

## РАЗВИТИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ТУРБУЛЕНТНЫХ ПРИСТЕНОЧНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ ДАВЛЕНИЯ. КРИТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И ОБОБЩЕНИЕ НАКОПЛЕННЫХ ОПЫТНЫХ ДАННЫХ

© 2021 г. Е. Б. Кудашев<sup>а</sup>, \*, Л. Р. Яблоник<sup>б</sup>, \*\*

<sup>а</sup>Институт космических исследований РАН, ул. Профсоюзная 84/32, Москва, 117997 Россия

<sup>б</sup>Научно-производственное объединение по исследованию и проектированию энергетического оборудования им. И.И. Ползунова, ул. Атаманская 3/6, Санкт-Петербург, 191167 Россия

\*e-mail: kudashev@iki.rssi.ru

\*\*e-mail: yablonik@gmail.com

Поступила в редакцию 18.05.2021 г.

После доработки 19.07.2021 г.

Принята к публикации 03.08.2021 г.

Представлен обзор современного состояния экспериментальных исследований пристеночных турбулентных давлений. За прошедшие десятилетия выполнено огромное количество прикладных, теоретических и экспериментальных исследований пристеночных турбулентных давлений, составляющих важную часть акустики турбулентных потоков. Представленные данные измерений пристеночных турбулентных давлений показывают, что основной массив накопленных данных относится к характеристикам турбулентных пульсаций давления под турбулентным пограничным слоем. Наряду с анализом опытных данных (частотные спектры, среднеквадратичные значения), специальное внимание уделено методическим аспектам экспериментальных исследований. В приложениях значительная часть линейных задач возбуждения шума и вибраций конструкций при турбулентном обтекании особенно эффективно может быть проанализирована и решена при частотно-волновом задании гидроаэродинамической пульсационной нагрузки. Отмеченные факторы стимулировали повышенное внимание к частотно-волновому спектру пристеночных турбулентных давлений, не ослабевающее на протяжении последних десятилетий. Все большее распространение стали получать экспериментальные исследования частотно-волновых спектров турбулентных давлений на основе цифровой обработки сигналов. Подробно анализируются прямые методы измерений частотно-волнового спектра пристеночных турбулентных давлений. Обсуждаются результаты экспериментальных исследований частотно-волнового спектра.

*Ключевые слова:* турбулентные пристеночные пульсации давления, частотный спектр, прямые измерения частотно-волнового спектра

DOI: 10.31857/S0320791921060034

### 1. ВВЕДЕНИЕ

За прошедшие несколько десятилетий выполнено огромное количество прикладных, теоретических и экспериментальных исследований пристеночных турбулентных давлений, представляющих собой один из главных источников шума и вибраций, порождаемых взаимодействием потоков с обтекаемыми граничными элементами разнообразных аппаратов и устройств. Количество публикаций по этой тематике исчисляется сотнями, основные результаты большинства из них представлены в относительно недавних монографиях [1–5]. Текущий интерес к вопросам аэрогидродинамического шумообразования и возбуждения вибраций продемонстрирован также последними

конференциями Flinovia (Flow Induced Noise and Vibration Issues and Aspects) [6, 7].

При всем внимании к отмеченной области исследований, материалы, относящиеся непосредственно к экспериментам, условиям их проведения, существующим при проведении опытов проблемам и способам их преодоления, оказались в какой-то мере “растворенными” в общем информационном объеме опубликованных результатов.

В настоящем обзоре предпринята попытка представить соответствующие материалы в концентрированном виде и проанализировать их с позиций сегодняшнего дня. Наряду с анализом опытных данных как таковых, специальное вни-

мание уделено методическим аспектам опубликованных экспериментальных исследований. Основной массив накопленных данных относится к характеристикам пульсаций давления под турбулентным пограничным слоем. Именно эти результаты рассматриваются в данной работе. Иные случаи — струйного и отрывного обтекания — нашли отражение в книгах [3, 5].

## 2. СРЕДНЕКВАДРАТИЧНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ И ЧАСТОТНЫЙ СПЕКТР ПРИСТЕНОЧНЫХ ТУРБУЛЕНТНЫХ ДАВЛЕНИЙ

Первые измерения пульсаций давления на стенке под турбулентными пограничными слоями в аэродинамической трубе [8] и на крыле самолета [9] были опубликованы в 1956 г. В [8] было получено, что среднеквадратичные величины пристеночных пульсаций давления составляют примерно 0.0035 от динамического напора внешнего потока, а в [9] — что это отношение уменьшается с увеличением скорости, становясь постоянным и равным 0.0013 при значениях числа Маха выше 0.5. Позднее в обзоре [10] было отмечено, что использованные в [8] приемники, устанавливаемые в плоскости стенки (*flush transducers*), имели относительно большие по сравнению с характерным масштабом турбулентности размеры, что в общем случае приводит к заниженной оценке измеряемого среднеквадратичного давления. С другой стороны, примененные в [8] преобразователи имели большой резонансный пик на частоте 6 кГц, что в итоге привело к завышению среднеквадратичных пульсаций давления в 2–3 раза. Таким образом, уже первые опыты показали важность методических аспектов при экспериментальных оценках параметров турбулентных давлений.

Последующие два десятилетия экспериментальных исследований, направленных на установление основных частотных и пространственных свойств пристеночных турбулентных давлений в пограничных слоях, выявили целый ряд факторов, в той или иной степени препятствующих корректному представлению измеряемых параметров. В своем обзоре 1975 г. [10] Willmarth выделяет следующие проблемы:

а) Проблема неадекватного пространственного разрешения встроенным преобразователем (*flush transducer*), размеры приемной поверхности которого оказываются больше энергонесущих волновых компонент поля турбулентных давлений. Попытки внесения соответствующей коррекции начались с появления работы Коркоса [11]. Необходимость получения достаточного уровня регистрируемого сигнала ограничивает минимальный размер приемника, который может использоваться при измерениях.

б) Для повышения пространственного разрешения используются измерения через точечные отверстия (*pinholes*), за которыми размещаются чувствительные микрофоны. Недостаточность сведений о взаимодействии пульсирующего течения в микроотверстии со средним потоком и с мелкомасштабными структурами в пограничном слое при таких измерениях также вносит неопределенность в результаты экспериментов.

в) Эффект “ложных” сигналов, который в той или иной мере всегда присутствует при измерениях. Данный эффект связывается с вибрациями, колебаниями температуры, звуком и электронными шумами. Отмечается, что все измерения, выполненные к моменту написания обзора в аэродинамических трубах, искажены неустраняемым акустическим шумом оборудования на низких частотах.

