

АППАРАТУРА И МЕТОДЫ ОПТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 534.231; 534.2:532

Экспериментальные исследования акустического поля, возбуждаемого сверхзвуковой струей

В.А. Банах, Д.А. Маракасов, В.М. Сазанович, Р.Ш. Цвык*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 11.10.2013 г.

Анализируются результаты исследований акустического поля, которое генерируется затопленной (выходящей в окружающую среду) сверхзвуковой струей. Показано, что основной источник звука расположен на высоте 230–260 мм от сопла, частота основной гармоники составляет 6 кГц. Отношение амплитуд гармоник зависит от условий генерации и расстояния от сопла. Поле звуковой волны неоднородно в пространстве вокруг оси струи.

Ключевые слова: акустическое поле, сверхзвуковая струя, корреляционная функция, спектр; acoustic field, supersonic jet, correlation function, spectrum.

Введение

Истечение сверхзвуковой струи сопровождается возбуждением акустических волн, порождаемых как случайными неоднородностями в струе, так и наличием регулярной конфигурации скачков уплотнения («бочек»). В итоге наряду с широкополосной компонентой акустического поля в спектрах мощности звука появляются максимумы на характерных частотах, соответствующих размеру бочек. Распространение акустических волн порождает изменения плотности воздуха как внутри струи, так и в окружающем пространстве. Турбулентное состояние среды в таком потоке определяется неоднородностями не только температуры, но и давления, что приводит к изменению оптических характеристик среды [1–4, 9].

Развитие экспериментальной аэрогазодинамики требует усовершенствования систем контроля за осредненными параметрами сверхзвукового потока и измерений в реальном времени уровня и спектрального состава пульсационных характеристик потока в сверхзвуковых аэродинамических трубах (АТ). В частности, использование сверхзвуковой струи для продувки моделей летательных аппаратов и препятствий различной формы требует учета влияния уровня и структуры турбулентности в набегающем потоке.

Для исследования структуры турбулентности в таких потоках привлекаются оптические и акустические методы [1–10], которые широко применяются в атмосфере. В отличие от датчиков прямого измерения (давления, скорости и др.) они малоинер-

ционны, не нарушают структуру течения, обладают высокой чувствительностью.

Наши эксперименты по распространению лазерных пучков через сверхзвуковой поток, направленные на возможность исследования структуры турбулентности в потоке [2], показали наличие влияния дополнительных факторов, не связанных с турбулентностью. Дальнейшие исследования [1, 5, 8] выявили связь этих факторов с акустическим полем, которое генерируется сверхзвуковой струей и создает в пространстве вокруг струи «бегущие» волны плотности. Это влияние приводит к появлению в спектре флуктуаций интенсивности максимумов на частоте звукового поля и к увеличению уровня флуктуаций. Поэтому при анализе результатов применения оптических методов для исследования структуры турбулентности в потоке необходимо учитывать влияние акустического поля или выбирать такие условия эксперимента, при которых это влияние минимально. Например, минимизация длины трассы [1] позволяет уменьшить вклад акустического поля во флуктуации зондирующего оптического излучения, а применение расходящегося пучка (в отличие от коллимированного) уменьшает вклад акустического поля в области источника излучения за счет малой чувствительности к флуктуациям показателя преломления. При этом флуктуации показателя преломления в струе, расположенной в области середины трассы, дают максимальный вклад во флуктуации расходящегося зондирующего пучка.

Исследование акустического поля, генерируемого сверхзвуковыми потоками газа, привлекает внимание специалистов как в экспериментальном [1–4, 8–10], так и в теоретическом плане [5, 6]. Это необходимо для изучения возможностей снижения уровня шумов реактивных летательных аппаратов, а также для диагностики самих потоков, поскольку уровень

* Виктор Арсентьевич Банах (banakh@iao.ru); Дмитрий Анатольевич Маракасов (mda@iao.ru); Валентина Михайловна Сазанович (sazanovich@iao.ru); Рувим Шахнович Цвык (tsvyk@iao.ru).

