

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕХНИЧЕСКОЙ АКУСТИКИ

УДК 534.8.081.7

СОЗДАНИЕ ЗАГЛУШЕННОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ АЭРОАКУСТИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИССЛЕДОВАНИЕ ЕЕ АКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

© 2017 г. В. Ф. Копьев*, **, В. В. Пальчиковский*, И. В. Беляев*, **, Ю. В. Берсенев*,
С. Ю. Макашов**, И. В. Храпцов*, И. А. Корин*, Е. В. Сорокин*, О. Ю. Кустов*

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет
614990 Пермь, Комсомольский просп. 29

**ФГУП ЦАГИ, Научно-исследовательский Московский комплекс ЦАГИ
105005 Москва, ул. Радио 17

E-mail: vvpal@perm.ru

Поступила в редакцию 22.04.2016 г.

Представлены акустические характеристики новой заглушенной камеры Пермского национального исследовательского политехнического университета (ПНИПУ), предназначенной в том числе для измерения шума аэродинамических источников. Звукопоглощающие клинья, которыми облицованы стены камеры, исследованы в интерферометре с нормальным падением волн, и полученные для них результаты сравниваются с характеристиками звукопоглощающих клиньев существующих заглушенных установок. Проведенные метрологические испытания акустических характеристик заглушенной камеры ПНИПУ демонстрируют, что в ней реализуются условия свободного поля и обеспечивается возможность проведения количественных акустических экспериментов.

Ключевые слова: заглушенная камера, метрология, звукопоглощающие клинья, интерферометр, шум аэродинамических источников.

DOI: 10.7868/S032079191701004X

ВВЕДЕНИЕ

Шум на местности является одним из ключевых вопросов в оценке конкурентоспособности перспективных самолетов, что делает крайне актуальной проблему исследования механизмов генерации шума турбулентными потоками, так же как и разработку методов снижения создаваемого ими шума. Общепринятый подход к решению этих сложных проблем состоит в проведении экспериментальных исследований для маломасштабных моделей в лабораторных условиях, валидации результатов в крупномасштабных экспериментах и последующем переносе результатов на полномасштабные наземные или летные испытания.

Важное преимущество лабораторных испытаний состоит в том, что они позволяют проводить экспериментальные исследования в контролируемых условиях. В случае акустических измерений это означает, что экспериментальная установка должна обеспечивать (с определенной точностью) условия акустического свободного поля, когда звук от источника распространяется так же, как и в свободной атмосфере, не претерпевая от-

ражения от стен камеры. Такая экспериментальная установка называется заглушенной (безэховой).

В 2014–2015 гг. в Пермском национальном исследовательском политехническом университете (ПНИПУ) в рамках гранта Правительства РФ по постановлению № 220 была разработана и построена заглушенная установка для проведения экспериментальных исследований аэродинамических источников шума (турбулентных струй, вихревых колец, турбулентного следа при обтекании). Стоит отметить, что в России имеется только одна аналогичная действующая установка – заглушенная камера АК-2 Центрального аэрогидродинамического института (ЦАГИ), построенная в 1970-х гг. и позволяющая проводить эксперименты с маломасштабными моделями аэродинамических источников шума.

Создание новой аэроакустической установки позволяет восстановить отечественные компетенции в этой области, что особенно важно ввиду планов строительства в России заглушенной аэродинамической трубы АКТ ЦАГИ с горячим потоком воздуха для крупномасштабных аэроакустических экспериментов. В настоящий мо-



Рис. 1. Фотография заглушенной камеры ПНИПУ.

мент такие крупномасштабные эксперименты приходится проводить за рубежом [1].

В работе дается описание построенной заглушенной установки ПНИПУ, включая описание звукопоглощающего покрытия (акустических клиньев), использованного для облицовки стен заглушенной камеры. Затем приводятся результаты измерений коэффициента звукопоглощения этих клиньев в интерферометре с нормальным падением волн и выполняется сравнение полученных результатов с характеристиками клиньев существующих заглушенных установок ЦАГИ. Следующий раздел посвящен метрологическим исследованиям заглушенной камеры ПНИПУ, в которых проверяется реализация условий свободного поля внутри камеры. В заключительном разделе описываются установленные в заглушенной камере устройства для создания аэродинамических источников шума.

ОПИСАНИЕ ЗАГЛУШЕННОЙ КАМЕРЫ

Общие требования к заглушенным камерам сформулированы в ISO 3745 [2]. Специальные рекомендации для заглушенных камер, предназначенных для исследования шума турбулентной струи, можно найти в [3, 4]. Эти требования и рекомендации были приняты во внимание при разработке заглушенной установки в ПНИПУ.

Заглушенная камера (рис. 1) представляет собой хорошо шумо- и виброизолированное помещение, облицованное изнутри звукопоглощающим материалом, который обеспечивает погло-

щение звуковых волн, падающих от источника шума, расположенного внутри камеры, на стены, пол и потолок. В результате этого звуковые волны от исследуемого источника распространяются так же, как в свободной атмосфере при отсутствии отражающих поверхностей.

Одним из первых требований для образования свободного звукового поля в заглушенной камере согласно ISO 3745 [2] является обеспечение соответствующего объема камеры. Для проведения измерений в дальнейшем звуковом поле рекомендуется, чтобы объем камеры по меньшей мере в 200 раз превышал объем испытуемого объекта.

Более конкретные рекомендации, позволяющие определить минимально допустимые размеры заглушенной камеры в зависимости от максимального пространственного размера источника звука L_{\max} (в метрах), приведены в [5]:

- ширина = $3.4L_{\max} + 2$ м;
- длина = $3.74L_{\max} + 2.2$ м;
- высота = $3.75L_{\max} + 2$ м.

К этим величинам нужно прибавить толщину звукопоглощающих покрытий, которые устанавливаются на каждой стене заглушенной камеры.