Автор обзора отмечает возможность влияния различных неучитываемых факторов не только на корректность измерений, но и на сами измеряемые параметры турбулентных давлений. Предположено, что помимо шероховатости стенки и продольного градиента давлений на эти параметры способны влиять местоположение переходной зоны и механизм формирования турбулентного пограничного слоя, турбулентность свободного потока, звуковые и вибрационные поля. Различия в неучитываемых, но существенных внешних факторах может, по представлениям автора, быть одной из причин расхождения экспериментальных результатов, полученных в разных лабораториях. Выражается надежда, что понимание ответов на данные вопросы будет достигнуто в ходе последующих исследований.

Дальнейшие двадцать лет исследований характеризуются интенсивным ростом количества экспериментальных работ, среди которых заметное место заняли исследования отечественных ученых Б.М. Ефимцова и А.В. Смольякова [12–15]. В обзорной статье 1996 г. [16] Bull, обсуждая результаты сорокалетнего периода исследований турбулентных пристеночных давлений, обращает внимание на сохранившиеся методические проблемы измерений, прежде всего связанные непосредственно с работой приемников различных типов. Главное внимание уделяется высокочастотной зоне спектра, в значительной мере определяющей интегральные среднеквадратичные значения пульсаций.

При анализе подчеркивается многообразие типов приемников, используемых при измерениях турбулентных давлений. В их числе использованные автором схемы:

(i) конденсаторного микрофона, установленного в полости за приемным “точечным” (диаметром 0.75 мм) отверстием (*pinhole*);

(ii) пьезоэлектрического преобразователя, установленного в полости за точечным отверстием;

(iii) пьезоэлектрического преобразователя, установленного за отверстием, но без полости;

(iv) пьезоэлектрического преобразователя, установленного за отверстием (без полости), но с залитым силиконовым наполнителем каналом для восстановления непрерывной граничной поверхности;

(v) пьезоэлектрического преобразователя, установленного заподлицо (*flush-mounted*) с граничной поверхностью.

Результаты представленных в [16] измерений различных авторов демонстрируют значительный разброс. Одна из установленных причин такого разброса – погрешность, обусловленная формированием локальных возмущений в зоне приемного отверстия.

Автор обзора подчеркивает, что существуют несоответствия и аномалии в экспериментальных значениях  $p'/\tau_w$ , которые все еще нуждаются в объяснении. Поскольку использование схемы с микроотверстием имеет определенные преимущества в части обеспечения высокой пространственной разрешающей способности при достаточном уровне измеряемого сигнала, формулируются два важных вопроса. Первый вопрос: увеличивается ли частота, начиная с которой рассматриваемые ошибки становятся значимыми, при уменьшении диаметра микроотверстия? Вторым вопросом заключается в том, стремятся ли сами ошибки к нулю по мере уменьшения диаметра отверстия; другими словами, приближаются ли измеренные с микроотверстием среднеквадратичные значения турбулентных давлений к тем, что были бы зарегистрированы установленным заподлицо приемником при стремлении характерного диаметра последнего к нулю?

В ряду опубликованных после обзора [16] работ отметим статью [17], содержащую как подробные результаты исследований статистических характеристик турбулентных параметров в пограничном слое, так и оценки требований к приемникам, измеряющим пристеночные пульсации давлений. Для исследования применялись схемы приемников с микроотверстиями, обозначенные в [16] как (i), (ii) и (iii), см. выше. Выполненный авторами анализ привел их к следующей формулировке требований к использованию такой схемы:

(1) диаметр  $d$  точечного отверстия должен быть достаточно небольшим по сравнению с вязким масштабом длины  $\nu/U_\tau$ , так, чтобы выполнялось условие

$$d^+ = dU_\tau/\nu < 20;$$

(2) протяженность  $l$  канала, передающего пульсационное давление на преобразователь (микрофонный или пьезоэлектрический), должна удовлетворять условию  $l/d \geq 2$ ;

(3) эффект резонанса Гельмгольца, который может проявиться в конфигурации “канал–полость”, должен быть устранен, либо пик резонансной частоты следует переместить в нерегистрируемый высокочастотный диапазон;

(4) необходима коррекция фонового шума, особенно для потоков с низкими числами Рейнольдса.

Соответственно, используется схема, в которой 1/4-дюймовый микрофон монтируется в полости, свободный объем которой минимален. Диаметр отверстия  $d$  равен 0.3 мм, его длина  $l = 1$  мм. Значение параметра  $d^+$  в зависимости от режима испытаний менялось в диапазоне от 4.6 до 20.7. Приемники проходили калибровку в акустическом поле (без потока), в результате чего определялись подлежащие цифровой компенсации амплитудные и фазовые искажения, обусловленные динамическими процессами в системе канал–полость. Низкочастотное (ниже 100 Гц) шумовое загрязнение исключалось с помощью оценки по среднему от произведения сигналов двух разнесенных приемников, практически некоррелированных по турбулентным пульсациям.

Измерения использовались, в частности, для определения интегральных среднеквадратичных значений пульсаций пристеночного давления. Результаты включают также данные предшествующих исследований, причем отобраны лишь измерения с относительным диаметром микроотверстия  $d^+ < 30$ . Кроме того, приведены данные прямого численного моделирования (DNS).

Отмечается, что разброс данных (значительно меньший, чем представленный в обзоре [16]) зависит от формы представления результатов. Данный факт, по нашему мнению, может быть объяснен отсутствием подобия исследованных пограничных слоев, т.е. тем, что одинаковым числом Рейнольдса в представленных измерениях соответствовали разные соотношения между внутренними и внешними параметрами. Другая возможная причина – неконтролируемое в ряде экспериментов влияние резонансных явлений в воздушном измерительном тракте между входным отверстием и чувствительной поверхностью преобразователя, которое зависит от дополнительного параметра – скорости звука.

Измерительные схемы приемников с микроотверстиями нашли применение в современных расчетно-экспериментальных исследованиях волновых спектров, т.к. последние требуют предельно близкого расположения точек отбора. Подробный экспериментальный анализ работы таких

схем приведен в публикации [18]. Исследовались схемы с различными микрофонами, устанавливаемыми как заподлицо, так и за микроотверстиями различных диаметров. В последнем варианте микрофоны устанавливались как непосредственно за отверстием, так и удаленно с помощью 15-сантиметровой алюминиевой трубки, к открытому концу которой для ослабления акустических резонансов подсоединялась дополнительная силиконовая трубка длиной 4 м. Сравнительные испытания приемников с различными диаметрами отверстий от 0.5 до 2 мм выполнялись как в специальной акустической камере (калибровка сравнением с микрофоном), так и непосредственно в аэродинамической трубе. Продемонстрированные результаты показывают заметное различие данных этих испытаний, что объясняется, по-видимому, как разницей в пространственной разрешающей способности, так и определенным влиянием взаимодействия потока с отверстиями. Измерения частотного спектра различными приемниками демонстрируют значительные различия даже с учетом калибровочной коррекции. Особо следует отметить неравномерность частотной характеристики удаленного приемника, вызванную колебаниями воздуха в измерительном канале.