шумов зависит от структуры струи, которая крайне неоднородна в поперечном и продольном направлениях [1, 4]. В последнее время появились теоретические работы (например, [5–7]), в которых делаются попытки построить модель флуктуаций параметров сжимаемых газовых потоков. Однако полученные в [5–7] результаты можно рассматривать лишь как начальный этап совместного использования оптических и акустических методов для определения характеристик сверхзвуковых потоков.

Развитие оптических и акустических исследований направлено на разработку методов и средств дистанционного определения средних и турбулентных характеристик среды в сверхзвуковых потоках. В настоящей статье приведены результаты экспериментов по исследованию пространственной структуры акустического поля сверхзвуковой струи с использованием набора микрофонов.

Аппаратура и методика измерений

Базой для экспериментов являлись гиперзвуковые аэродинамические трубы Т-326 и вертикальная струйная установка (ВСУ) Института теоретической и прикладной механики СО РАН. Сверхзвуковая затопленная (выходящая в атмосферу) струя на трубе Т-326 формировалась конвергентным соплом Лавала диаметром $d = 30$ мм [4]. Струйное число Маха (M), определяемое изэнтропическим расширением газа на выходном сопле, равнялось 1,71 при давлении, близком к атмосферному. На ВСУ неизобарическая затопленная струя формировалась соплом Витошинского диаметром 30 мм с $M = 1$ при давлении выше атмосферного. Истечение струи на трубе Т-326 происходило в камеру размером $0,5 \times 0,5 \times 0,8$ м; на ВСУ – вертикально вверх в помещении размером $5 \times 5 \times 3$ м, что уменьшало влияние отраженных волн. Измерения были проведены при отношениях давления в форкамере к давлению в окружающем пространстве (npr), равных 5, которое является основным режимом работы.

Измерения звукового поля на Т-326 проводились в частотном диапазоне 20 Гц – 100 кГц с использованием 5 микрофонов диаметром 6 мм [1, 4]. Измерения на ВСУ выполнены 10 микрофонами (м1–м10) диаметром 20 мм в частотном диапазоне 20 Гц – 20 кГц. Частота работы АЦП (USB-3000) при вводе данных в компьютер – 300 кГц с каждого микрофона. Время регистрации 2 с. Микрофоны смонтированы на пластине (линейке) из пеноплекса толщиной 40 мм, шириной 50 мм с шагом 50 мм. Пеноплекс слабо отражает акустические колебания. Положения пластины относительно оси струи показаны на рис. 1, а (цв. вклейка):

– вертикально – параллельно оси струи (ось z) на расстоянии $R_{01} = 900$ мм (рис. 1, б);

– горизонтально:
а) перпендикулярно оси струи (вдоль оси y) на удалении $R_{02} = 915$ мм,

б) перпендикулярно оси струи (вдоль оси x) на удалении десятого микрофона от оси $R_{03} = 585$ мм, первого – 1035 мм.

В дальнейшем расстояния R_{0i} использовались для определения временной и пространственной задержки сигнала между микрофонами. В эксперименте указанные положения линейки с микрофонами применялись поочередно.

В данной серии измерений на ВСУ для уменьшения влияния отраженных волн часть конструкций и стен была покрыта поролоном, рассчитанным на поглощение частоты основной гармоники акустических колебаний в области 3 кГц (см. рис. 1, б).

Результаты измерений

Выполненные ранее исследования акустических колебаний, генерируемых сверхзвуковой воздушной струей аэродинамической трубы Т-326, позволили сделать следующие выводы [4].

1. Измеренный на расстоянии 135 мм от оси струи уровень акустического давления находится в пределах 150–156,5 дБ и зависит от местоположения микрофонов относительно оси струи.

2. При npr , равном 5, генерируются акустические колебания, близкие к гармоническим, на основной частоте, равной 3 кГц, и более слабые на частотах 6 и 9 кГц, иногда 12 кГц. Характер колебаний с увеличением npr до 9 изменяется от гармонического до шумоподобного.

