конце, поскольку именно эти предложения при чтении легче всего упустить из виду.

В документе не утверждается, что вращательная составляющая поля была доказана. В нем указывается, почему предполагается её существование, какими измерениями её можно было бы подтвердить и что могло бы её опровергнуть.

В документе не утверждается, что была доказана специфическая биологическая или физиологическая реакция на триауральное воздействие. Её наличие или отсутствие измеряется в рамках протокола безопасности N1. В документе не приводятся заявления о медицинских или терапевтических свойствах, и он не является основой для медицинского изделия.

В нём не утверждается, что геометрия несёт символическое значение. Углы в данном тексте являются параметрами.

Не утверждается, что данная тема никогда не исследовалась. Указывается, что соответствующие исследования не были найдены в рамках литературного поиска по главе N1/02.5, и прилагается документ, описывающий, как проводился поиск.

24.3 Что остаётся открытым

Согласно главе N1/22, остаются открытыми шестьдесят пять гипотез и девять открытых вопросов. На момент публикации настоящего документа ни одна из них не подтверждена и не опровергнута.

Из них три являются определяющими для направления программы: существование соответствующей вырожденной или почти вырожденной модальной пары согласно главе N1/09.2; различимость поля монолита и поля управляемой системы источников согласно главе N1/04.5; природа вращательной составляющей — является ли она фазовой сингулярностью или акустическим течением — согласно главе N1/09.5.

Открытые вопросы отличаются от гипотез тем, что их невозможно опровергнуть. Они исходят из явлений, которые неоднократно наблюдались и пока не имеют объяснения; их результатом является описание, а не подтверждение.

24.4 Как можно использовать документ

Документ предназначен для трёх способов использования, каждый из которых равноценен.

- В качестве основы для независимого повторения измерений. Он содержит определения, процедуры и критерии в объёме, достаточном для независимого воспроизведения измерений без участия команды.
- В качестве отправной точки для последующих исследований, включая те, которые направлены на опровержение приведенных здесь предположений.
- В качестве анализа для оценки того, следует ли и в какой степени поддерживать программу, в соответствии с главой N1/23.

Текст публично обнародован и датирован. Достаточно подробно описанные решения могут благодаря такому обнародованию стать частью уровня техники и ограничить возможность их последующего патентования; конкретные правовые последствия зависят от объема обнародования и соответствующей юрисдикции.

24.5 Открытое приглашение

Участие в программе команды TRIAURAL не является обязательным условием для ответа на указанные вопросы. Лаборатория, располагающая надлежащей акустической, вибрационной и информационной инфраструктурой, а также возможностью изготовить или приобрести определённую серию образцов, может самостоятельно повторить существенную часть измерений, описанных в настоящем документе. Отдельные экспериментальные направления требуют дополнительного оборудования, указанного в соответствующих главах.

Мы прямо приветствуем повторение измерений в других местах, даже если это приведет к противоположному выводу. Опровергнутое измерением предположение, имеет для проекта большую ценность, чем предположение, которое останется непроверенным.

Также мы приветствуем указания на работы, касающиеся данной темы, которые мы не нашли. Такая находка будет зарегистрирована с указанием даты, и документ будет обновлён с учётом этой информации.

Контактные данные указаны на титульном листе.

24.6 Место в серии из двенадцати документов

Настоящим документом завершается дефиниционная часть публикационного цикла. Последующие документы N2 и N3 опираются на терминологию и параметры, установленные здесь, и развивают их в электромагнитной и биологической областях.

Предыдущие девять документов фиксируют диалоги с моделями ИИ и их ответы. Они составляют эксплоративный слой публикационного цикла и как таковые должны восприниматься. Документы с десятого по двенадцатый (N1–N3) составляют формальную исследовательскую линию проекта и являются выражением позиции команды TRIAURAL.

Сборник завершается двенадцатью документами. Дальнейшие действия должны определяться не убеждением в правильности предположений, а результатами измерений и условиями, необходимыми для их независимой проверки.

P ПРИЛОЖЕНИЯ И ИСТОЧНИКИ

P1 Сопоставление с внутренней библиотекой узлов

Внутренняя библиотека исследовательских узлов содержит разбиение на ветви от A до J и служит для организации работы команды. Публичные идентификаторы в формате H-N1-xx и Q-N1-xx не зависят от неё, чтобы оставаться стабильными даже при перестройке внутренней структуры.

Сопоставление ведётся во внутренней документации проекта и в данном документе не приводится. Приведение таблицы нарушило бы независимость публичных идентификаторов от внутренней структуры, поскольку вновь привязало бы их к делению, которое изменяется при реорганизации. Публичный идентификатор остаётся действительным независимо от того, как организована внутренняя работа команды.