В докладе [19] представлена аналогичная информация по применению приемников с микроотверстиями. Схемы установки приемников и данные по частотным характеристикам удаленно расположенных микрофонов немногим отличаются от представленных в работе [18]. Хотя авторы [19] и проводят тщательную калибровку этих приемников в условиях покоящейся окружающей среды, они признают, что фактические показатели в рабочих условиях существенно зависят от скорости потока. Для соответствующей корректировки частотной характеристики предлагается использование эмпирического соотношения, параметры и степень достоверности которого остаются неопределенными.

Видимо, в значительной мере проблемы с использованием удаленного размещения микрофонов привели авторов [20] к схеме, использующей установку малогабаритного преобразователя Knowles FG-23329-C05 непосредственно за каналом диаметром 0.5 мм и длиной 2 мм. При этом, по информации [20], даже такая конфигурация требует калибровки на месте для корректировки амплитудной модуляции и фазовой задержки в системе канал–полость.

Встроенные заподлицо с обтекаемой поверхностью (*flush-mounted*) приемники вследствие относительной простоты использования остаются весьма распространенным, а при подводных исследованиях – практически единственным средством преобразования пристеночных турбулент-

ных давлений в регистрируемые электрические сигналы. Наряду с известным эффектом пространственного осреднения, внимание исследователей последнее время было привлечено к проблеме искажения измеряемого спектра из-за смещения плоскости встроенного приемника относительно поверхности обтекания. В работах [21, 22] предложены эмпирические соотношения, уточняющие известную модель [11], а также выполнен комплекс экспериментов по определению влияния смещения при скоростях воздушного потока от 20 до 40 м/с. Использовались преобразователи Kulite XT-140M-5PSI с диаметром приемной поверхности 2.54 мм. Измерения частотных спектров пристеночных давлений проводились при смещениях относительно стенки от  $-0.2$  до  $+0.2$  мм с шагом 0.1 мм.

Измеренные спектральные искажения, вызванные смещением сенсора, характеризуются тремя основными свойствами. Во-первых, искажение увеличивается с ростом скорости. Во-вторых, наибольшие искажения наблюдаются на низких частотах. В-третьих, отрицательное смещение (заглубление) датчика увеличивает спектральные уровни на средних частотах, тогда как при положительном смещении (выступании) среднечастотные уровни снижаются. Сформулированные свойства согласуются с данными [23], полученными в результате летных и лабораторных измерений при числах Маха от 0.58 до 2.0.

Полученные результаты, дополненные исследованиями со ступенчатыми уступами перед сенсорами (которые можно, в частности, трактовать как имитацию влияния смещений соседних приемников) показывают, что в безградиентном потоке смещение датчика или ступенька могут повлиять на спектр пристеночного давления, если их высота достигает 0.05% от толщины пограничного слоя. При этом важными факторами влияния оказываются скорость трения и формпараметр пограничного слоя.

К настоящему времени наиболее признанной эмпирической зависимостью, характеризующей частотный спектр пристеночных турбулентных давлений  $\Phi_{pp}(\omega)$  в безградиентном пограничном слое, является соотношение Goody [24]

$$\Phi_{pp}(\omega) = \frac{(\rho U_{\tau}^2)^2 \delta}{U} \times \frac{3(\omega\delta/U)^2}{\left[ (\omega\delta/U)^{0.75} + 0.5 \right]^{3.7} + \left[ (1.1R_T^{-0.57})\omega\delta/U \right]^7};$$

$$R_T = \frac{U_{\tau}^2 \delta}{U \nu}.$$

Здесь  $\delta$  – толщина пограничного слоя;  $U$  – скорость потока на его внешней границе. Главное достоинство этого соотношения состоит в удач-

ном использовании “смешанного” числа Рейнольдса  $R_T$ , позволившем адекватно представить в относительно простой форме усиление роли внутренних параметров пограничного слоя с ростом частоты.

Последующие экспериментальные исследования частотных спектров [25–30] выполнялись главным образом применительно к пограничным слоям с градиентом давления. Все предлагаемые в них эмпирические зависимости оттачиваются от соотношения Goody и почти все (кроме [28]) используют в качестве одного из параметров величину  $R_T$ . Согласно [30], возможности применения разработанных до 2018 г. эмпирических моделей связаны с определенными ограничениями. Так, модели [24] и [28] хорошо работают для безградиентных потоков, но модель [24] дает существенно заниженные оценки при положительных градиентах давления. Модели [25] и [26] лучше других подходят для обтекания профилей, однако эти модели неточно отражают тренды в потоках с отличными условиями и частотами. Модель [27] приводит к существенно заниженным оценкам для всех протестированных в [30] случаев. Только модель [28] хорошо согласуется с данными представленных авторами этой модели испытаний, в которых для формирования положительных и отрицательных градиентов давления использовался поворотный профиль.

Следует отметить, что в работе [29] автор предложил модификацию своей модели [28], в которой все же используется параметр  $R_T$ . Кроме того, результаты последних исследований [22] показали, что выбор локальных параметров, соотношение между которыми зависит от истории развития градиентного пограничного слоя, заметно влияет на степень универсальности соответствующих эмпирических моделей.

Растущее количество публикаций различных исследователей и частота их появления свидетельствуют о том, что работы в данной области находятся в стадии интенсивного развития.

Необходимо отдельно отметить, что динамическое взаимодействие турбулентного потока со стенкой характеризуется не только пульсационным давлением, являющимся главным объектом настоящего обзора, но и флуктуациями пристеночного касательного напряжения. Среднеквадратичные значения этого параметра, составляющие около  $0.4\tau_w$  [31, 32], почти на порядок ниже соответствующих показателей турбулентных давлений. Тем не менее, результаты теоретических [33, 34], экспериментальных [35–37] и расчетных [38] работ показывают, что пристеночные пульсации трения играют значимую роль в процессах генерации звука пограничным слоем. Одно из последних исследований пристеночных пульсаций касательного напряжения, представляющее, в

частности, состояние вопроса в целом, опубликовано в [39].

### 3. “ПРЯМЫЕ” ИЗМЕРЕНИЯ ЧАСТОТНО-ВОЛНОВОГО СПЕКТРА

Решение экспериментальной задачи прямых измерений исторически тесно связано с созданием аналитических моделей частотно-волнового спектра турбулентных давлений. Эти модели с одной стороны способствуют ясной физической трактовке экспериментальных данных, а с другой – дают возможность предварительной расчетной оценки эффективности применяемых экспериментальных методик и оборудования. Исходные модельные представления базируются на схемах Коркоса [11] и Чейза [40]. Первая из них характеризуется ромбовидными контурами постоянных значений волнового спектра в плоскости координат волнового вектора и простотой в пространственно-волновых преобразованиях. Во второй схеме контуры постоянных значений представляют собой эллипсы; соответствующие зависимости в целом лучше соответствуют результатам исследований. Последующее совершенствование моделей частотно-волнового спектра (ЧВС) было направлено, главным образом, на их сближение с имеющимися экспериментальными данными и расчетными результатами при сохранении максимально возможного удобства практического применения. Процесс модернизации и создания новых моделей, на который заметное влияние оказали работы [13, 15, 41], продолжается и поныне [42–46]. В одной из последних публикаций в этой области [45] предлагается новое относительно простое “эллиптическое” представление частотно-волнового спектра.