3. Источник звука располагается в области перехода от сверхзвуковых скоростей течения струи к дозвуковым и для струйного модуля Т-326 находится на оси струи на расстоянии порядка 225 мм от сопла. На некотором расстоянии от источника генерируемая звуковая волна вдоль оси струи становится близкой к сферической.

Таким образом, эксперименты, проведенные на Т-326, позволили определить уровни звукового давления и характерные частоты акустической волны. Исследования, позволяющие судить о форме поверхности звукового поля, были выполнены на ВСУ.

Измерения в горизонтальной плоскости вдоль оси y проводились на высотах от 0 до 400 мм относительно выходного сопла с шагом 100 мм, вдоль оси x – на высоте 0 мм. При вертикальном положении линейки (вдоль оси z) первый микрофон располагался на высотах 0 и 100 мм относительно выходного сопла. Измерения проводились поочередно по каждой координате в одинаковых контролируемых условиях истечения струи.

По результатам измерений звукового давления рассчитывались спектральные плотности, а также взаимные корреляционные функции (ВКФ) звуковой волны между одним из микрофонов (опорный микрофон) и всеми остальными. По времени сдвига максимума ВКФ определялись временные задержки Δt между микрофонами, которые использовались для определения формы волнового фронта.

Примеры результатов вычисления ВКФ, нормированных на амплитуду опорного микрофона, для двух различных расположений микрофонов приведены на рис. 2 (цв. вклейка).

Положительные значения временной задержки Δt относительно опорного микрофона соответствуют отставанию фазы волны, а отрицательные – опережению. При вертикальном расположении микрофонов ВКФ спадает на порядок за время 0,0003 с, сдвиги максимумов определяются четко (рис. 2, а). ВКФ для микрофонов, расположенных вдоль оси y , за это время уменьшается всего в 2–5 раз (рис. 2, б) с четким определением положения максимумов. Период колебаний ВКФ близок к звуковой частоте 6 кГц, которая совпадает с рассмотренными ниже результатами анализа спектральной плотности. Скорость спадания ВКФ указывает на слабую пространственно-временную корреляцию звукового поля по вертикали и сильную корреляцию в поперечном направлении.

По временной задержке Δt рассчитывались пространственные задержки $\Delta l = V_{зв} \Delta t$, где $V_{зв}$ – скорость распространения звука в воздухе. Эти задержки сравнивались с задержкой ΔR , рассчитанной в приближении точечного источника (сферическая волна радиусом R_{0i}), расположенного на высоте $h_0 = 245$ мм (определено для ВСУ при обработке экспериментов). Расчетная задержка при вертикальном расположении линейки микрофонов определялась из соотношения

$$\Delta R_i = \left[R_{01}^2 + (h_m - h_0)^2 \right]^{1/2} - R_{01},$$

где R_{01} – длина перпендикуляра между осью струи и линейкой микрофонов; h_m – высота соответствующего микрофона относительно сопла струи. При горизонтальном расположении линейки микрофонов вдоль оси y расчетная задержка

$$\Delta R_i = \left[R_{02}^2 + (h_m - h_0)^2 + \Delta y_i^2 \right]^{1/2} - R_{02}$$

(Δy_i – расстояние от соответствующего микрофона до координаты R_{02}). Аналогичное соотношение применялось для расчета при расположении микрофонов вдоль оси x :

$$\Delta R_i = \left[R_{03}^2 + (h_m - h_0)^2 + \Delta x_i^2 \right]^{1/2} - R_{03},$$

где Δx_i – расстояние от соответствующего микрофона до координаты R_{03} .

На рис. 3, а–в (цв. вклейка) приведены результаты сравнения измеренных и расчетных пространственных задержек сигнала с микрофонов для трех положений линейки микрофонов. Уменьшение экспериментальной задержки соответствует увеличению радиуса волновой поверхности относительно соответствующего радиуса R_{0i} , а увеличение задержки – уменьшению этого радиуса.