Важно отметить, что приведенные выше рекомендации сформулированы для заглушенных камер, где источниками звука являются стационарно расположенные испытуемые машины. Аэроакустические исследования аэродинамических источников шума могут иметь дело с протяженными источниками, например, турбулентной струей, истекающей из сопла и уходящей в коллектор. Согласно

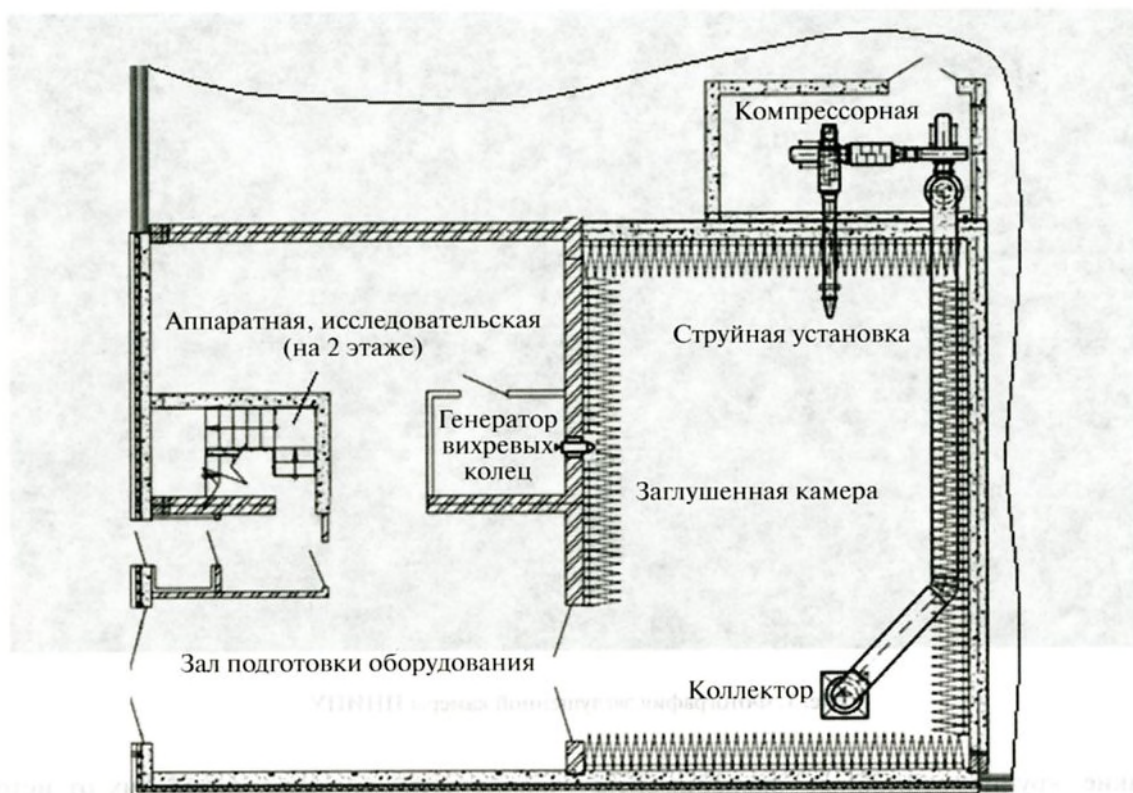


Рис. 2. Общая схема заглушенной установки ПНИПУ (вид сверху).

рекомендациям [3, 4], размеры заглушенной камеры для исследования акустических характеристик турбулентных струй следует выбирать, используя следующие соотношения: длина камеры $\geq 100D$; ширина камеры $\geq 55D$; высота камеры $\geq 45D$ (здесь D – диаметр сопла на срезе).

Построенная заглушенная камера (рис. 2) расположена в здании Аэрокосмического факультета ПНИПУ и имеет размеры: длину 11,8 м, ширину 8,2 м и высоту 5,3 м (расстояния указаны между стенами камеры). С учетом толщины звукопоглощающих покрытий такие размеры камеры позволяют проводить измерения шума струй с диаметром сопла до $D = 10$ см.

При создании акустических камер особое внимание должно уделяться обеспечению их защищенности от внешнего шума и вибраций. Местоположение заглушенной камеры ПНИПУ было выбрано таким образом, что три стены из четырех расположены внутри имеющегося большого помещения с капитальными стенами. Стена акустической камеры, являющаяся фасадной, сделана из газобетона толщиной 40 см, снаружи обложена утеплителем и закрыта профлистом. Тем самым обеспечивается необходимая звукоизоляция (не менее 58 дБ на частоте 1000 Гц) заглушенной камеры от источников постороннего шума (система подачи сжатого воздуха в камеру для создания тур-

булентной струи, проезжающий по улице транспорт и т.д.).

Для обеспечения условий свободного поля заглушенная камера облицована звукопоглощающими клиньями из базальтового супертонкого волокна (БСТВ) с плотностью 30 кг/м^3 (диаметр волокон не более 1–2 мкм с минимальным количеством неволоконистых включений) [6]. Клинь помещен в оболочку из акустически прозрачной стеклоткани Э1-100, его полная высота составляет 80 см, высота основания 10 см. Клинья из БСТВ собраны в блоки по пять штук (рис. 3) и вставлены в тонкий металлический каркас (диаметр проволоки 2 мм) для сохранения их геометрической формы.

Блоки снабжены крючками, которые позволяют крепить их к направляющим на потолке и стенах камеры, что облегчает установку и съем блоков клиньев, а также обеспечивает зазор между поверхностью стены и основанием клина; блоки размещены в шахматном порядке (см. рис. 1). Бетонный пол камеры либо также закрывается блоками клиньев, либо оставляется жестким (отражающим). В последнем случае камера называется полузаглушенной и реализует условия отражения звука от земли, которые имеют место, например, во время испытаний двигателя на открытом стенде. Такая конфигурация также позволяет прово-

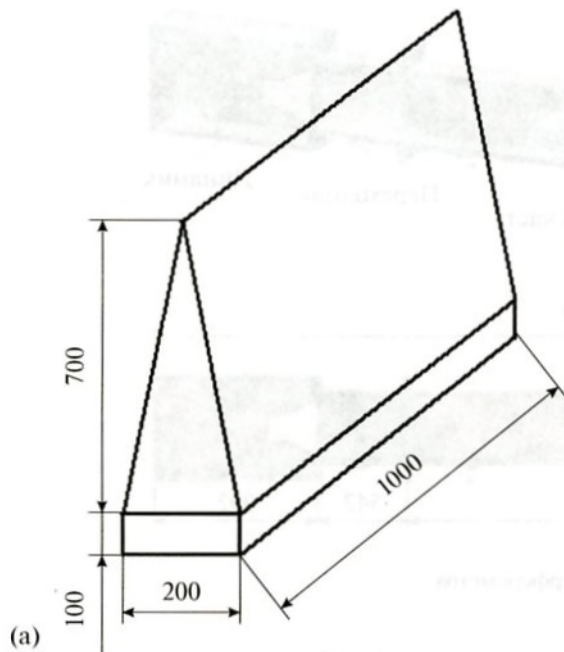


Рис. 3. (а) Геометрические параметры клина из БСТВ (размеры приведены в миллиметрах). (б) Фотография блока клиньев.

дить установку и испытания тяжелых образцов машин в камере. Для обеспечения условий свободного поля пол покрывается блоками клиньев, которые оборудованы колесиками для облегчения их перемещения вдоль камеры. Этот выбор убираемого покрытия пола обеспечивает легкий доступ к оборудованию во время испытаний в заглушенных условиях и делает установку более гибкой в целом.

