

УДК 534.64.222:616.24-073

О ВОЗМОЖНОСТИ ГЕНЕРИРОВАНИЯ ТОНАЛЬНЫХ ЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ ПОТОКОМ ВОЗДУХА В БРОНХАХ СО СТЕНОЗОМ

В. Г. БАСОВСКИЙ, И. В. ВОВК, О. И. ВОВК

*Институт гидромеханики НАН Украины, Киев**Получено 11.10.2002*

Выдвинута гипотеза об одном из возможных механизмов возникновения сухих хрипов (тональных звуковых сигналов) в бронхиальном дереве человека при его патологиях. Предполагается, что выделяющаяся в пораженных воздухоносных путях вязкая мокрота может образовывать аэродинамические структуры типа сопло – струя – препятствие. При акте дыхания роль сопла играет стеноз, формирующий скоростную струю. Роль препятствия могут играть другой стеноз, разветвления воздухоносных путей и мокротные образования. Для проверки выдвинутой гипотезы использовалась экспериментальная установка в составе физической модели воздухоносного пути, а также аппаратуры для регистрации и обработки звуковых сигналов и оценки скорости потока воздуха. В результате экспериментов обнаружено, что наличие указанных аэродинамических структур может обеспечивать эффективное преобразование энергии потока в воздухоносных путях в энергию звуковых колебаний, спектры которых во многом подобны спектрам сухих хрипов. Установлен ряд закономерностей, характерных для рассматриваемых структур. Оценены пороговые значения скоростей потока, при которых начинают возникать тональные звуковые колебания. Показано, что с увеличением относительного расстояния между стенозом, формирующим струю, и препятствием пороговые числа Рейнольдса и пороговые частоты тональных сигналов имеют тенденцию к уменьшению, а пороговые числа Струхала – к увеличению.

Висунута гіпотезу про один з можливих механізмів виникнення сухих хрипів (тональних звукових сигналів) у бронхіальному дереві людини при його патологіях. Припускається, що в'язке мокротиння, яке виділяється в уражених повітряноносних шляхах, може утворювати аеродинамічні структури типу сопло – струмінь – перешкода. При акті дихання роль сопла відіграє стеноз, який формує швидкісний струмінь. Роль перешкоди можуть відігравати інший стеноз, розгалуження повітряноносних шляхів і деякі мокротинні утворення. Для перевірки висунутої гіпотези використовувалась експериментальна установка в складі фізичної моделі повітряноносного шляху, а також апаратури для реєстрації та обробки звукових сигналів й оцінки швидкості потоку повітря. В результаті експериментів знайдено, що наявність у повітряноносних шляхах указаних аеродинамічних структур може забезпечувати ефективне перетворення енергії потоку в енергію звукових коливань, спектри яких багато в чому подібні до спектрів сухих хрипів. Встановлений ряд закономірностей, що характерні для розглянутих аеродинамічних структур. Оцінені порогові значення швидкостей потоку, при яких починають виникати тональні звукові коливання. Показано, що зі збільшенням відносної відстані між стенозом, який формує струмінь, і перешкодою порогові числа Рейнольдса й порогові частоти тональних сигналів мають тенденцію до зменшення, а порогові числа Струхала – до збільшення.

A hypothesis about one of possible mechanisms of occurrence of wheezes (tonal sound signals) in a human bronchial tree at its pathologies is put forward. It is supposed that viscous sputum allocated in affected airways, can form aerodynamic structures of the nozzle – jet – obstruction type. At the act of breathing a stenosis forming a high-speed jet plays the role of a nozzle. The other stenosis, bifurcation of the airways or the sputum formations can play the role of an obstruction. To check the mentioned hypothesis the experimental installation was used. This last included the physical model of an airway along with the equipment for registration and processing of the sound signals and estimation of the airflow velocity. As a result of experiments it was shown that presence of the specified aerodynamic structures can provide an efficient transformation of energy of the stream in airways into energy of the sound fluctuations, which spectra are very similar to the spectra of the wheezes. A number of laws, being characteristic for the considered structures, is established. The threshold values of the flow velocities at which the tonal sound fluctuations start to arise are estimated. It is shown that with increasing the relative distance between a stenosis forming a jet and an obstruction, the threshold Reynolds numbers and the threshold frequencies of the tonal signals tend to decrease, and the threshold Strouhal numbers – to increase.