По вертикали отклонения расчетных и экспериментальных результатов наиболее изменчивы (рис. 3, а, цв. вклейка). Если на высотах от сопла менее 200 мм экспериментальные задержки превышают расчетные практически на 100%, или на $1,2\lambda_{зв}$, где $\lambda_{зв} = V_{зв}/f_m = 55$ мм – длина звуковой волны, соответствующая максимуму спектра $f_m = 6055$ Гц (рис. 4,

цв. вклейка), то на высотах более 200 мм наблюдаются большой разброс данных и слабая зависимость от высоты. Для вычисления задержек в длинах волн пространственные задержки делятся на длину звуковой волны $\lambda_{зв} = 55$ мм.

Отклонения пространственных задержек, измеренных вдоль оси y , от расчетных слабо зависят от высоты над соплом (рис. 3, б). Экспериментальные данные близки к расчетным значениям при отрицательных значениях Δy на высотах более 200 мм. Во всех остальных случаях экспериментальные задержки на 10–20% меньше расчетных.

Вдоль оси x (рис. 3, в) экспериментальные и расчетные значения задержки близки между собой на расстояниях до 750 мм от оси струи, а затем экспериментальные значения слабо зависят от расстояния.

Эти результаты позволяют предположить, что источник звука локализован в области высоты 230–260 мм от сопла и в полусфере распространяется волна с различным радиусом кривизны волнового фронта по высоте и в поперечном сечении. В поперечном сечении радиус волнового фронта незначительно увеличивается по мере удаления от центрального микрофона м5 и остается постоянным на некотором расстоянии при удалении от оси струи (по оси x).

По вертикали радиус волнового фронта значительно меньше (превышение расчетных задержек), чем радиус сферической волны до высоты 200 мм, и сильно флуктуирует на высотах более 200 мм, отличаясь от сферической волны как в большую, так и в меньшую сторону. Такая форма волнового фронта акустического поля может возникнуть, на наш взгляд, по двум причинам. *Первая* – источником звука является не точечный источник звуковой волны, а объемный, расположенный на высоте 230–260 мм, и его диаметр изменяется по высоте; *вторая* – наблюдаемый в предварительных экспериментальных исследованиях [2] и расчетах [4, 5] сдвиг фазы звукового поля, близкий к 180° на противоположных сторонах струи, что соответствует колебаниям струи в пространстве. Отметим, что в области 230–260 мм от сопла скорость течения в струе приближается к дозвуковой, происходит сильная турбулизация потока и струя быстро расширяется [5, 6].

В работе [6] для холодной струи с числом Маха на выходе сопла $M = 2,0$ выполнено моделирование мгновенного распределения поля звукового давления (рис. 3, г). В ней ударные ячейки (бочки) видны только на начальных участках струи до начала распада потенциального ядра при $x/r_0 \approx 10 \div 12$ (r_0 – радиус сопла), при $x/r_0 > 10 \div 12$ струя расширяется и течение переходит к турбулентному дозвуковому режиму. На рис. 3, г указаны значения предполагаемых координат источника звука $x/r_0 = 15,3$ и $17,3$ для высот 230 и 260 мм, полученных в нашем эксперименте, которые близки к области начала распада потенциального ядра, определенной в [6]. Из рис. 3, г видна сложная структура звукового поля, радиусы фазового фронта меняются вдоль оси струи, и на противоположных сторонах струи максимумы

и минимумы смещены на 180° , что совпадает с данными наших измерений. Таким образом, полученные результаты экспериментальных исследований близки результатам численного моделирования.

Измерения спектров звуковых волн показали, что генерируемый струей звук имеет основную гармоническую составляющую на частоте $f_2 \approx 6,04 \div 6,05$ кГц (безразмерное число Стентона $St = f_2 d / V_{zv} = 0,55$) (рис. 4, цв. вклейка), более слабую на частоте $f_1 = 3$ кГц ($St = 0,275$) и в ряде случаев на частоте $f_3 = 9$ кГц. В более ранних измерениях [1, 2] с соплом Лаваля при тех же параметрах истечения струи частота основной гармоники была 3,03 кГц, а слабые гармоники наблюдаются на частотах 6,04 и 9,06 кГц. Эти изменения в спектрах мы связываем с экранировкой корпуса вокруг сопла и части стен шумопоглощающим покрытием из поролона, которое выполнено в виде пирамидок высотой 60 мм, что привело к значительному подавлению основной гармоники $f_1 = 3$ кГц и изменению спектрального состава звукового поля. То есть свойства отражающих поверхностей влияют на спектральный состав звукового поля. На высотах ниже 200 мм и выше 300 мм, а также на расстояниях более 750 мм от оси струи наблюдается усиление шумовой составляющей сигнала, что может быть связано с влиянием волн, отраженных от различных поверхностей, окружающих сопло.