При разработке заглушенной камеры было предусмотрено создание дополнительных помещений, необходимых для ее должного функционирования (рис. 2). Непосредственно перед входом в камеру расположен зал подготовки оборудования к экспериментальным исследованиям. Предусмотрена комната для работы с генератором вихревых колец, под размещение которого в стене заглушенной камеры сделано специальное окно. Создано отдельное помещение для компрессоров струйной установки. Площади первого этажа лаборатории также позволяют размещать другие установки, в частности интерферометр для испытаний клиньев. На втором этаже лаборатории расположена аппаратная.

Для завоза габаритного оборудования в камеру сделаны ворота размерами 3×2.5 м. Ворота имеют толщину 15 см и обиты с обеих сторон толстым металлическим листом. Площадь ворот внутри камеры полностью перекрывается передвижными стойками, к которым прикреплены блоки звукопоглощающего покрытия. Для обеспечения соединения находящихся в заглушенной камере измери-

тельных микрофонов и других приборов с аппаратурой в стене камеры проложены закрытые каналы, идущие в аппаратную.

Заглушенная установка должна отвечать существующим нормам по освещению, вентиляции, противопожарной безопасности и т.д. Освещение акустической камеры должно соответствовать санитарным нормам при работе с приборами. При этом требуется, чтобы устанавливаемые внутри камеры светильники не создавали дополнительных отражающих поверхностей, так что они должны быть достаточно компактными и их должно быть немного. Для освещения заглушенной камеры ПНИПУ используются 12 светильников ДСО 01-33-40, расположенных между клиньями на потолке камеры.

В акустических камерах должна быть предусмотрена приточно-вытяжная вентиляция с глушителями шума или естественная – через дверь и люки, расположенные в потолке камеры, которые во время испытаний закрываются специальными затворами. Для обеспечения вентиляции в заглушенной камере ПНИПУ предусмотрено крепление части блоков звукопоглощающего покрытия чуть ниже общего уровня, что создает зазоры между блоками, через которые обеспечивается вентилирование камеры.

Все стены камеры сделаны из негорючих материалов: кирпич, блоки газобетона. Базальтовое супертонкое волокно и оболочка клиньев из стеклоткани обладают отличными огнезащитными



Рис. 4. Схема интерферометра.

свойствами. Тем самым обеспечивается пожарная безопасность заглушенной камеры.

ИСПЫТАНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ КЛИНЬЕВ

В соответствии с ISO 3745 [2] акустические клинья, используемые для облицовки заглушенных камер, должны иметь коэффициент звукопоглощения $\alpha \geq 0.99$ в рабочем диапазоне звуковых частот. Для демонстрации этого в ПНИПУ разработана соответствующая экспериментальная установка — интерферометр с нормальным падением волн (рис. 4).

Установка состоит из динамика, переходника, центральной части и части под образец. Корпус интерферометра изготовлен из ламинированной фанеры толщиной 21 мм. Корпус динамика стыкуется с остальной установкой через прокладку из виброгасящего материала. Испытываемый образец (акустические клинья) поджимается тяжелым поршнем.

Канал установки имеет квадратное сечение размерами 40×40 см, расстояние от образца высотой 80 см до динамика составляет 3.824 м. Коэффициент звукопоглощения испытываемого образца вычисляется с помощью метода передаточной функции на основе измерений двумя микрофонами [7]. Рабочий диапазон частот установки определяется из условия распространения в канале только поршневых волн; для разработанного интерферометра он составляет 50–400 Гц. Рабочий диапазон по уровню акустического давления обусловлен возможностями используемого динамика и равен 70–120 дБ.

Аппаратная часть интерферометра состоит из двух дюймовых микрофонов свободного поля RFT MV102, анализатора спектра V&K 3160-A-042 4/2 ch

семейства LAN-XI, двухканального усилителя Kaifat PD1000 и персонального компьютера с программным обеспечением PULSE LabShop.

При исследовании звукопоглощающих клиньев для каждого варианта клиньев было проведено от двух до пяти испытаний. Испытания проводились в разные дни, при этом повторяемость экспериментов была хорошей: в диапазоне частот 50–100 Гц коэффициент звукопоглощения α изменялся не более чем на 0.07; в диапазоне 100–150 Гц не более чем на 0.02; для более высоких частот наблюдалось полное совпадение результатов измерений. Перед каждым испытанием проводилась калибровка микрофонов. Представленные ниже результаты экспериментов усреднены по количеству испытаний.

Работоспособность построенного интерферометра была проверена по измерениям клиньев заглушенной камеры АК-2 ЦАГИ (рис. 5). Клинья АК-2 выполнены в виде проволочного каркаса, обтянутого чехлом из капроновой ткани АГТ. С целью усиления противопожарных свойств облицовки каркас клина дополнительно обтянут чехлом из стеклоткани. Клин набивается капроновым волокном плотностью 80–90 кг/м³. Полная высота клиньев 60 см, высота основания 15 см, ширина основания 20 × 20 см. Ориентация клиньев в канале интерферометра показана на рис. 5а. На рис. 5б приведено сравнение результатов измерений коэффициента отражения β ($\beta = \sqrt{1 - \alpha}$) клиньев АК-2 на интерферометре ПНИПУ с известными характеристиками этих клиньев. Видно, что результаты измерений демонстрируют хорошее совпадение друг с другом.

Далее в интерферометре были проведены испытания клиньев из БСТВ с металлическим кар-

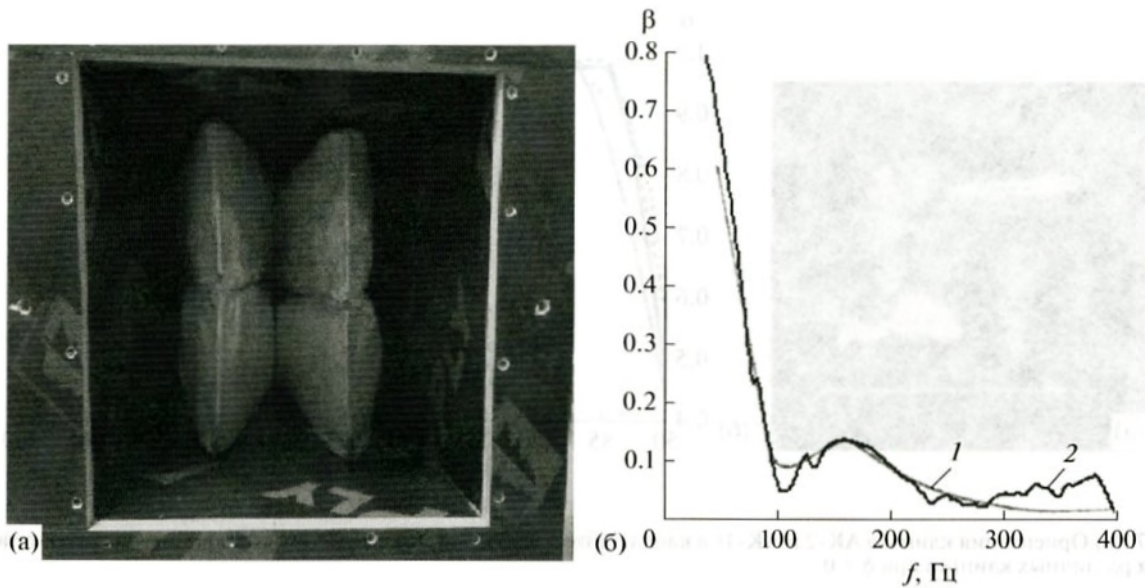


Рис. 5. (а) Установка клиньев в канале интерферометра, (б) сравнение коэффициента отражения клиньев АК-2: 1 – метод стоячих волн (ЦАГИ, 1975 г.); 2 – метод передаточной функции (ПНИПУ, 2014 г.).