P2 Список рисунков и таблиц

Обозначение	Содержание	Глава
РИС-N1-01	Триауральный резонатор — виды FRONT, TOP, PERSPECTIVE, BOTTOM	N1/02
РИС-N1-02	Триауральный резонатор — монолитный элемент	N1/03.1
FIG-N1-03	Резка с использованием установки FORKER	N1/03.2
FIG-N1-04	Схема потока энергии от FORKER через рукоятку к центральному узлу	N1/03.2
FIG-N1-05	Концепции EMT — электромагнитный триауральный преобразователь	N1/03.3
FIG-N1-06	Блок-схема подключения EMT	N1/03.3
FIG-N1-07	Геометрическое определение фокальной области	N1/03.4
FIG-N1-08	Основные геометрические конфигурации несущих кронштейнов	N1/06.3
FIG-N1-09	Сегменты и части резонатора; пространственное расположение основных конструктивных элементов.	N1/07.1
FIG-N1-10	Техническая визуализация углов, определяющая типы и расположение отдельных углов в рамках монолитной конструкции.	N1/08
FIG-N1-11	Схема измерения с помощью торсионного диска	N1/09.6
FIG-N1-12	Фоторепортаж — воздействие двух- и трёхрукоятных камертонов на воду	N1/10
FIG-N1-13	Нити в аэрозоле глицерина	N1/10.9

Обозначение	Содержание	Глава
FIG-N1-14	Схематическое изображение предварительного наблюдения за круговым движением металлической стружки в круглой емкости, закрепленной в области короны резонатора. Стрелка обозначает наблюдаемое направление движения частиц; схема не определяет его физический механизм.	N1/10.14
FIG-N1-15	Схема послойного сканирования пространственного поля	N1/10.19
FIG-N1-16	Техническая схема измерения	N1/11.2
FIG-N1-17	Образец осадка на поверхности минеральной воды после возбуждения в фокальной области	N1/11.2
FIG-N1-18	Треугольная компоновка L3	N1/12.2
FIG-N1-19	Каркас AURISONIC	N1/12.6
FIG-N1-20	Расположение чувствительных катушек на концах плеч	N1/13.4
FIG-N1-21	Схематическое изображение предварительно наблюдаемой изменчивости движения плеч на замедленной видеозаписи	N1/13.4
FIG-N1-22	Схема фотоэластического измерения	N1/14.7
FIG-N1-23	План этажа исследовательской лаборатории	N1/20.10

Таблицы

Обозначение	Содержание	Глава
TAB-N1-01	Шкала сложности — обзор уровней от L0 до L7	N1/04.2
TAB-N1-02	Распределение уровней по этапам графика	N1/04.6
TAB-N1-03	Углы и наклоны шести базовых конфигураций	N1/06.2
TAB-N1-04	Базовый набор материалов и их величины	N1/15.2
TAB-N1-05	Образцовая серия — количество единиц в ветвях	N1/15.8
TAB-N1-06	Радиус инерции в зависимости от формы поперечного сечения	N1/16.8
TAB-N1-07	Единовременная закупка — оценка позиций EQ	N1/19.3
TAB-N1-08	Услуги и программные позиции — оценка	N1/19.3
TAB-N1-09	Эксплуатационные расходы	N1/19.7
TAB-N1-10	Порядок первых измерений	N1/21.6
TAB-N1-11	Продолжительность этапов и увязка с закупкой	N1/21.8
TAB-N1-12	Сводка гипотез H-N1-xx	N1/22.2
TAB-N1-13	Открытые вопросы Q-N1-xx	N1/22.3
TAB-N1-14	Условные гипотезы	N1/22.5
TAB-N1-15	Объем бюджета на три года	N1/23.3

Обозначение	Содержание	Глава
TAB-N1-16	Неиспользуемые термины и замены	N1/P4
TAB-N1-17	Протокол литературного поиска — IEEE Xplore	N1/P5
TAB-N1-18	Протокол поиска — архив JASA	N1/P5
TAB-N1-19	Протокол поиска — Scopus	N1/P5
TAB-N1-20	История версий	N1/P6

Обозначение TAB-N1-xx служит для однозначной ссылки на таблицу в данном списке. В тексте глав таблицы не нумеруются, поскольку каждая из них находится непосредственно рядом с абзацем, в котором она упоминается. В списке не указаны таблицы самого данного приложения.

P3 Использованная литература

Ссылки в тексте указываются порядковым номером в квадратных скобках сразу после утверждения, к которому они относятся. Нумерация ведётся по порядку первого упоминания. При ссылке на конкретные данные указывается страница или глава.