Заключение

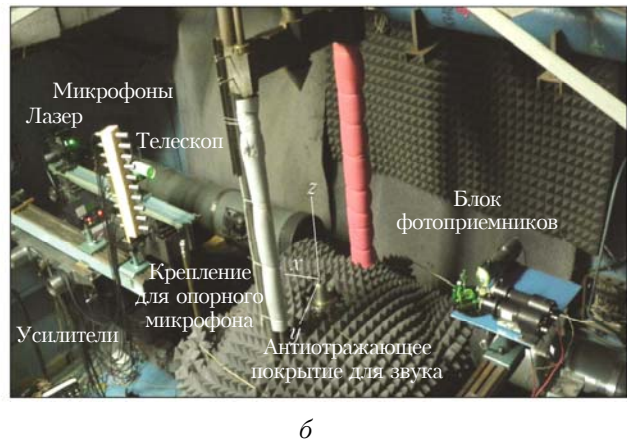
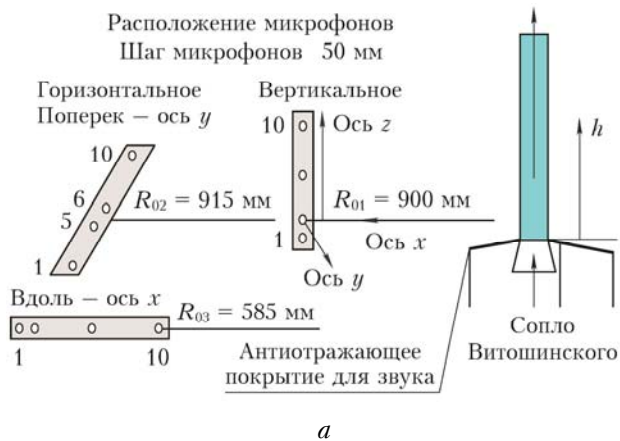
Проведенные исследования показали, что возбуждаемая сверхзвуковым потоком акустическая волна имеет различные радиусы кривизны волнового фронта в направлении распространения струи и в поперечном сечении. Источник звука локализован в области высот 230–260 мм от сопла, т.е. в области турбулизации потока и перехода скорости течения струи от сверхзвуковой к дозвуковой. Результаты выполненных исследований не противоречат результатам численного моделирования звуковых полей, генерируемых сверхзвуковыми потоками [6], и исследованиям структуры турбулентности методом лазерного просвечивания среды [1, 9].

V.A. Banakh, D.A. Marakasov, V.M. Sazanovich, R.Sh. Tsvyk. The results of research of the acoustic field generated by a supersonic jet.

Results of research of the acoustic field are analyzed, which is generated by a flooded (going in the environment) supersonic jet. It is shown that the basic source of a sound is located at a height of 230–260 mm from the nozzle, frequency of the basic harmonic makes 6 kHz. The ratio of amplitudes of harmonics depends on conditions of generation and the distance from nozzle. The field of a sound wave is non-uniform in the space around the jet axis.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 11-08-01059).