Традиционный подход к прямым измерениям частотно-волнового спектра состоит в построении встроенных в обтекаемую поверхность волновых фильтров, избирательным образом реагирующих на определенные значения волнового вектора поля пристеночных турбулентных пульсаций давления. Один из основных подходов к реализации таких фильтров состоит в формировании линейных антенн (решеток), состоящих из равномерно расположенных одинаковых приемников пульсаций давления. Сигналы приемников суммируются с заданным фазовым сдвигом (временной задержкой), практически равным, как правило, либо нулю (простое суммирование), либо  $\pi$  (последовательно противоположное подключение). Волновые характеристики таких фильтров, подробно рассмотренных в [3], также зависят от направленности антенны, шага установки и решающей способности единичных приемников, определяемых формой и размером их чувствительной поверхности.

Первые результаты применения фильтров-решеток, которые можно здесь трактовать как аналоговые антенны, были представлены в работе [47]. В ходе опытов в аэродинамической трубе использовалась решетка из четырех дюймовых микрофонов (эффективный диаметр чувствительной поверхности 0.8 дюйма), установленных с зазором 1.06 дюйма. Измерения проводились как с простым суммированием, так и с последовательно противоположным подключением сигналов. При анализе учитывалось распределение локальной чувствительности по приемной поверхности микрофона. Проведены калибровочные испытания решетки в поле звуковой волны. Отмечается полезность применения таких антенн для исследований поля пристеночных турбулентных давлений в длинноволновой области. При этом для исключения фактора посторонних акустических шумов рекомендовано использование противоположного подключения микрофонов.

Один из недостатков использованной в [47] схемы состоит в фактическом несоответствии параметров, определяющих волновые свойства антенны (продольная по потоку координата волнового вектора) и единичного микрофона (модуль волнового вектора). В связи с этим, в работе [48] были выполнены измерения турбулентных пристеночных давлений с помощью антенн, состоящих из приемников с чувствительной поверхностью прямоугольной формы. Испытания проведены с четырьмя типоразмерами приемников, для которых продольный размер чувствительной поверхности составил 14, 20, 30 и 42 мм, а поперечный размер был одинаков и составил 15 мм. Отношение шага приемников к их продольному размеру было одинаковым и равным 1.5. Применено последовательно противоположное подключение приемников. Ввиду многополосности волновой характеристики антенны, для определения значений частотно-волнового спектра потребовалось предварительное использование модельных представлений.

В итоге, анализ опыта использования аналоговых антенн при измерениях пристеночных турбулентных давлений приводит к выводу о существенной ограниченности области их применения, что косвенно подтверждается немногочисленностью соответствующих публикаций.

По-видимому, первые данные о волновом фильтре, реализованном путем контроля вибраций встроенной в стенку канала тонкой упругой пластины, представлены в [49]. Приведена информация об измерениях модовой вибрации тонкой стальной пластины, возбуждаемой турбулентными колебаниями давления пограничного слоя в воздухе. Считается, что эта вибрация вызвана Фурье-компонентами турбулентного давления, которые имеют ту же фазовую скорость,

что и волны изгиба в пластине. Эта скорость меньше скорости звука, но намного выше скорости потока. Исходя из измеренной вибрации, делаются выводы о параметрах частотно-волнового спектра пульсаций давления под турбулентным пограничным слоем в длинноволновой зоне.

Аналогичные опыты проводились авторами [50] с мембраной, встроенной в стенку аэродинамической трубы. Рабочий участок мембраны представлял собой прямоугольную полосу протяженностью 550 мм вдоль потока и 51 мм в поперечном направлении. Толщина мембраны — 0.216 мм. Собственные частоты и формы поперечных колебаний мембраны оценивались предварительным расчетом, а затем уточнялись экспериментально путем акустического возбуждения и наблюдения фигур Хладни. Экспериментально оценивались также показатель демпфирования колебаний мембраны. Рабочий отклик мембраны на возбуждение турбулентным потоком регистрировался с помощью оптических измерений. Характерные скорости распространения поперечных волн в мембране находились в диапазоне 110–134 м/с, тогда как рабочие скорости потока составляли 29–50 м/с. Таким образом, измерения проводились в длинноволновом субконвективном диапазоне, см. [5].

В результате были получены оценки ЧВС для продольных волновых векторов. Форма соответствующих зависимостей в целом близка к данным работы [49], однако фактические значения оказались примерно на 10 дБ выше. Причина такого расхождения осталась неизвестной.

В работе [51] волновая фильтрация в субконвективной зоне осуществлялась в воздушном потоке с помощью контроля поперечных колебаний упругих пластин, также имеющих форму прямоугольной полоски. Протяженность пластин составила здесь 150 мм вдоль потока и 10 мм в поперечном направлении. Использовались пластины из алюминиевого сплава толщиной 0.75–4.85 мм, а также из оргстекла толщиной 2.35–6.1 мм. Осуществлялось предварительное подавление коротковолновых компонент поля турбулентных давлений за счет установки защитной сетки перед пластиной. Измерения колебаний проводились с помощью перемещаемого по пластине виброприемника массой 0.6 г. По информации автора, полученные в результате измерений уровни ЧВС в исследованном субконвективном диапазоне волновых чисел примерно соответствуют уровням, полученным в [50].

Вибрационные измерения также применяются как основа исследований длинноволновых компонент поля турбулентных давлений в работе [52]. Испытания проведены при акустическом возбуждении и в воздушном потоке при скорости 40 м/с; для контроля поля скоростей использова-

лась система цифровой трассерной визуализации PIV (*Particle image velocimetry*). Определялись вибрации прямоугольной стеклянной панели размером  $0.46 \times 0.25$  м и толщиной 3 мм, установленной за турбулизирующим ступенчатым выступом высотой 30 мм. Измерения выполнялись с помощью 13 акселерометров, распределенных по поверхности панели на расстоянии 40 мм друг от друга. С помощью сменной панели и удаленного микрофона посредством микроотверстия диаметром 1.3 мм измерялся также частотный спектр пристеночных давлений. Собственно метод основан на рассмотрении конечно-разностной схемы уравнения поперечных колебаний пластины, при котором давления определяются по перемещениям 13 точек. Данная техника не нуждается в знании граничных условий. В работе показано, что предлагаемая процедура осуществляет длинноволновую фильтрацию поля турбулентных давлений. Вопросы использования метода применительно к морским, авиационным и автомобильным приложениям рассмотрены в [53]. Работы [52, 53] достаточно ярко демонстрируют новые современные возможности, связанные, прежде всего, с развитием цифровых методов анализа.