Запись содержит: для статьи — авторов, название, журнал, том, страницу, год и идентификатор DOI; для патента — заявителя, название, номер, страну и дату выдачи; для стандарта — обозначение, полное название и год издания; для книги — авторов, название, издательство, год и ISBN.

Каждая запись перед включением в список проверяется путем открытия источника. Запись, которую невозможно проверить, не указывается. Работы, найденные после выпуска документа, регистрируются с датой обнаружения в соответствии с главой N1/02.5.

Список упорядочен по порядку первого упоминания в тексте. Номер в квадратных скобках соответствует ссылке в тексте. Все записи были проверены по первоисточнику.

[1] Россинг, Т. Д., Рассел, Д. А., Браун, Д. Э.: Об акустике камертонов. Am. J. Phys. 60 (7), 620–626 (1992).

[2] Блоджетт, Э. Д., Макканн, Л. И., Андерсон, К.: Диаграммы излучения новых одно- и трёхзубцовых камертонов. J. Acoust. Soc. Am. 110 (5, приложение), 2730 (2001). DOI 10.1121/1.4777461. Аннотация с 142-го заседания Акустического общества Америки.

[3] Тамура, Х., Такано, Т., Томикава, Ю.: Трехосный кварцевый гиросенсор с вибратором, имеющим форму с тройной вращательной симметрией. Jpn. J. Appl. Phys. 44 (6B), 4504–4508 (2005).

[4] Сонеда, Т., Тамура, Х., Томикава, Ю., Хиросе, С.: Основное исследование кварцевого вибратора с тройной ротационной симметрией для трехосного гиросенсора. Jpn. J. Appl. Phys. 46 (7B), 4709 (2007).

[5] Сато, А., Ониси, К., Сакураи, К., Томикава, Ю.: Jpn. J. Appl. Phys. 34, 2604 (1995).

[6] Сато, А., Ониси, К., Сакураи, К., Томикава, Ю.: Экспериментальные исследования пьезоэлектрического вибрационного гиросенсора с использованием резонатора в виде трехзубого камертона. Jpn. J. Appl. Phys. Part 1, 35 (8), 4417 (1996).

[7] Сато, А., Ониси, К., Томикава, Ю.: Характеристики пьезоэлектрического вибрационного гиросенсора, построенного с использованием резонатора в виде трезубчатой камертона. Материалы симпозиума IEEE по ультразвуку 1998 г. DOI 10.1109/ULTSYM.1998.762211.

[8] Сиратори, Н., Томикава, Ю., Ониси, К.: Вибрационный гиросенсор с вертикально установленным резонатором в виде трезубчатой камертона из кварцевого кристалла. Jpn. J. Appl. Phys. Part 1, 38 (5B) (1999).

[9] Томикава, Ю., Огасавара, Т., Исида, Н.: Вибрационный гироскопический датчик с резонатором в виде трезубчатой камертона, поперечная ширина которого расположена параллельно оси вращения. Тезисы доклада на заседании ASA (1998). DOI 10.1121/1.422499.

[10] Ичимура, Т., Томикава, Ю., Тамура, Х.: Исследования методом конечных элементов гиросенсора с использованием кварцевого резонатора типа трезубчатой камертона. Jpn. J. Appl. Phys. 41, 3399 (2002).

[11] Ига, Ю., Канда, К., Фудзита, Т., Хигути, К., Маэнака, К.: Проектирование и изготовление MEMS-гироскопа с использованием тонких пленок PZT. Всемирный конгресс по автоматизации 2010 г., Кобе.

[12] Ланглуа, Р. Дж. М. К.: Камертон с одновременным излучением нескольких частот. US 2 601 801, выдан 1 июля 1952 г.; заявка подана 6 августа 1947 г., приоритет Франция 24 апреля 1945 г.

[13] Майерс, Р. Э.: US 3 405 589 (1968). Многозубчатый камертон с тремя и более параллельными зубцами, один из которых намеренно расстроен.

[14] Guo, S., Ya, Z., Wu, P., Wan, M.: Обзор акустических вихрей: генерация, характеристика, применение и перспективы. J. Appl. Phys. 132 (21), 210701 (2022). DOI 10.1063/5.0107785.

[15] Рэлей, лорд: О циркуляции воздуха, наблюдаемой в трубках Кундта, и о некоторых связанных с этим акустических проблемах. Phil. Trans. R. Soc. Lond. 175, 1–21 (1884).

[16] Лайтхилл, Дж.: Акустическая течения. J. Sound Vib. 61 (3), 391–418 (1978). DOI 10.1016/0022-460X(78)90388-7.

[17] Рассел, Д. А.: О звуковом поле, излучаемом камертоном. Am. J. Phys. 68 (12), 1139–1145 (2000). DOI 10.1119/1.1286661.