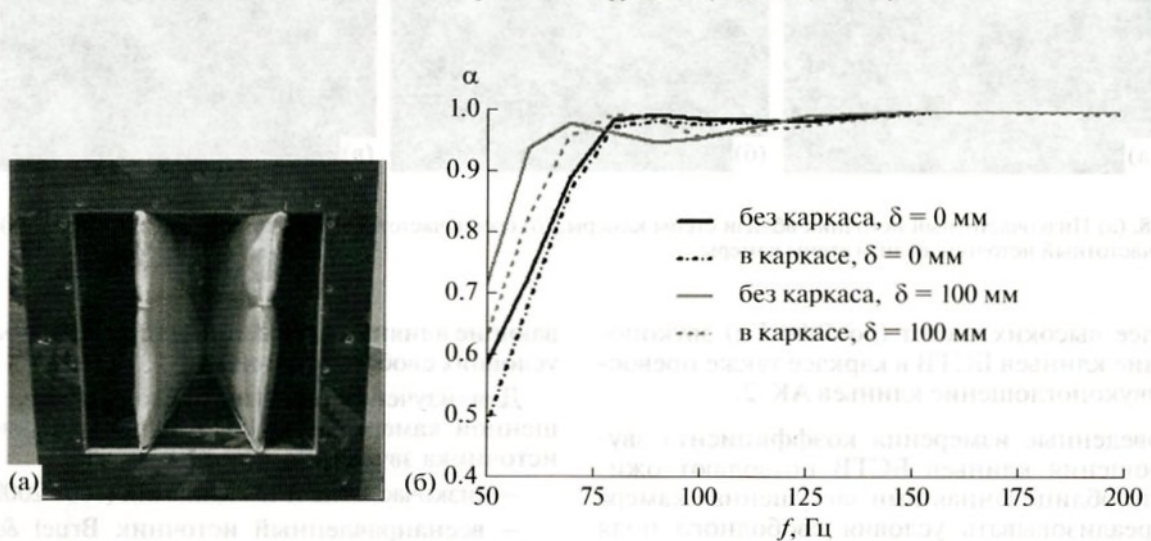


Рис. 6. (а) Клинья БСТВ в каркасе, установленные в канале интерферометра, (б) коэффициент звукопоглощения клиньев БСТВ в каркасе и без него для разных величин воздушного зазора δ .

касом и без него. Как уже отмечалось выше, при облицовке заглушенной камеры ПНИПУ клинья устанавливаются таким образом, что между поверхностью стены и клином имеется воздушный зазор δ . Соответственно, на рис. 6б представлены результаты испытаний клиньев БСТВ для различных величин воздушного зазора δ между клином и поршнем. Эти измерения показывают, что хотя наличие каркаса и приводит к некоторому ухудшению звукопоглощения в области низких частот, клинья из БСТВ удовлетворяют требованиям ISO 3745 [2] для частот выше 150 Гц.

На рис. 7 приведено сравнение результатов измерений в интерферометре ПНИПУ клиньев БСТВ и клиньев заглушенных камер АК-2 и АК-11 ЦАГИ. Ориентация клиньев АК-11 (полная высота клина 80 см, высота основания 20 см, ширина основания 20×20 см) в канале интерферометра показана на рис. 7а и соответствует ориентации этих клиньев при облицовке стен заглушенной камеры. Видно, что в большей части рассмотренного частотного диапазона звукопоглощение клиньев БСТВ превышает звукопоглощение клиньев АК-11 и АК-2. Сравнительные испытания в реверберационных камерах ЦАГИ [6] показали, что в обла-

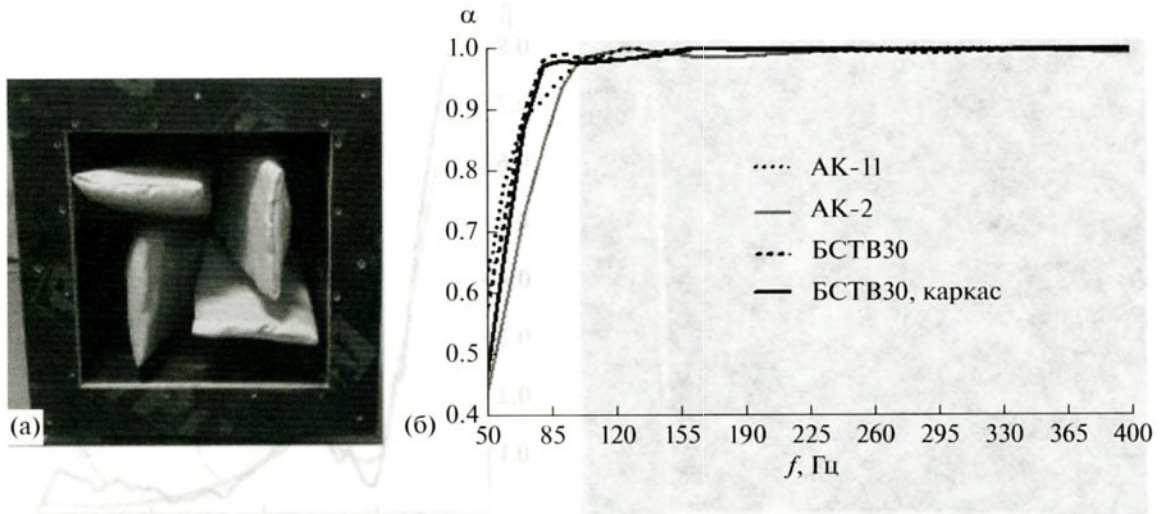


Рис. 7. (а) Ориентация клиньев АК-2 и АК-11 в канале интерферометра, (б) сравнение коэффициента звукопоглощения α различных клиньев при $\delta = 0$.



Рис. 8. (а) Низкочастотный источник вблизи стены камеры, (б) среднечастотный источник в центре камеры, (в) высокочастотный источник вблизи стены камеры.

сти более высоких частот (до 5000 Гц) звукопоглощение клиньев БСТВ в каркасе также превосходит звукопоглощение клиньев АК-2.