Развитие цифровых методов и технологий существенно повлияло на подходы, используемые при “прямых” измерениях частотно-волнового спектра турбулентных давлений. Все большее распространение стали получать исследования, основанные на обработке дискретных данных, получаемых от массива распределенных по поверхности обтекания приемников, которые рассматриваются как точечные. Такие массивы приемников, как и прежде, часто называют антеннами. Антенны такого рода, в отличие от рассмотренных ранее аналоговых, будем считать дискретными.

Одна из первых попыток использования пространственного дискретного анализа поля пристеночных турбулентных давлений в пограничном слое представлена в [54]. Исследовались двумерные характеристики волнового распределения энергии пульсаций на разных частотах. Измерения осуществлялись при обтекании в водной среде при скоростях 10–15 м/с. Волновая фильтрация осуществлялась двумя квадратными антеннами, состоящими из 121 ( $11 \times 11$ ) гидрофона каждая. Гидрофоны диаметром 0.375 дюйма, заключенные в виброизолированный полиуретановый обтекатель, в каждой из антенн размещались по квадратной сетке на расстояниях друг от друга, составляющих 12.7 мм в малой антенне и 65 мм в большой. В ходе измерений все 242 выходных сигнала датчиков были одновременно оцифрованы и записаны. Затем при анализе были выполнены три быстрых преобразования Фурье (БПФ) для данных из каждой антенны — один во временной области на каждом выходе датчика, а затем два по пространственным координатам. Ре-

зультаты проиллюстрированы контурами постоянных значений измеренного частотно-волнового спектра на плоскости координат волнового вектора. При этом данные измерений малой антенной отчетливо демонстрируют форму конвективного гребня, тогда как результаты, полученные с использованием большой антенны, ясно указывают на доминирование звуковой компоненты в области малых волновых чисел. По всей вероятности, данная работа впервые допустила возможность такого наглядного представления экспериментальных результатов измерений ЧВС.

Численный анализ использовался также при обработке опытов [55] в заполненном водой заглушенном канале (поперечное сечение  $305 \times 109$  мм). Эксперименты проводились с линейной антенной из 48 приемников, расположенных равномерно с шагом 4.22 мм в направлении потока. Каждый приемник состоял из небольшого заполненного воздухом полого пьезокерамического (цирконат-титанат свинца) цилиндра с внешним диаметром 2.54 мм и длиной 8.64 мм. Каждый цилиндр имел небольшие заглушки из оксидной смолы. Номинальная чувствительность и емкость составляли 221.3 дБ//1 В/мкПа и 1800 пФ соответственно. Датчики были заключены в полиуретановую оболочку и установлены на пластине из нержавеющей стали толщиной 5.08 см таким образом, чтобы главная ось цилиндра датчика была перпендикулярна направлению потока, а один конец цилиндра был заподлицо со стенкой. Эффективный диаметр датчика составляет 3.81 мм, что соответствует диаметру отверстий, в которых были установлены датчики. Основная реакция пьезоэлектрического цилиндра — радиальная деформация. Давление, действующее на конец цилиндра, передается через полиуретан на цилиндр. В первую очередь датчик реагирует на давление со стороны обтекаемой части цилиндра. В результате измерений определялись значения продольного частотно-волнового спектра, представляющего собой интеграл от двумерного ЧВС по волновой координате, перпендикулярной направлению потока. Продольный ЧВС определялся как Фурье-преобразование от взаимных спектров, измеренных для различных пар приемников, входящих в состав антенны. В принципиальном плане и сам такой подход [55], и его результаты, не внесли, на наш взгляд, принципиальной новизны в методы и представления корреляционного анализа, развитые еще в начале 70-х годов, см. [3]. Однако сама идея возрождения этого подхода, теперь уже на цифровом уровне, оказалась востребованной и использовалась в дальнейших исследованиях волнового спектра пристеночных турбулентных давлений.

Заметным событием стала публикация работ [56, 57], в которых для исследования поля пристеночных турбулентных давлений в аэродинамиче-

ской трубе была применена круглая поворотная платформа, по диаметру которой располагались 63 приемных отверстия, подсоединенных посредством металлических и виниловых трубок к отдаленным четвертьдюймовым микрофонам Brüel & Kjær, тип 4935. Из них 39 приемников в центральной части платформы имели диаметр 0.7 мм с шагом 2 мм. Далее с шагом 4 мм следовали 18 ( $2 \times 9$ ) приемников диаметром 2 мм, каждый из которых был закрыт перфорированной крышкой с тремя отверстиями диаметром 0.5 мм. На внешней части платформы с шагом 8 мм размещались еще 6 ( $2 \times 3$ ) отверстий диаметром 5 мм, каждое из которых было закрыто крышкой с девятью отверстиями диаметром 0.5 мм. Отметим, что авторы не обосновывают выбор такой сложной системы разноразмерных приемников, не нашедшей, впрочем, применения в последующих исследованиях.

Опыты проводились при 63 углах установки платформы, отличающихся примерно на  $2.9^\circ$ . При каждой установке производилась одновременная запись сигналов с микрофонов. Частотно-волновой спектр определялся по всему массиву взаимных спектров, определяемых для каждого угла поворота, с весовой функцией, учитывающей радиальные координаты коррелируемых точек. Расчетная схема обработки результатов прошла апробацию с использованием модели Коркоса [4]. Несмотря на определенные сложности, связанные, в частности, с пространственной неоднородностью исследованного поля давлений, полученные результаты продемонстрировали новые возможности примененного подхода, который, несомненно, повлиял на дальнейшее развитие экспериментальных исследований в данной области.

В работах [19, 58] та же установка, что и в [56, 57], в несколько модернизированном виде использовалась для исследования волнового спектра пристеночных давлений в пограничном слое с положительным градиентом давления. Авторы сообщают об оптимизации распределения микрофонов (общее их количество сохранилось) и некотором увеличении диаметра поворотного диска. Методика обработки данных при этом осталась практически неизменной. Результаты опубликованных исследований представлены как предварительные.

В статье [18] предлагается использование поворотной платформы со спиральным распределением приемников, состоящим из 6 веток. Основная идея состоит в возможности уменьшения таким образом радиального расстояния между приемниками. При испытаниях в аэродинамической трубе использовался 61 приемник, данные по которым представлены выше в разделе 2. Поворотный диск с рабочим диаметром около 24 см устанавливался в 60 позициях, различающихся углом установки на 6 градусов. При каждом угле

поворота определяются взаимные спектры всех пар приемников. Для оценки волнового спектра все взаимные спектры сводятся в один вектор, а затем производится алгебраическое преобразование Фурье, в котором, в отличие от [56], отсутствуют весовые коэффициенты, приближающие это преобразование к интегральному. Результаты опытов не выглядят убедительными, что авторы объясняют, в частности, наличием посторонних шумов.