[18] Томас, Д. Л.: Динамика вращательно-периодических структур. Int. J. Numer. Methods Eng. 14 (1), 81–102 (1979). DOI 10.1002/nme.1620140107. Полный текст свободно доступен в архиве HAL под идентификатором hal-01574169.

[19] Кларк, Э.: Анализ цепей систем переменного тока: симметричные и связанные компоненты, т. I. Нью-Йорк: John Wiley & Sons, 1943.

[20] Томас, Ж.-Л., Марчиано, Р.: Псевдоугловой момент и сохранение топологического заряда для нелинейных акустических вихрей. Phys. Rev. Lett. 91, 244302 (2003).

[21] Деморе, К. Э. М. и др.: Механическое подтверждение соотношения орбитального углового момента к энергии вихревых пучков. Phys. Rev. Lett. 108, 194301 (2012).

[22] Чжан, Л., Марстон, П. Л.: Акустический радиационный момент и сохранение углового момента. J. Acoust. Soc. Am. 129, 1679 (2011).

[23] Рассел, Д. А., Джунелл, Дж., Людвигсен, Д. О.: Векторная акустическая интенсивность вокруг камертона. Am. J. Phys. 81 (2), 99–103 (2013).

[24] Морс, П. М., Ингард, К. У.: Теоретическая акустика. Принстон: Princeton University Press, 1986. ISBN 978-0-691-02401-1. Первое издание: Нью-Йорк: McGraw-Hill, 1968.

[25] Марзо, А., Сиа, С. А., Дринквотер, Б. В., Саху, Д. Р., Лонг, Б., Субраманиан, С.: Голографические акустические элементы для манипулирования левитирующими объектами. Nat. Commun. 6, 8661 (2015). DOI 10.1038/ncomms9661.

[26] Марзо, А., Калеап, М., Дринквотер, Б. В.: Акустические виртуальные вихри с настраиваемым орбитальным моментом импульса для удержания частиц Ми. Phys. Rev. Lett. 120, 044301 (2018).

[27] Рио, А. и др.: Анизотропные вихревые поверхностные акустические волны, полученные методом обратной фильтрации, для генерации акустических вихрей на чипе. Phys. Rev. Applied 4, 034004 (2015).

[28] Хефнер, Б. Т., Марстон, П. Л.: Акустический преобразователь спиралевидных волн, применяемый для выравнивания ультразвуковых и подводных систем. J. Acoust. Soc. Am. 106 (6), 3313–3316 (1999). DOI 10.1121/1.428184.

[29] Мемоли, Г. и др.: Метаматериальные блоки и квантование метаповерхностей. Nat. Commun. 8, 14608 (2017).

[30] Наифи, К. Дж., Роде, К. А., Мартин, Т. П., Гилд, М. Д., Оррис, Г. Дж.: Генерация топологически разнообразных акустических вихревых пучков с

использованием компактной апертуры из метаматериала. Appl. Phys. Lett. 108 (22), 223503 (2016).

[31] Мелде, К., Марк, А. Г., Цю, Т., Фишер, П.: Голограммы для акустики. Nature 537, 518–522 (2016). DOI 10.1038/nature19755.

[32] Чжоу, Х. и др.: Генерация акустических вихревых пучков с помощью специально разработанной дифракционной решетки в форме спирали Ферма. J. Acoust. Soc. Am. 146 (6), 4237 (2019).

[33] Гао, С., Ли, Ю., Ма, Ц., Чэн, Ю., Лю, С.: Излучение спирального воздушного звука на большие расстояния с помощью низкопрофильной плоской акустической антенны. Nat. Commun. 12, 2006 (2021). DOI 10.1038/s41467-021-22325-7.

[34] Цзян, С., Ли, Ю., Лян, Б., Чэн, Ц.-Ц., Чжан, Л.: Преобразование акустических резонансов в орбитальный угловой момент. Phys. Rev. Lett. 117, 034301 (2016).

[35] Чаплэйн, Г. Дж., Де Понти, Дж. М., Старки, Т. А.: Упругая передача орбитального углового момента от упругой трубы к жидкости. Commun. Phys. 5, 279 (2022).

[36] Shi, C., Dubois, M., Wang, Y., Zhang, X.: Высокоскоростная акустическая связь посредством мультиплексирования орбитального углового момента. Proc. Natl. Acad. Sci. USA 114, 7250 (2017).

[37] Бареш, Д., Томас, Ж.-Л., Марчиано, Р.: Наблюдение однолучевой акустической ловушки с градиентной силой для упругих частиц: акустические пинцеты. Phys. Rev. Lett. 116, 024301 (2016).

[38] Коллинз, М. Ф., Петренко, О. А.: Треугольные антиферромагнетики. Can. J. Phys. 75, 605–655 (1997).