Проведенные измерения коэффициента звукопоглощения клиньев БСТВ позволяют ожидать, что облицованная ими заглушенная камера будет реализовывать условия свободного поля для частот выше 150 Гц. Тем не менее, окончательные выводы о характеристиках заглушенной установки требуют проведения метрологического исследования согласно стандарту ISO 3745 [2].

ИССЛЕДОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАГЛУШЕННОЙ КАМЕРЫ

Цель метрологических исследований заглушенной камеры состоит в определении максимально допустимого радиуса между источником звука и точкой измерений, где выполняется, в рамках определенной точности, обратноквадратичная зависимость убывания уровня звука от расстояния. Этот радиус определяет область в заглушенной камере, где могут проводиться количественные акустические измерения, не испыты-

вающие влияния отражений от стен камеры, т.е. в условиях свободного поля.

Для изучения акустического качества заглушенной камеры в ПНИПУ использовались три источника звука (рис. 8):

- низкочастотный 15"-динамик (100–2000 Гц);
- всенаправленный источник Bruel & Kjaer 4295 (низкие и средние частоты 125–5000 Гц);
- высокочастотный источник на основе драйвера JBL Selenium D408 Ti (5000–20000 Гц).

С этими источниками были проведены два типа экспериментов (рис. 9). В первом случае (конфигурация 1) источник (динамик) размещался в центре заглушенной камеры, что соответствует обычным испытаниям акустических характеристик образцов машин. Во втором случае (конфигурация 2) источник был расположен вблизи стены, в области ожидаемого источника шума турбулентной струи, которая будет присутствовать в камере. В обеих конфигурациях измерения выполнялись для трех радиальных направлений — 0° , 45° и 90° от источника.

Во время этих испытаний возможные отражающие поверхности камеры (такие как сопло струи, сопло генератора вихревых колец, коллек-

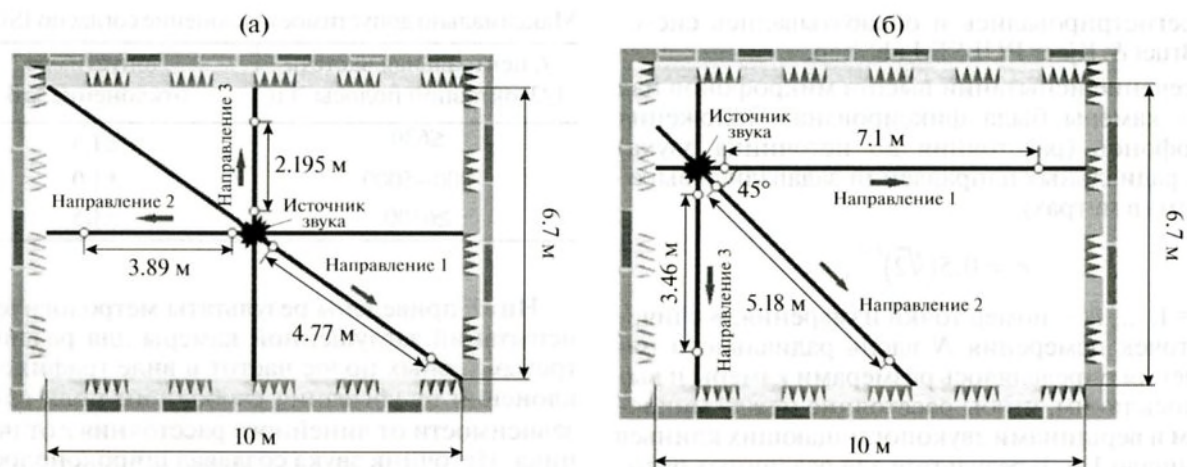


Рис. 9. Схема метрологических испытаний (вид сверху): (а) конфигурация 1, (б) конфигурация 2.

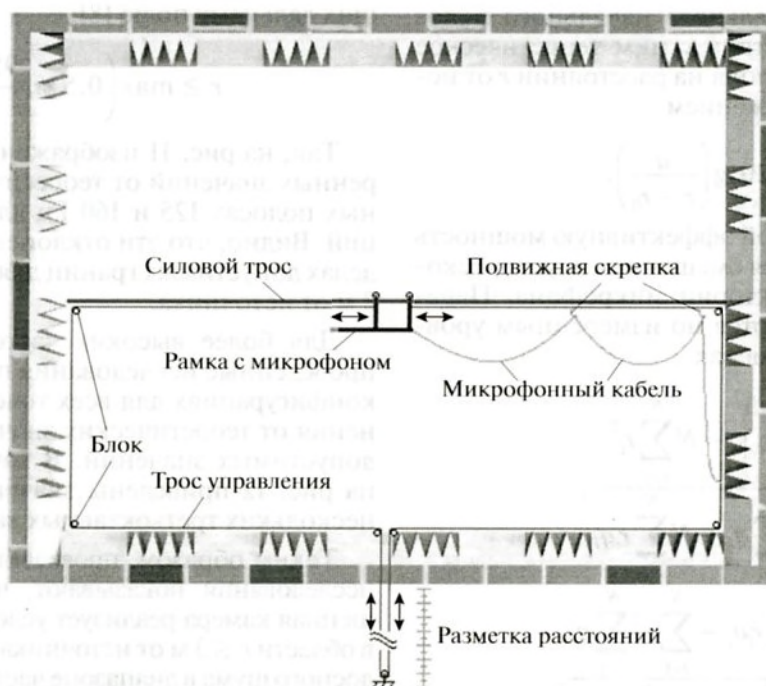


Рис. 10. Принципиальная схема системы позиционирования микрофонов.

тор и т.д.) были закрыты звукопоглощающими клиньями; такая конфигурация соответствует измерениям в заглушенных камерах без потока.

Акустические данные были получены с помощью микрофонов, движущихся с дискретным шагом вдоль указанных направлений, для чего в камере была смонтирована специальная траверсная система (рис. 10), обеспечивающая точность установки микрофонов ± 0.5 см. В течение регистрации данных (30 с) микрофоны были неподвижны. После прохождения всех измерительных

точек источник звука менялся и измерения повторялись.

Измерения проводились с помощью четырех микрофонов ($\frac{1}{4}$ " Bruel & Kjaer 4961), соединенных с анализатором Bruel & Kjaer LAN-XI 3055-B-120. Три из этих микрофонов двигались вдоль радиальных направлений, тогда как один был размещен в фиксированной точке и служил базовым сигналом для проверки стабильности работы источника во время проведения испытаний. Дан-

ные регистрировались и обрабатывались системой Brüel & Kjær PULSE LabShop.

В течение испытаний высота микрофонов над полом камеры была фиксирована. Положения микрофонов (расстояния до источника звука) вдоль радиальных направлений задавались выражением (в метрах)

$$r_i = 0.5(\sqrt[4]{2})^{i-1},$$

где $i = 1, \dots, N$ – номер точки измерения. Количество точек измерения N вдоль радиального направления определялось размерами камеры и выбиралось таким, чтобы расстояние между микрофоном и вершинами звукопоглощающих клиньев превышало 1 м. В результате для различных радиальных направлений величина N составляла от 8 до 16 точек.