1. *Banakh V., Marakasov D., Tsvyk R., Zapryagaev V.* Study of Turbulent Supersonic Flow Based on the Optical and Acoustic Measurements in a book: Wind Tunnels and Experimental Fluid Dynamics Research / Dr. Jorge Colman Lerner and Dr. Ulfilas Boldes (Ed.). ISBN: 978-953-307-623-2. InTech. July 2011. P. 607–628.
2. *Банах В.А., Запрыгаев В.И., Кавун И.Н., Сазанович В.М., Цвык Р.Ш.* Экспериментальные исследования дисперсии и спектров флуктуаций интенсивности лазерного пучка, пересекающего сверхзвуковой поток газа // Оптика атмосфер. и океана. 2007. Т. 20, № 5. С. 408–412.
3. *Банах В.А., Запрыгаев В.И., Сазанович В.М., Сухарев А.А., Цвык Р.Ш.* Экспериментальные исследования оптическими методами среды над моделью, обдуваемой сверхзвуковой струей // Оптика атмосфер. и океана. 2010. Т. 23, № 12. С. 1091–1098.
4. *Банах В.А., Запрыгаев В.И., Кавун И.Н., Сухарев А.А., Цвык Р.Ш.* Экспериментальные исследования акустических волн, возбуждаемых сверхзвуковой струей // Оптика атмосфер. и океана. 2008. Т. 21, № 12. С. 1050–1055.
5. *Сипатов А.М., Усанин М.В., Чулханцева Н.О.* О численном моделировании шума струи // Уч. зап. ЦАГИ. 2012. Т. XLIII, № 4. С. 69–82.
6. *Bodony D.L.* The prediction of jet noise // Annual Res. Briefs. Center for turbulence research, 2005. P. 367–377.
7. *Банах В.А., Маракасов Д.А., Сухарев А.А.* Восстановление радиальной зависимости структурной характеристики показателя преломления в сверхзвуковом потоке газа по флуктуациям интенсивности лазерного пучка // Оптика и спектроскопия. 2010. Т. 108, № 1. С. 123–127.
8. *Маракасов Д.А., Сазанович В.М., Сухарев А.А., Цвык Р.Ш.* Флуктуации интенсивности лазерного пучка, распространяющегося через сверхзвуковую затопленную струю // Оптика атмосфер. и океана. 2012. Т. 25, № 11. С. 985–992.
9. *Банах В.А., Маракасов Д.А., Сазанович В.М., Цвык Р.Ш.* Особенности спектров интенсивности лазерного излучения, просвечивающего сверхзвуковую струю, связанные с акустическим полем // Изв. вузов. Физ. 2013. Т. 56, № 8/3. С. 328–330.
10. *Бойко В.М., Достовалов А.В., Запрыгаев В.И., Кисилёв Н.П., Пивоваров А.П.* Исследование структуры сверхзвуковых неизобарических струй // Уч. зап. ЦАГИ. 2010. Т. XLI, № 2. С. 44–57.



a

б

Рис. 1. Схема расположения микрофонов при измерениях на трубе ВСУ (*a*), ВСУ со звукопоглощающим покрытием (*б*)