[39] Питанти, А., Ашурбеков, Н., деПедро-Эмбид, И., Мсалл, М., Сантос, П. В.: ГГц акустооптический угловой момент с настраиваемым топологическим зарядом. Nat. Commun. 16, 8116 (2025). DOI 10.1038/s41467-025-63362-w.

[40] Хладни, Э. Ф. Ф.: «Открытия в теории звука». Лейпциг: Weidmanns Erben und Reich, 1787.

[41] Россинг, Т. Д.: Закон Хладни для колеблющихся пластин. Am. J. Phys. 50 (3), 271–274 (1982).

[42] Фарадей, М.: Об особом классе акустических фигур; и об определённых формах, принимаемых группами частиц на вибрирующих упругих поверхностях. Phil. Trans. R. Soc. Lond. 121, 299–340 (1831). DOI 10.1098/rstl.1831.0018. Включая приложение о формах жидкостей на колеблющихся упругих поверхностях.

[43] Альхешибри, М., Цянь, Ц., Джеханнин, М., Крейг, В. С. Дж.: История нанопузырьков. Langmuir 32, 11086–11100 (2016).

[44] Nirmalkar, N., Pacek, A. W., Barigou, M.: О существовании и устойчивости объемных нанопузырьков. Langmuir (2018). DOI 10.1021/acs.langmuir.8b01163.

[45] Альхешибри, М. и др.: Влияние ультразвука на объемные и поверхностные нанопузырьки: обзор современного состояния. Ultrason. Sonochem. (2021).

[46] ISO 4120:2021 — Сенсорный анализ — Методология — Треугольный тест. Европейская адаптация EN ISO 4120:2021; заменяет издание 2007 года.

[47] Руэкрофт, Г., Хипкисс, Д., Ли, Т., Макстед, Н., Кейнс, П. В.: Сонокристаллизация: использование ультразвука для улучшения промышленной кристаллизации. Org. Process Res. Dev. 9 (6), 923–932 (2005). DOI 10.1021/op050109x.

[48] Кастильо-Пейнадо, Л. С., Луке де Кастро, М. Д.: Роль ультразвука в фармацевтическом производстве: сонокристаллизация. J. Pharm. Pharmacol. 68 (10), 1249–1267 (2016).

[49] Джоул, Дж. П.: О новом классе магнитных сил. Annals of Electricity, Magnetism, and Chemistry 8, 219–224 (1842).

[50] Виллари, Э.: Об изменениях магнитного момента, вызываемых тягой и прохождением гальванического тока в стальном или железном стержне. Annalen der Physik 202, 87–122 (1865).

[51] Поххаммер, Л.: О скоростях распространения малых колебаний в бесконечном изотропном круглом цилиндре. J. Reine Angew. Math. 81, 324–336 (1876).

[52] Чри, К.: Продольные колебания круглого стержня. Quart. J. Pure Appl. Math. 21, 287–298 (1886).

[53] Chree, C.: Уравнения изотропного упругого тела в полярных и цилиндрических координатах, их решения и применения. Trans. Cambridge Philos. Soc. 14, 250–309 (1889).

[54] Графф, К. Ф.: Волновое движение в упругих телах. Нью-Йорк: Dover, 1991.

[55] Рэлей, лорд: О волнах, распространяющихся вдоль плоской поверхности упругого тела. Proc. London Math. Soc. s1-17 (1), 4–11 (1885). DOI 10.1112/plms/s1-17.1.4.

[56] Джоул, Дж. П.: О влиянии магнетизма на размеры железных и стальных прутьев. London, Edinburgh and Dublin Philos. Mag. 30 (199), 76–87 (1847).

[57] Тобиас, С. А., Арнольд, Р. Н.: Влияние динамических несовершенств на колебания вращающихся дисков. Proc. Inst. Mech. Eng. 171, 669–690 (1957).

[58] IEC 61672-1:2013 — Электроакустика. Измерители уровня звука. Часть 1. Технические условия. Второе издание; отменяет и заменяет издание 2002 года.

[59] ISO 1999:2013 — Акустика. Оценка шумовой потери слуха. Третье издание, октябрь 2013 г.; заменяет ISO 1999:1990; последнее подтверждение в 2025 г.

[60] ISO 5349-1:2001 — Механические колебания. Измерение и оценка воздействия на человека вибрации, передаваемой через руки. Часть 1: Общие требования. Первое издание, май 2001 г.; в последний раз подтверждено в 2026 г.

[61] ISO 10068:2012 — Механические колебания и удары. Механическое сопротивление системы «кисть–рука» человека в точке привода. Второе издание, декабрь 2012 г.; подтверждено в 2023 г. Значения применимы к мужской системе «кисть–рука» в диапазоне от 10 до 500 Гц; для женщин их можно использовать в качестве ориентировочных.