Отклонения измеренных значений от обратноквадратичной зависимости вычислялись с помощью метода оптимального начального положения [8]. В соответствии с ним теоретическое убывание свободного поля на расстоянии r от источника задается выражением

$$L_p(r) = 20 \lg \left(\frac{a}{r - r_0} \right),$$

где a представляет собой эффективную мощность источника, а r_0 является смещением акустического центра вдоль траектории микрофона. Параметры a и r_0 вычисляются по измеренным уровням звукового давления как

$$a = \frac{\left(\sum_{i=1}^N r_i \right)^2 - N \sum_{i=1}^N r_i^2}{\sum_{i=1}^N r_i \sum_{i=1}^N q_i - N \sum_{i=1}^N r_i q_i},$$

$$r_0 = \frac{\sum_{i=1}^N r_i \sum_{i=1}^N r_i q_i - \sum_{i=1}^N r_i^2 \sum_{i=1}^N q_i}{\sum_{i=1}^N r_i \sum_{i=1}^N q_i - N \sum_{i=1}^N r_i q_i}.$$

Здесь $q_i = 10^{-0.05L_{pi}}$, L_{pi} – уровень звукового давления на расстоянии r_i от источника. Отклонение (в децибелах) между измеренным и теоретическим уровнями на расстоянии r_i тогда определяется как

$$\Delta L_{pi} = L_{pi} - L_p(r_i).$$

Максимально допустимое отклонение измеренных уровней звукового давления от теоретического значения, рассчитанного по обратноквадратичной зависимости, для заглушенной камеры со звукопоглощающим полом представлено в таблице.

Максимально допустимое отклонение согласно ISO 3745

f , центральная частота 1/3-октавной полосы, Гц	Допустимое отклонение, дБ
≤ 630	± 1.5
800–5000	± 1.0
≥ 6300	± 1.5

Ниже приведены результаты метрологических испытаний заглушенной камеры для различных третьоктавных полос частот в виде графиков отклонения от убывания свободного поля (ΔL_{pi}) в зависимости от линейного расстояния r от источника. Источник звука создавал широкополосный шум в соответствующей полосе частот.

Так как обратноквадратичное убывание наблюдается в дальнем акустическом поле, результаты приводятся для расстояний r , соответствующих дальнему полю [8]:

$$r \geq \max \left(0.5 \text{ м}, \frac{95 \text{ м/Гц}}{f} \right).$$

Так, на рис. 11 изображены отклонения измеренных значений от теоретических в третьоктавных полосах 125 и 160 Гц для обеих конфигураций. Видно, что эти отклонения находятся в пределах допустимых границ для расстояний меньше 3 м от источника.

Для более высоких частот (200 Гц–20 кГц) проведенные исследования показали, что в обеих конфигурациях для всех точек измерения отклонения от теоретических значений не превышают допустимых значений. В качестве иллюстрации на рис. 12 приведены значения отклонений для нескольких третьоктавных частот.

Таким образом, проведенные метрологические исследования показывают, что созданная заглушенная камера реализует условия свободного поля в области $r \leq 3$ м от источника звука для широкополосного шума в диапазоне частот 125 Гц–20 кГц при условии, что микрофоны располагаются на расстоянии не менее 1 м от вершин звукопоглощающих клиньев.

УСТРОЙСТВА ДЛЯ СОЗДАНИЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ ШУМА

Проведенные метрологические испытания заглушенной камеры демонстрируют, что в ней можно проводить количественные аэроакустические эксперименты. Для реализации данных исследований камера снабжена системой подачи воздуха, позволяющей создавать турбулентные струи со скоростью до 200 м/с при диаметре сопла 6 см, а также генератором вихревых колец для со-

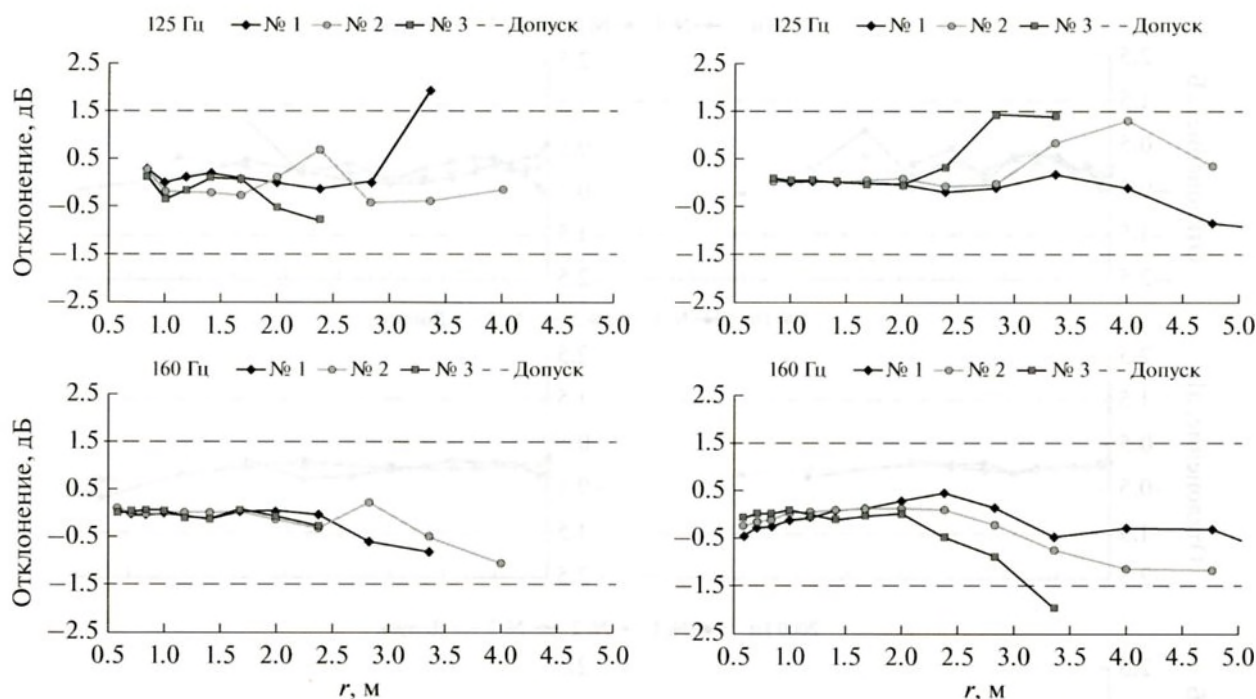


Рис. 11. Отклонения от свободного поля в зависимости от линейного расстояния от источника в третьоктавных полосах частот 125 и 160 Гц: конфигурация 1 (слева), конфигурация 2 (справа).