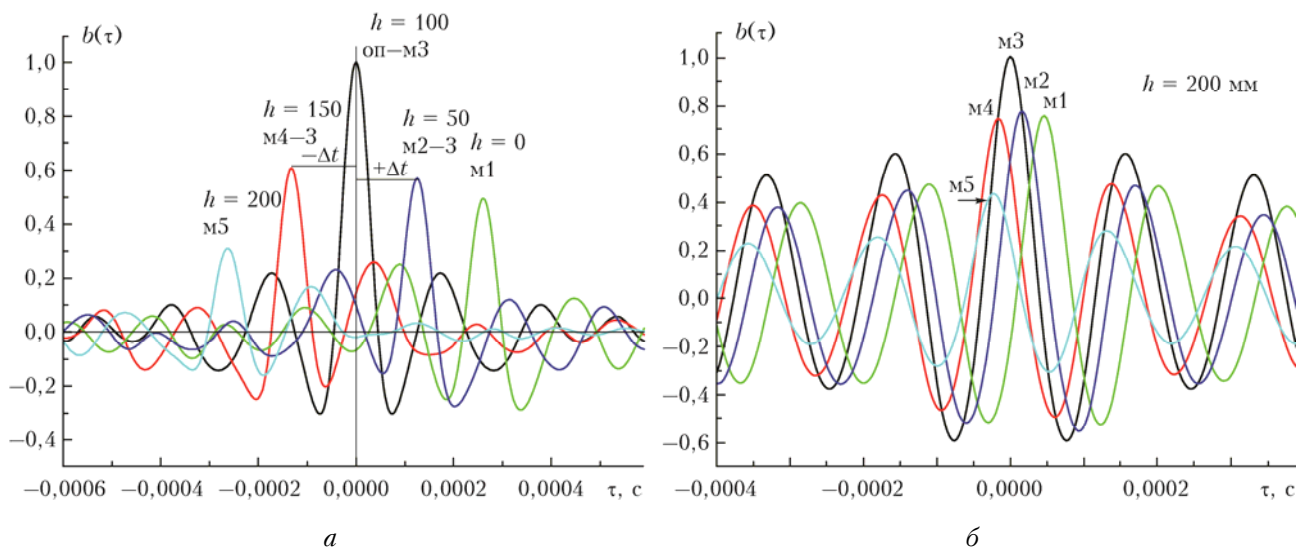


Рис. 2. Примеры нормированных взаимных временных корреляционных функций $b(\tau)$ для вертикального (ось z , см. рис. 1, *a*) и горизонтального (ось y , см. рис. 1, *б*) расположения микрофонов. Указаны номера микрофонов и высоты их положения относительно сопла