[62] Nilsson, T., Wahlström, J., Burström, L.: Вибрация кисти и руки и риск сосудистых и неврологических заболеваний — систематический обзор и метаанализ. PLOS ONE 12 (7), e0180795 (2017). DOI 10.1371/journal.pone.0180795.

[63] ISO 2631-1:1997 — Механические колебания и удары. Оценка воздействия на человека вибрации всего тела. Часть 1. Общие требования. Второе издание, май 1997 г.; поправка 1 от 2010 г.; подтверждено в 2021 г. Стандарт по-прежнему публикуется, при этом ведётся его пересмотр и готовится замена ISO/DIS 2631-1.

[64] Международная ассоциация по радиационной защите, Международный комитет по неионизирующему излучению: Временные руководящие принципы по предельным значениям воздействия на человека воздушного ультразвука. Health Phys. 46 (4), 969–974 (1984). Предварительное рекомендательное руководство; формально не было заменено новыми пределами воздействия ICNIRP. Его научная основа и пробелы были повторно проанализированы в источнике [66].

[65] Министерство здравоохранения Канады: Руководство по безопасному использованию ультразвука, Часть II — Промышленное и коммерческое применение. Кодекс безопасности 24. Оттава, 1991. ISBN 0-660-13741-0; кат. № H46-2/90-158E.

[66] Международная комиссия по защите от неионизирующего излучения: Актуальность Временных руководящих принципов 1984 года по воздушному ультразвуку и пробелы в современных знаниях. Health Phys. 127 (2), 326–347 (2024). DOI 10.1097/HP.0000000000001800.

Кроме того, патенты US 6 397 676 B1, US 6 490 925 B2, US 6 675 651 B2, US 7 216 540 B2, US 7 637 159 B2, US 8 390 389 B2 и US 9 231 554 B2; для всех

из них был открыт полный текст или формула изобретения. Они приводятся в совокупности, поскольку в тексте не цитируются по отдельности.

P4 Неиспользуемые термины

Следующие термины не используются в документах N1, N2 и N3. Они приводятся вместе с обоснованием и названием, которое их заменяет. Старые материалы проекта, содержащие эти термины, остаются без изменений в качестве исторической записи.

Не используется	Причина	Вместо этого используется
harvest	совокупность двух катушек с плечом представляет собой трансформатор; выходная энергия равна входной энергии за вычетом потерь	коэффициент преобразования
квантовая запутанность между плечами	N1 не имеет экспериментальных доказательств или операционных критериев, подтверждающих наличие квантовой запутанности между плечами; наблюдаемое взаимное взаимодействие можно проверить с помощью классических методов механической и модальной связи.	фазовая синхронизация, модальная связь
спинтроника как интерфейс сознания	без подтверждения в литературе	спинтронные датчики как измерительные приборы
эфирные пульсации, тонкие потоки	без измеримого критерия	не используется
скалярная волна	свободные электромагнитные волны в вакууме являются поперечными; соответствующие эксперименты не были независимо повторены	скалярный потенциал, анаполярный режим, продольные компоненты ближнего поля
структурированная вода, память воды	не определяется, какая величина должна измениться и как это изменение будет доказано	величины согласно главе N1/11.6
биополе	без измеримого определения	конкретная измеряемая величина, например, импульсный отклик ткани на индуцированные вихревые токи

В отношении понятия «скалярная волна» необходимо провести разграничение. Исключительно отвергается значение продольной электромагнитной волны, распространяющейся в вакууме без электрической и магнитной составляющих. Скалярное поле как математический объект является полностью легитимным, используется в проекте и определено в главе N1/07.1.

P5 Протокол литературного поиска — таблица запросов

В таблицах приведены пятнадцать точных запросов в соответствии с главой N1/02.5, выполненных в отдельных базах данных. Колонка «Найденные» представляет собой количество записей, которые были найдены в базе данных. Столбец «Просмотрено» — это количество названий и аннотаций, которые были открыты; при большем количестве найденных записей он соответствует первой странице результатов. Столбец «Включено» — это количество записей, включенных в список в главе N1/02.5.

Включение в список регулируется двумя критериями. Строгий критерий требует наличия одного тела с тремя или более плечами, расположенными радиально вокруг оси, а более широкий критерий допускает наличие трёх или более плеч на общем основании в параллельном расположении. Системы из множества резонаторов, решетки, метаповерхности и фазированные антенные решетки не включаются.

IEEE Xplore, 24 августа 2026 г. Запросы, введенные с помощью Command Search в поле «All Metadata». Поиск выполнен программно; запросы 1, 3, 6 и 9 проверены вручную в веб-интерфейсе с идентичным результатом.