здания вихревых колец с высокой начальной скоростью (порядка 30 м/с) и числами Рейнольдса, равными 10^5 .

Для создания турбулентных струй подача воздуха в камеру и его отвод выполняются двумя вентиляторами типа ВЦ 6-20-8 с двигателями АИР200L2 мощностью 45 кВт каждый, включенными последовательно. Вентиляторы управляются из аппаратной через преобразователи частоты, позволяющие плавно регулировать расход воздуха. Воздуховоды данной системы проложены так, чтобы обеспечить минимально возможные гидравлические потери (минимальная длина и минимальное количество поворотов). Структурная схема установки представлена на рис. 13.

Отвод воздуха из камеры выполняется через коллектор, расположенный на потолке, по оси струи на наибольшем удалении от сопла (рис. 2). Коллектор встроен между блоками звукопоглощающих клиньев на потолке так, чтобы он не выступал за линию вершин клиньев. Внутренняя поверхность коллектора облицована звукопоглощающим материалом для снижения эффекта отражения звука.

Во избежание образования стоячих волн в воздуховоде, непосредственно после коллектора установлен глушитель типа ГТК 560-900 (рис. 13, позиция 2). Перед вентилятором 1 также установлен глушитель типа ГТК 560-900, переоборудованный в кольцевой глушитель вставкой центрального тела с

облицовкой звукопоглощающим материалом толщиной 100 мм типа Эковер Лайт универсал. Звукопоглощающий материал защищен от выдувания металлическим листом с высокой степенью перфорации. Во избежание возникновения эффекта биения для частот следования лопаток вентиляторов, за первым вентилятором ставится глушитель ГТК 315-900 (рис. 1, позиция 6). После второго вентилятора установлен также глушитель типа ГТК 315-900, но с увеличенной толщиной стенок и центральным телом, облицованным звукопоглощающим материалом.

Акустические измерения шума турбулентных струй проводятся в соответствии с имеющимися рекомендациями по размещению микрофонов в дальнем поле [3, 4]. Заглушенная камера позволяет исследовать азимутальную структуру шума турбулентных струй [9] и эффект экранирования шума струи [10] в покоящейся безграничной среде.

Кроме струйной установки заглушенная камера оснащена уникальным оборудованием по созданию вихревых колец — генератором вихревых колец (рис. 2). Вихревое кольцо создается путем импульсного выталкивания поршня порции газа через сопло генератора. Далее происходит отрыв образовавшейся вихревой структуры и ее перемещение в пространстве вдоль оси, совпадающей с осью поршня. Поршень приводится в движение ударом тяжелого молота по штоку поршня.

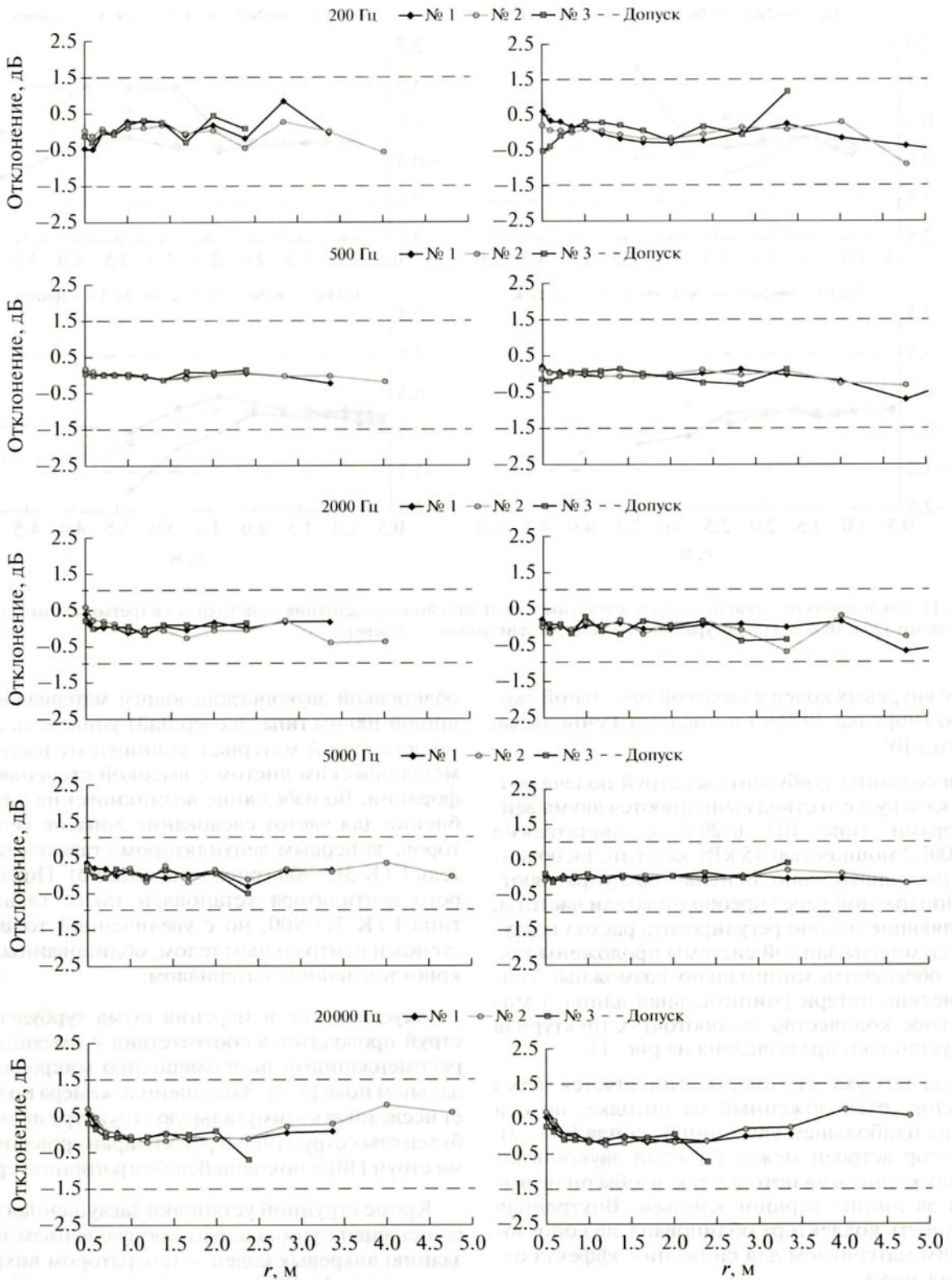


Рис. 12. Отклонения от свободного поля в зависимости от линейного расстояния от источника в третьоктавных полосах частот 200 Гц–20 кГц: конфигурация 1 (слева), конфигурация 2 (справа).