В работе [20] рассматривается задача оптимизации распределения 64 приемников (представленных выше в разделе 2) по поверхности вращающейся платформы. Цель – минимизация количества поворотов платформы и времени сбора данных при обеспечении относительно однородной итоговой пространственной выборки данных по векторам пространственного разделения. 16 приемников выстроены в L-образную антенну с угловой точкой в центре поворотного диска с рабочим диаметром 150 мм, длинным плечом, направленным в начальной позиции по потоку, и расстоянием между соседними приемниками 2 мм. Расположение остальных 48 приемников определяется с помощью специального алгоритма. Выполнена предварительная имитационная проверка метода с привлечением модели Коркоса [11]. Для волнового анализа использовалось классическое быстрое преобразование Фурье с предварительной привязкой данных к прямоугольной сетке. Получено, что для сходимости результатов достаточно четырех углов поворота платформы. Представленные в статье результаты опытов показывают, что минимальный размер турбулентных структур, контролируемых разработанной антенной, составляет несколько миллиметров. По признанию авторов, осталась неясной причина демонстрируемых значительных фоновых (длинноволновых) уровней на высоких частотах 1200 и 2000 Гц.

Применение дискретных антенн для “прямых” измерений частотно-волновых спектров пристеночных пульсаций давления неразрывно связано с продвижением современных методов и средств цифрового анализа полей акустических источников. Так, в публикациях [59, 60] проводятся тестовые модельные оценки возможности использования фильтра Винера и применимости методов деконволюции (DAMAS-2), получивших широкое распространение в задачах локализации источников шума с помощью микрофонных антенн [61]. Растет интерес к цифровым МЭМС-микрофонам (МЭМС – микро-электро-механические системы), которые не требуют внешней системы сбора данных и позволяют развертывать большие массивы датчиков. Первые результаты испытаний антенны таких микрофонов в аэродинамической трубе, включающие получение данных о волновом составе поля при-



стеночных турбулентных давлений, представлены в [62].

Решение отмеченных задач находится в стадии становления. Необходимо подчеркнуть, что их приложение к практическим измерениям ни в коей мере не может компенсировать возможные ошибки и неточности, связанные с несоответствием генерируемых приемниками электрических сигналов фактическим значениям измеряемых пристеночных давлений. В частности, в [63] продемонстрировано заметное влияние толщины электронной платы-экрана на измеряемый МЭМС-микрофоном частотный спектр пристеночных пульсаций.

Обширный арсенал современных измерительных средств использован в [64] для изучения задачи разделения вклада акустической и турбулентной компонент пристеночных пульсаций давления в пограничном слое, которая рассматривалась ранее также в [3, 4, 65, 66]. Сравнительные исследования [64] основаны на последовательном применении трех измерительных систем. Первая включает в себя 63 линейно размещенных микрофонных приемников, смонтированных на поворотной платформе, вторая использует антенну из 76 цифровых МЭМС-микрофонов, распределенных по девяти спиральным веткам на печатной плате-экране с точечными приемными отверстиями для каждого микрофона. Третья система базируется на аналоговой спиральной антенне из 49 акселерометров массой 5 мг, закрепленных с тыльной стороны обтекаемой алюминиевой пластины толщиной 1 мм. Исследования проводились в заглушенной аэродинамической трубе с контролируруемыми источниками звука при скорости потока 30 м/с; применяемые методы разделения основывались как на корреляционном анализе поступающих сигналов, так и на результатах волновой фильтрации. При этом, по сути, не удалось выявить преимуществ того или иного метода разделения.

Отдельное направление измерений связано с возможностью использования быстро реагирующей чувствительной к давлению краски (*fast-responding pressure-sensitive paint* – “быстрый PSP”), наносимой на исследуемую модель. К настоящему времени разработаны пористые связующие и состав люминофора, пригодного для изучения нестационарных пристеночных давлений [67]. При этом быстрый PSP показывает плоскую частотную характеристику по крайней мере до 6 кГц, некоторые составы краски работоспособны до частоты 1 МГц.

Данный метод применялся в [68, 69] при исследованиях обтекания осесимметричной модели ракеты-носителя в трансзвуковой аэродинамической трубе в диапазоне чисел Маха от 0.6 до 1.2. Для калибровки и контроля дополнительно ис-

пользовались 216 встроенных заподлицо датчиков давления Kulite диаметром 0.072 дюйма (1.8 мм), что позволило преодолеть некоторые из присутствующих быстродействующей краске проблем, таких как быстрая деградация изображения, нелинейность реакции на давление и значительная температурная чувствительность. С помощью регулярно расположенной сетки были рассчитаны двумерные частотно-волновые спектры полей пристеночных турбулентных давлений. При этом на определенных режимах выявлена конвекция пульсационных давлений в направлении против потока. По информации авторов, представленные ими данные – первые, полученные для околозвуковых режимов обтекания.

Подводя итоги, отметим, что выполненные к настоящему времени измерения частотно-волнового спектра достаточно ограничены. Они имеют либо прикладную направленность (разделение акустических и аэрогидродинамических источников, исследования в волновой зоне повышенной вибровозбудимости), либо связаны с совершенствованием собственно методов измерений. Соответственно, накопленные экспериментальные данные не позволяют пока количественно оценить общие зависимости двумерного распределения энергии по волновым векторам от частоты и параметров пограничного слоя.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 20-02-00181 А).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Howe M.S.* Acoustics of Fluid-Structure Interactions. Cambridge University Press, 1998. 560 p.
2. *Смоляков А.В.* Шум турбулентных потоков. СПб.: ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 2005. 312 с.
3. *Кудашев Е.Б., Яблоник Л.Р.* Турбулентные пристеночные пульсации давления. М.: Научный мир, 2007. 223 с.
4. *Blake W.K.* Mechanics of Flow-Induced Sound and Vibration. V. 2. Complex Flow-Structure Interactions. Second Edition. Academic Press, 2017. Elsevier Inc. 670 p.
5. *Голубев А.Ю., Кудашев Е.Б., Яблоник Л.Р.* Турбулентные пульсации давления в акустике и аэрогидродинамике. М.: Физматлит, 2019. 424 с.
6. *Flinovia: Flow Induced Noise and Vibration Issues and Aspects-II.* Ciappi E., Franco F., Guyader J.-L., Hambric S.A., Leung R.C.K., Hanford A.D. (Eds.). Springer, 2019. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-76780-2>
7. *Flinovia: Flow Induced Noise and Vibration Issues and Aspects-III.* Ciappi E., De Rosa S., Franco F., Hambric S.A., Leung R.C.K., Clair V., Maxit L., Totaro N. (Eds.). Springer Nature, 2021. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-64807-7>