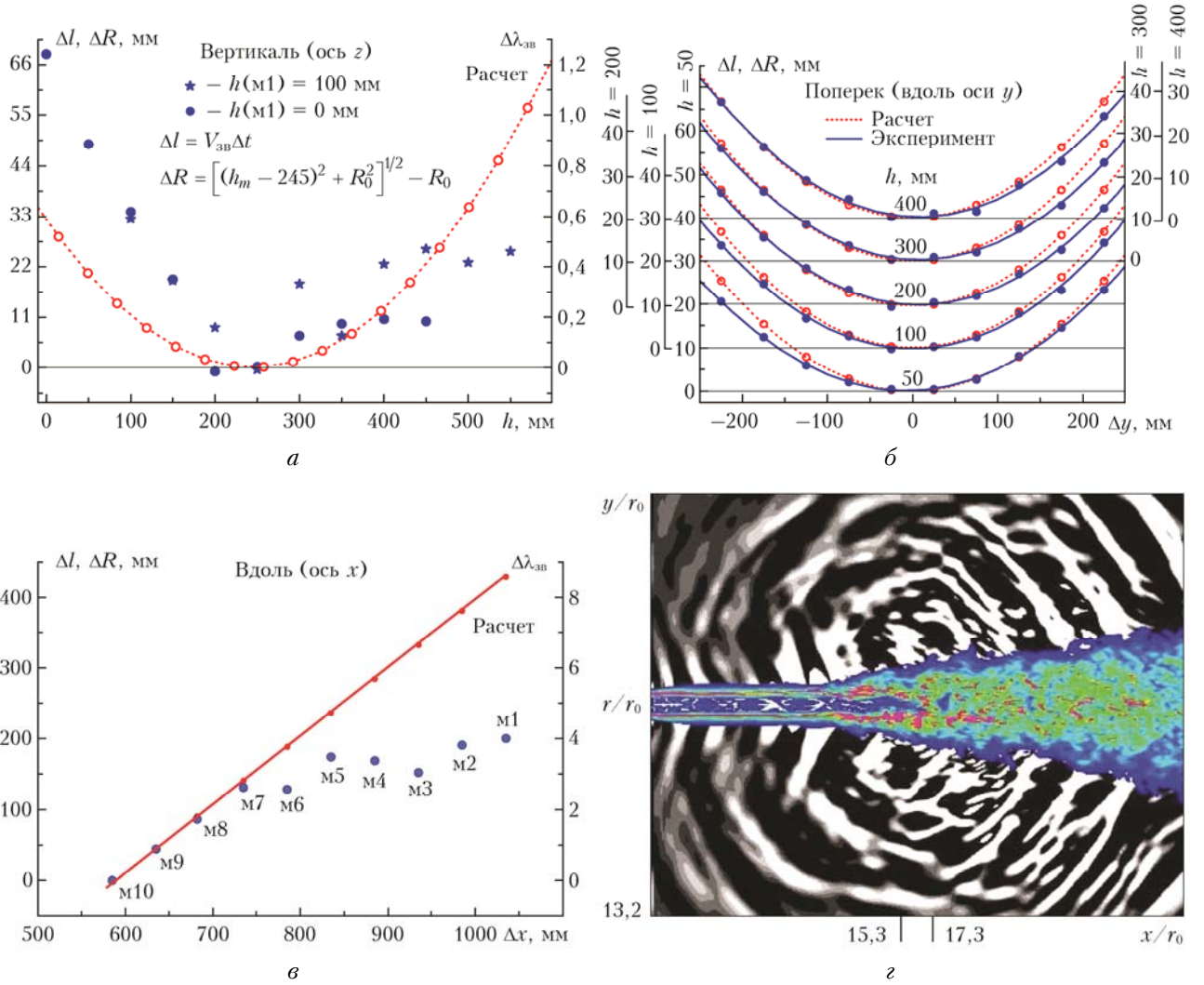


Рис. 3. Примеры пространственной задержки акустической волны для вертикального (ось z (а)), горизонтальных (ось y (б) и ось x (в)) расположений микрофонов; $\Delta l, \Delta R$ — измеренные и расчетные задержки соответственно; $\lambda_{\text{зв}}$ — задержка, нормированная на длину звуковой волны. Указаны номера микрофонов и высоты их положения относительно сопла. Результаты моделирования сверхзвуковой струи с $M = 2,0$ и генерируемого ею звукового поля [4] (г)

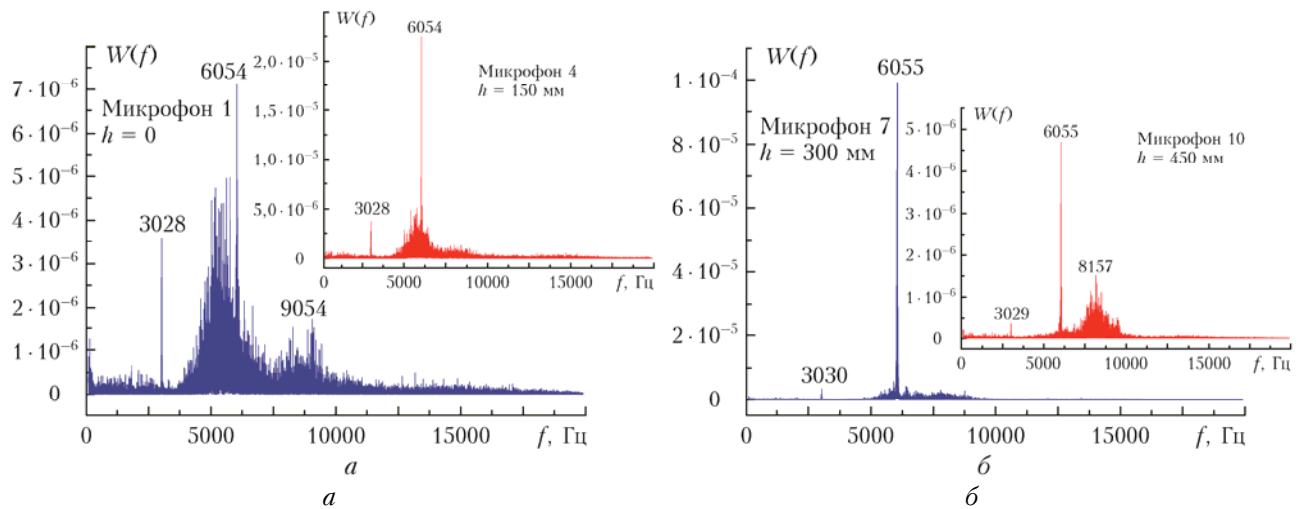


Рис. 4. Примеры спектров акустической волны $W(f)$ при $npr = 5$ на различных высотах с указанием частоты основных гармоник. Высота h дана относительно сопла