Протокол представляет собой поиск с определённым охватом, направленный на выявление непосредственно релевантных предыдущих решений; он не является систематическим обзором всей литературы. Поэтому выводы о состоянии знаний относятся исключительно к указанным базам данных, запросам, датам и объему просмотренных результатов.

№	Запрос	Находка	Просмотр	Зарег.	Примечание
1	«трёхзубый камертон»	0	0	0	Нет записей. При этом термин буквально используется в патенте US 6 397 676 B1; IEEE не индексирует патенты.
2	«three-tine tuning fork»	0	0	0	Нет записей.
3	«камертон Trident»	2	2	2	Трезубчатые пьезоэлектрические гироскопы, кварцевые и в

№	Запрос	Находка	Просмотр	Зарег.	Примечание
					масштабе MEMS. Плечи параллельны.
4	«многозубчатая камертонная вилка»	0	0	0	Нет записей.
5	«камертон» И «три зубца»	0	0	0	Нет записей.
6	«камертон» И «три плеча» И резонатор	0	0	0	Нет записей. Фраза «three arms» не встречается в метаданных работ, посвященных тризубам.
7	«threefold symmetry» AND «acoustic resonator»	0	0	0	Нет записей.
8	«C3 symmetry» AND резонатор AND акустический	0	0	0	Нет записей.
9	«degenerate modes» AND «tuning fork»	9	9	0	MEMS-гироскопы с вырожденной парой, системы масс и балок.
10	«mode splitting» AND «threefold symmetric» AND «resonator»	0	0	0	Нет записей.
11	«acoustic vortex» И пассивный И монолитный	0	0	0	Нет записей.
12	«acoustic vortex» AND «single transducer»	3	3	0	Акустические пинцеты и вихревые ловушки; вихрь создаётся фазовым полем.
13	«орбитальный угловой момент» И акустический И «геометрия резонатора»	0	0	0	Нет записей.
14	«near-field» AND «tuning fork» AND «pressure mapping»	0	0	0	Нет записей.
15	tetrahedral AND «acoustic resonator» AND geometry	0	0	0	Нет записей.

Архив журнала «Journal of the Acoustical Society of America», 24 августа 2026 г. Запросы отправлены через pubs.aip.org с ограничением на этот журнал. Начиная с четвёртого запроса, выполнение замедлилось из-за ограничения скорости со стороны сервера.

№	Запрос	Найти	През.	Зарег.	Примечание
1	«трёхзубый камертон»	0	0	0	Нет записей.
2	«трехзубчатый камертон»	1	1	1	Блоджетт, Макканн, Андерсон (2001). Единственная находка из с радиальным расположением плеч.
3	«трезубец-камертон»	2	2	2	Два абстракта с заседаний ASA, посвящённых трезубчатому гироскопу, группа Томикава.
4	«многозубчатый камертон»	0	0	0	Нет записей.
5	«камертон» И «три зубца»	1	1	0	Та же запись, что и в запросе 2; повторно не учитывается.
6	«tuning fork» AND «three arms» AND resonator	0	0	0	Нет записей.
7	«threefold symmetry» AND «acoustic resonator»	1	1	0	Резонанс полости, заполненной жидкостью; симметрия относится к модам оболочки.
8	«C3 symmetry» AND resonator AND acoustic	2	2	0	Фононные кристаллы и решетки типа графена; C3 — это симметрия решетки, а не тела.
9	«вырожденные моды» И «камертон»	0	0	0	Нет записей. Первый запуск вернул пустую страницу; проверено повторным запуском.
10	«mode splitting» AND «threefold symmetric» AND «resonator»	0	0	0	Нет записей.

№	Запрос	Найти	През.	Зарег.	Примечание
11	«acoustic vortex» И passive И monolithic	1	1	0	Обзорный текст о преобразователях; совпадение случайное.
12	«acoustic vortex» AND «single transducer»	3	3	0	Метаповерхности и акустические чёрные дыры; вихрь образуется путём изменения волновой поверхности.
13	«орбитальный угловой момент» И акустика И «геометрия резонатора»	0	0	0	Нет записей. Первый запуск вернул пустую страницу; проверено повторным запуском.
14	«near-field» AND «tuning fork» AND «pressure mapping»	0	0	0	Нет записей.
15	tetrahedral AND «acoustic resonator» AND geometry	34	20	0	Просмотрена первая страница. Шумопоглотители, микроперфорированные панели, резонаторы Гельмгольца. Слово «tetrahedral» относится к вычислительной сетке.

Scopus, 25 августа 2026 г. Запросы введены в поля «Название статьи», «Аннотация», «Ключевые слова». Доступ предоставлен Центром научно-технической информации Словакии.