8. *Willmarth W.W.* Wall pressure fluctuations in a turbulent boundary layer // *J. Acoust. Soc. Am.* 1956. V. 28. P. 1048.
9. *Mull H.R., Algranti J.S.* Preliminary flight survey of aerodynamic noise on an airplane wing // *NACA RM E55K07.* 1956.
10. *Willmarth W.W.* Pressure fluctuations beneath turbulent boundary layers // *Annual Review of Fluid Mechanics.* 1975. V. 7. P. 13–38.
11. *Corcos G.M.* Resolution of pressure in turbulence // *J. Acoust. Soc. Am.* 1963. V. 35. № 2. P. 192–199.
12. *Смольяков А.В., Ткаченко В.М.* Измерение турбулентных пульсаций. Л.: Энергия, 1980.
13. *Ефимцов Б.М.* Критерии подобия спектров пристеночных пульсаций давления турбулентного пограничного слоя // *Акуст. журн.* 1982. Т. 28. № 4. С. 491–497.
14. *Ефимцов Б.М.* Характеристики поля пристеночных турбулентных пульсаций давления при больших числах Рейнольдса // *Акуст. журн.* 1984. Т. 30. № 1. С. 58–61.
15. *Смольяков А.В., Ткаченко В.М.* Модели поля псевдозвуковых турбулентных пристеночных давлений и опытные данные // *Акуст. журн.* 1991. Т. 37. № 6. С. 1199–1207.
16. *Bull M.K.* Wall-pressure fluctuations beneath turbulent boundary layers: Some reflections on forty years of research // *J. Sound Vib.* 1996. V. 190. P. 299–315.
17. *Tsuji Y., Fransson J.H.M., Alfredsson P.H., Johansson A.V.* Pressure statistics and their scaling in high-Reynolds-number turbulent boundary layers // *J. Fluid Mech.* 2007. V. 585. P. 1–40.
18. *Robin O., Moreau S., Berry A.* Measurement of the wavenumber-frequency spectrum of wall pressure fluctuations: spiral-shaped rotative arrays with pinhole-mounted quarter inch microphone // *AIAA Paper 2013-2058.* 19th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. May 27–29, 2013, Berlin, Germany. <https://doi.org/10.2514/6.2013-2058>
19. *Salze É., Bailly C., Marsden O., Jondeau E., Juvé D.* An experimental characterisation of wall pressure wavevector-frequency spectra in the presence of pressure gradients // *AIAA Aviation.* 20th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. 16–20 June 2014, Atlanta, GA, USA.
20. *Schram C., Van de Wyer N.* An optimized microphone array for the measurement of turbulent boundary layer wall pressure wavenumber-frequency spectra // *AIAA Aviation Forum,* June 25–29, 2018, Atlanta, Georgia, USA.
21. *Hu N., Erbig L.* Effect of flush-mounted sensors and upstream flow developments on measured wall pressure spectra // *AIAA AVIATION Forum.* AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. June 25–29, 2018, Atlanta, Georgia, USA.
22. *Hu N., Erbig L.* Effect of sensor mounting and flow history on measured wall pressure spectra // *AIAA J.* 2020. V. 58. № 7. P. 2964–2974.
23. *Efimtsov B.M., Golubev A.Yu., Kuznetsov V.B., Rizzi S.A., Rackl R.G., Andrianov E.V.* Effect of transducer flushness on measured surface pressure fluctuations in flight // *43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit.* 10–13 January 2005, Reno, Nevada, USA.
24. *Goody M.* An empirical model of surface pressure fluctuations // *AIAA J.* 2004. V. 42. P. 1788–1794.
25. *Rozenberg Y., Robert G., Moreau S.* Wall-pressure spectral model including the adverse pressure gradient effects // *AIAA J.* 2012. V. 50. № 10. P. 2168–2179.
26. *Kamruzzaman M., Bekiroopoulos D., Lutz T., Würz W., Krämer E.* A semi-empirical surface pressure spectrum model for airfoil trailing-edge noise prediction // *Int. J. Aeroacoust.* 2015. V. 14. № 5–6. P. 833–882.
27. *Catlett M.R., Anderson J.M., Forest J.B., Stewart D.O.* Empirical modeling of pressure spectra in adverse pressure gradient turbulent boundary layers // *AIAA J.* 2016. V. 54. № 2. С. 569–587.
28. *Hu N., Herr M.* characteristics of wall pressure fluctuations for a flat plate turbulent boundary layer with pressure gradients // *AIAA Paper* 2016–2749, 2016.
29. *Hu N.* Empirical model of wall pressure spectra in adverse pressure gradients // *AIAA J.* 2018. V. 56. № 9. С. 3491–3506.
30. *Lee S.* Empirical wall-pressure spectral modeling for zero and adverse pressure gradient flows // *AIAA J.* 2018. V. 56. № 5. P. 1818–1829.
31. *Alfredsson P.H., Johansson A.V., Haritonidis J.H., Eckelmann H.* The fluctuating wall-shear stress and the velocity field in the viscous sublayer // *Phys. Fluids.* 1988. V. 31. № 5. P. 1026–1033.
32. *Marusic I., Mathis R., Hutchins N.* A wall-shear stress predictive model // *J. Phys. Conf. Ser.* 2011. V. 318. 012003. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/318/1/012003>
33. *Наугольных К.А., Рыбак С.А.* Об излучении звука турбулентным пограничным слоем // *Акуст. журн.* 1980. Т. 26. № 6. С. 60–63.
34. *Рыбак С.А.* Связь касательных напряжений на жесткой стенке с пульсациями давления, генерируемыми в турбулентном пограничном слое // *Акуст. журн.* 2001. Т. 47. № 5. С. 717–719.
35. *Грешиллов Е.М., Миронов М.А.* Экспериментальная оценка звука, порождаемая турбулентным течением в гидроканале // *Акуст. журн.* 1983. Т. 29. № 4. С. 460–469.
36. *Грешиллов Е.М., Миронов М.А., Ткаченко В.Г.* Измерение спектра касательных сил, действующих со стороны турбулентного потока на ограниченную обтекаемую поверхность // *Акуст. журн.* 1988. Т. 34. № 1. С. 60–63.
37. *Ефимцов Б.М., Зосимов В.В., Ромашов А.В., Рыбак С.А.* О корреляции пульсаций давления с касательными напряжениями в турбулентном пограничном слое // *Акуст. журн.* 2003. Т. 49. № 1. С. 127–129.
38. *Hu Z., Morfey C.L., Sandham N.D.* Prediction of boundary layer sound radiation from wall shear stresses using DNS data // *AIAA Paper* 2006–2412. 12th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (27th AIAA Aeroacoustics Conference). 8–10 May, 2006, Cambridge, Massachusetts.
39. *Diaz-Daniel C., Laizet S., Vassilico J.C.* Wall shear stress fluctuations: Mixed scaling and their effects on velocity fluctuations in a turbulent boundary layer // *Phys. Fluids.* 2017. V. 29. 055102. <https://doi.org/10.1063/1.4984002>
40. *Chase D.M.* Modeling the wavevector-frequency spectrum of turbulent boundary layer wall pressure // *J. Sound Vib.* 1980. V. 70. № 1. P. 29–67.
41. *Chase D.M.* The character of the turbulent wall pressure spectrum at subconvective wavenumbers and a suggested comprehensive model // *J. Sound Vib.* 1987. V. 112. № 1. P. 125–147.