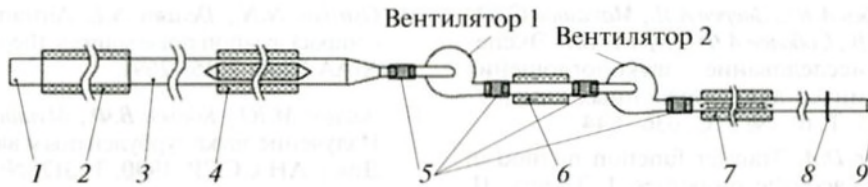


Рис. 13. Схема системы подачи-отвода струи: 1 – вход через коллектор; 2 – глушитель; 3 – воздуховод; 4 – кольцевой глушитель; 5 – гибкая вставка; 6 – глушитель; 7 – кольцевой глушитель; 8 – фланец; 9 – сопло.

При экспериментальном исследовании шума вихревого кольца важнейшим требованием является выделение собственно шума вихревого кольца на фоне шума помех, таких как структурный шум установки генерации вихрей, отражение звука от твердых поверхностей и т.д. Для выполнения этой задачи генератор вихревых колец расположен в специальном помещении (рис. 2), что позволяет существенно снизить шум от запуска генератора. Акустические измерения шума вихревых колец в дальнем поле проводятся аналогично работе [11] с помощью микрофонов, расположенных на заданном расстоянии от оси движения вихревого кольца. Для запуска измерительной системы используется триггерный микрофон, расположенный в плоскости сопла генератора и вырабатывающий сигнал для запуска системы регистрации шума в момент выхода кольца из сопла генератора. Для регистрации отклонения траектории полета вихря от оси генератора используется прямоугольный экран размером 2×1 м из тонкой проволоки с наклеенными шелковинками, установленный на расстоянии 5 м от среза сопла так, чтобы центр экрана находился на оси генератора. При пролете вихревого кольца через экран шелковинки отклоняются, делая видимым положение кольца, что позволяет отобрать для исследования только вихревые кольца, попадающие в центр экрана. Исходя из представления источников в виде суперпозиции излучения базисных мультиполей [12], данная экспериментальная установка позволит в явном виде изучить мультипольную структуру такого сложного источника шума, как турбулентное вихревое кольцо [11, 13].

Стоит отметить, что созданная заглушенная камера обеспечивает возможность одновременного создания вихревых колец и турбулентной струи, что позволит получить новые данные для моделирования шума турбулентных течений в корреляционной теории [14].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Работа описывает заглушенную установку, построенную в ПНИПУ в 2014–2015 гг. с целью исследования шума турбулентных струй, вихревых колец и шума обтекания. Исследования в интерферометре с нормальным падением волн звуко-

поглощающих клиньев, которыми облицованы стены камеры, показали, что их коэффициент звукопоглощения превышает 0.99 для частот выше 150 Гц, а сами клинья демонстрируют характеристики, не уступающие клиньям существующих заглушенных установок АК-2 и АК-11 ЦАГИ. Приведенные результаты метрологических испытаний заглушенной камеры ПНИПУ демонстрируют, что заглушенная установка в ПНИПУ реализует условия свободного поля. Радиус области, где наблюдается обратноквадратичная зависимость убывания, равен 3 м для широкополосного шума в частотном диапазоне 125 Гц–20 кГц при условии, что микрофоны находятся на расстоянии по крайней мере 1 м от вершин клиньев. Данные результаты показывают, что заглушенная установка ПНИПУ позволяет проводить аэроакустические измерения для получения количественных результатов.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Правительства РФ по постановлению № 220 “О мерах по привлечению ведущих ученых в российские образовательные учреждения высшего профессионального образования” по договору № 14.Z50.31.0032. Авторы выражают благодарность А.Б. Бутзову (ООО “РУС “КОРДА”) за предоставление образцов клиньев из БСТВ для проведения экспериментов в интерферометре.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беляев И.В., Зайцев М.Ю., Конев В.Ф. Исследование шума обтекания крупномасштабной модели крыла с механизацией // Акуст. журн. 2016. Т. 62. № 1. С. 95–105.
2. ISO, ISO 3745, Acoustics – Determination of sound power levels of noise sources – Precision methods for anechoic and semi-anechoic rooms. International Organization for Standardization. Geneva, Switzerland, 2003.
3. Мунин А.Г. Авиационная акустика. Часть 1. М.: Машиностроение, 1986. 244 с.
4. Ahuja K.K. Designing clean jet-noise facilities and making accurate jet-noise measurements // Int. J. Aeroacoustics. 2003. V. 2. № 3–4. P. 371–412.
5. Методические указания по расчету и проектированию акустических камер для измерения шумовых характеристик машин от 28.07.1978 г. Научно-исследовательский институт строительной физики Госстроя СССР.

6. *Беляев И.В., Голубев А.Ю., Зверев А.А., Макашов С.Ю., Пальчиковский В.В., Соболев А.Ф., Черных В.В.* Экспериментальное исследование звукопоглощения акустических клиньев для заглушенных камер // Акуст. журн. 2015. Т. 61. № 5. С. 636–644.
7. *Chung J.Y., Blaser D.A.* Transfer function method of measuring in-duct acoustic properties. I. Theory. II. Experiment // J. Acoust. Soc. Am. 1980. V. 68. № 3. P. 907–921.
8. *Cunefare K.A., Biesel V.B., Tran J., Rye R., Graf A., Holdhusen M., Albanese A.M.* Anechoic chamber qualification: Traverse method, inverse square law analysis method, and nature of test signal // J. Acoust. Soc. Am. 2003. V. 113. P. 881–892.
9. *Копьев В.Ф., Фараносов Г.А.* Обобщение метода азимутальной декомпозиции звукового поля компактного источника на случай измерений вблизи жесткой поверхности // Акуст. журн. 2015. Т. 61. № 1. С. 65–68.
10. *Ostrikov N.N., Denisov S.L.* Airframe shielding of non-compact aviation noise sources: theory and experiment // AIAA Paper 2015–2691.
11. *Зайцев М.Ю., Копьев В.Ф., Мушин А.Г., Поточкин А.А.* Излучение звука турбулентным вихревым кольцом // Докл. АН СССР. 1990. Т. 312. № 5. С. 1080–1083
12. *Бобровницкий Ю.И.* Физическая модель и характеристики ближнего поля мультиполя // Акуст. журн. 1998. Т. 44. № 1. С. 11–20.
13. *Зайцев М.Ю., Копьев В.Ф., Котова А.Н.* Представление звукового поля турбулентного вихревого кольца суперпозицией квадрупольей // Акуст. журн. 2001. Т. 47. № 6. С. 793–801.
14. *Копьев В.Ф., Чернышев С.А.* Новая корреляционная модель каскада турбулентных пульсаций как источника шума в турбулентных струях // Акуст. журн. 2012. Т. 58. № 4. С. 482–497.