№	Запрос	Найти	Просмотр	Рег.	Примечание
1	«трёхзубый камертон»	0	0	0	Нет записей.
2	«трехзубчатый камертон»	0	0	0	Нет записей. Scopus не индексирует приложения к заседаниям ASA, в которых приводится аннотация от 2001 года.
3	«trident tuning fork»	5	5	3	Три гироскопа «Trident», один из которых до сих

№	Запрос	Найти	Просмотр	Рег.	Примечание
					пор не обнаружен. Остальные два — датчики в форме камертона для атомно-силовой микроскопии.
4	«многозубчатый камертон»	0	0	0	Нет записей.
5	«камертон» И «три зубца»	0	0	0	Нет записей.
6	«камертон» И «три плеча» И резонатор	1	1	1	Вертикально установленный трезубчатый резонатор, 1999 г. Единственный результат по этому запросу во всех базах данных.
7	«threefold symmetry» AND «acoustic resonator»	0	0	0	Нет записей.
8	«C3 symmetry» AND резонатор AND акустический	0	0	0	Нет записей.
9	«degenerate modes» AND «tuning fork»	3	3	0	MEMS-гироскопы с вырожденной парой.
10	«mode splitting» AND «threefold- -symmetric» AND «resonator»	0	0	0	Нет записей.
11	«acoustic vortex» И пассивный И монолитный	0	0	0	Нет записей.
12	«acoustic vortex» AND «single transducer»	3	3	0	Акустические пинцеты и апертуры из метаматериалов.
13	«орбитальный угловой момент» И акустика И «геометрия резонатора»	0	0	0	Нет записей.

№	Запрос	Найти	Просмотр	Рег.	Примечание
14	«near-field» И «tuning fork» И «pressure mapping»	0	0	0	Нет записей.
15	тетраэдр И «акустический резонатор» И геометрия	0	0	0	Нет записей.

Записи первого прогона от 23 августа 2026 года по базам данных Google Scholar, Semantic Scholar, arXiv, Google Patents и Espacenet ведутся отдельно в рабочей документации проекта. База данных Web of Science не была просканирована по причинам, указанным в главе N1/02.5.

P6 История версий

В таблице приведены опубликованные версии данного документа. Рабочие концепции с обозначением v0.x в неё не включены, поскольку они не были доступны за пределами команды.

Обозначение версии имеет формат «основной.вторичный». Основной номер изменяется при внесении изменений в определения, нумерацию ссылок или структуру глав, то есть при изменениях, которые делают перекрёстные ссылки на предыдущее издание недействительными. Второстепенный номер изменяется при исправлениях и дополнениях, которые не затрагивают эти элементы. Дата указывается как день публикации файла на сайте www.triaural.com. Статус «Опубликовано» обозначает версию, действующую на момент записи, статус «Заменено» — версию, которую сменило более новое издание.

Версия	Дата выпуска	Статус	Описание изменений
1.0	03.09.2026	Опубликовано	Первая опубликованная версия документа. Создана на основе рабочих концепций v0.1–v0.50, которые не были доступны за пределами команды. Содержит определения, методологическую основу, протокол литературного поиска в соответствии с главой N1/02.5, исследовательское предложение, бюджетный анализ и приложения P1–P6.

Опубликованный файл после выпуска не переписывается. Ошибка, обнаруженная после выпуска, исправляется новым выпуском с записью в этой таблице, чтобы при каждом цитировании было ясно, о какой редакции идет речь.

ОТКРЫТОЕ ПРИГЛАШЕНИЕ

О ПОДДЕРЖКЕ ПРОЕКТА

TRIAURAL возник как независимая исследовательская инициатива и остается открытым для всех, кто чувствует, что имеет возможности и желание внести свой вклад в его реализацию.

Создание рабочей базы, изготовление точных образцов, измерительная техника и независимая валидация требуют ресурсов, которые превышают нынешние возможности проектной группы.

Вопросы поставлены. Следующий шаг — измерения.

ЕСЛИ ВЫ ВИДИТЕ ЦЕННОСТЬ В НАШЕЙ ВИЗИИ, ДВЕРИ ОТКРЫТЫ.

www.triaural.com | info@triaural.com

- TRIAURAL -

Документ был переведен со словацкого языка на русский с помощью автоматического переводчика DeepL.com.
Финальная языковая проверка и корректировка выполнены с помощью ChatGPT (OpenAI).

В случае возникновения неясностей или неточностей, пожалуйста, используйте оригинал документа на словацком языке, доступный по адресу www.triaural.com, для самостоятельного перевода.

Опубликовано: 03.09.2026
https://www.triaural.com