42. Смольяков А.В. Новая модель взаимного и частотно-волнового спектров турбулентных пульсаций давления в пограничном слое // Акуст. журн. 2006. Т. 52. № 3. С. 393–400.
43. Lysak P.D., Bonness W.K., Fahline J.B. Low wavenumber models for turbulent boundary layer excitation of structures // Flinovia—Flow Induced Noise and Vibration Issues and Aspects-II. P. 3–15. Springer International Publishing AG, 2019.
44. Caiazzo A., D'Amico R., Desmet W. Development of a generalized Corcos model for the prediction of turbulent boundary layer-induced noise // Flinovia—Flow Induced Noise and Vibration Issues and Aspects-II. P. 17–37. Springer International Publishing AG, 2019.
45. Frendi A., Zhang M. A new turbulent wall-pressure fluctuation model for fluid-structure interaction // J. Vib. Acoust. 2019. V. 142. № 2. P. 021018. <https://doi.org/10.1115/1.4045771>
46. De Jong R.G. Chase vs. Corcos TBL Loading // Flinovia—Flow Induced Noise and Vibration Issues and Aspects-III. P. 27–44. Springer Nature Switzerland AG, 2021.
47. Blake W.K., Chase D.M. Wavenumber-frequency spectra of turbulent-boundary-layer pressure measured by microphone arrays // J. Acoust. Soc. Am. 1971. V. 49. P. 862–877.
48. Ткаченко В.М., Смольяков А.В., Колышницын В.А., Маршов В.П. Частотно-волновой спектр турбулентных давлений: способы измерения и результаты // Акуст. журн. 2008. Т. 54. № 1. С. 127–132.
49. Jameson P.W. Low-wavenumber component of turbulent boundary layer pressure fluctuations // J. Acoust. Soc. Am. 1972. V. 51. № 1A. С. 95. <https://doi.org/10.1121/1.1981719>
50. Martin N.C., Leehey P. Low wavenumber wall pressure measurements using a rectangular membrane as a spatial filter // J. Sound Vib. 1977. V. 52. № 1. P. 95–120.
51. Голубев А.Ю. Экспериментальная оценка волновых спектров пристенных пульсаций давления турбулентного пограничного слоя в субконвективной области // Акуст. журн. 2012. Т. 58. № 4. С. 434–442.
52. Lecoq D., Pezerat C., Chevillotte F., Bessis R. Measurement of the low-wavenumber component within a turbulent wall pressure by an inverse problem of vibration // J. Acoust. Soc. Am. 2016. V. 140. № 3. P. 1974–1980.
53. Pezerat C., Grosset O., Carpentier J., Thomas J.-H., Ablitzer F. Wall pressure identification by using the force analysis technique in automotive, naval and aeronautic applications // Flinovia—Flow Induced Noise and Vibration Issues and Aspects-II. P. 39–57. Springer International Publishing AG, 2019.
54. Sherman C.H., Ko S.H., Buehler B.G. Measurement of the turbulent boundary layer wave-vector spectrum // J. Acoust. Soc. Am. 1990. V. 88. P. 386.
55. Abraham B.M., Keith W.L. Direct measurements of turbulent boundary layer wall pressure wave-number-frequency spectra // J. Fluids Eng. 1998. V. 120. № 1. P. 29–39.
56. Arguillat B., Ricot D., Robert G., Bailly C. Measurements of the wavenumber-frequency spectrum of wall pressure fluctuations under turbulent flows // AIAA Paper 2005–2855. 11th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (26th AIAA Aeroacoustics Conference). 23–25 May 2005, Monterey, California, USA.
57. Arguillat B., Ricot D., Robert G., Bailly C., Robert G. Measured wavenumber: Frequency spectrum associated with acoustic and aerodynamic wall pressure fluctuations // J. Acoust. Soc. Am. 2010. V. 128. P. 1647.
58. Salze É., Bailly C., Marsden O., Jondeau E., Juvé D. An experimental investigation of wall pressure fluctuations beneath pressure gradients // AIAA AVIATION Forum. 21th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. June 22–26<sup>th</sup>, 2015, Dallas, Texas, USA.
59. Prigent S.L., Engelman R., Salze É., Bailly C. Deconvolution of the wave-number-frequency spectra of wall pressure fluctuations // AIAA AVIATION Forum. AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. June 25–29, 2018, Atlanta, Georgia, USA.
60. Prigent S.L., Salze É., Bailly C. Deconvolution of wave-number-frequency spectra of wall pressure fluctuations // AIAA J. 2020. V. 58. № 1.
61. Панов С.Н. Локализация источников шума с помощью микрофонных антенн // VII Всероссийская конф. Noise&Vibration. Сб. докладов. 2019. С. 183–191.
62. Salze É., Jondeau E., Pereira A., Prigent S. L., Bailly C. A new MEMS microphone array for the wavenumber analysis of wall-pressure fluctuations: application to the modal investigation of a ducted low-Mach number stage // Aeroacoustics Conferences. 25th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference. 20–23 May 2019, Delft, The Netherlands.
63. Prigent S.L., Salze E., Jondeau E., Bailly C. Spatial structure and wavenumber filtering of wall pressure fluctuations on a full-scale cockpit model // Experiments in Fluids. 2020. V. 61. P. 201. <https://doi.org/10.1007/s00348-020-03017-2>
64. Leclere Q., Dinsentmeyer A., Salze E., Antoni J. A comparison between different wall pressure measurement devices for the separation and analysis of TBL and acoustic contributions // Flinovia—Flow Induced Noise and Vibration Issues and Aspects-III. P. 181–206. Springer Nature Switzerland AG, 2021.
65. Кудашев Е.Б. Подавление акустических шумов, действующих в экспериментальной установке при измерении пристеночных пульсаций давления // Акуст. журн. 2003. Т. 49. № 5. С. 644–649.
66. Кудашев Е.Б., Яблоник Л.П. Регистрация частотного спектра пристеночных турбулентных давлений на фоне акустического шума // Акуст. журн. 2020. Т. 66. № 6. С. 632–637.
67. Gregory J.W., Sakaue H., Liu T., Sullivan J.P. Fast pressure-sensitive paint for flow and acoustic diagnostics // Annual Review of Fluid Mechanics. 2014. V. 46. P. 303–330.
68. Panda J., Roozeboom N.H., Ross J.C. Wavenumber-frequency spectra of pressure fluctuations on a generic space vehicle measured via unsteady pressure-sensitive paint // AIAA SciTech 2017, Grape-vine, TX, 9–13 January 2017.
69. Panda J., Roozeboom N.H., Ross J.C. Wavenumber-frequency spectra on a launch vehicle model measured via unsteady pressure-sensitive paint // AIAA J. 2019. V. 57. № 5. P. 1–17.