ВВЕДЕНИЕ

Изучение процессов генерации и распространения звука в бронхиальном дереве человека – интересная и важная проблема акустики респираторного тракта человека, решению которой посвящено довольно большое количество публикаций (см., например, [1, 2] и библиографию в них). Вместе с тем, многие ее аспекты до сих пор остаются недостаточно изученными. В частности, продолжаются дискуссии о природе возникновения шумов и звуков в бронхиальном дереве. Глобальный механизм

их генерации в целом понятен и заключается во взаимодействии потока вдыхаемого (выдыхаемого) воздуха с различными нерегулярностями внутреннего строения бронхиального дерева. Однако многие конкретные геометрические и физические особенности указанных нерегулярностей и, что особенно важно, их ответственность за появление тех или иных типов акустических сигналов остаются во многом неясными. В особенности это касается так называемых “дополнительных дыхательных шумов”, возникающих при некоторых патологиях воздухоносных путей бронхиального де-

рева. Приведем в качестве примера сухие хрипы. Как указывается в Большой медицинской энциклопедии [3], "... сухие хрипы представляют собой протяженные звуки с различным музыкальным тембром. . . и появление их связано с тем, что в местах патологии бронха происходят изменения его формы и сечения, вызванные скоплением здесь комков вязкой, тягучей мокроты (секрета) и местным отеком слизистой оболочки стенки бронха. При тяжелых патологиях уменьшение просвета бронха может быть вызвано также опухолью. . .". Далее, в энциклопедии говорится, что "... сухие хрипы обусловлены колебаниями стенок бронхов и завихрениями струи воздуха при прохождении через зону сужения (стеноза¹) бронха."

Казалось бы, проблема исчерпана – сухие хрипы (суть, тональные звуковые колебания с некоторой тембровой окраской) возникают в местах стеноза бронхов за счет увеличения скорости потока воздуха, возникновения вихрей и вызванных ими колебаний стенок бронхов. Однако в действительности все не так просто. Экспериментальные работы, направленные на изучение особенностей движения потока газа или жидкости в каналах (в том числе, на моделях воздухоносных путей бронхиального дерева и кровеносных сосудов со стенозом) показали, что образующаяся за стенозом (ниже по потоку) турбулентная струя способна генерировать звуковые колебания лишь в виде шума с характерным для него сплошным спектром частот (см., например, [5–8] и обширную библиографию в них). Что касается генерирования тональных звуковых колебаний за счет вибрации стенок бронхов, то выяснилось, что оно в принципе возможно. Тем не менее, возникновение таких сигналов обусловлено не воздействием порождаемых потоком вихрей на стенки бронха, а наблюдаемым при некоторых условиях резким падением давления внутри бронха с последующим его коллапсом (сжатием) и флаттером стенок. Как следует из [9–11], флаттер стенок бронхов имеет место только при определенных соотношениях скорости потока, параметров стеноза и градиента давления между областями до и после стеноза, находящихся в довольно узком диапазоне значений. При этом порождаются почти тональные звуковые колебания преимущественно в диапазоне частот 260 ÷ 750 Гц. Поэтому сомнительно, что все разнообразие звуковой палитры сухих хрипов [3, 12, 13] на частотах от 100 до более чем 3000 Гц обусловлено только одной причиной – флаттером стенок бронхов.

¹Стеноз (от греческого *στενός* – узкий, тесный) – сужение просвета (сечения) какого-либо трубчатого органа (трахеи, бронха, кишки, кровеносной артерии и т. д.) [4].

Рядом выдающихся терапевтов XX века неоднократно высказывалось мнение, что сухие хрипы могут возникать также в тех случаях, когда вязкая и тягучая мокрота образует в бронхах препятствия различных конфигураций (нечто вроде перемычек или нитей, перекидывающихся между стенками бронха, язычков и т. п.), колебания которых под воздействием потока воздуха при акте дыхания и создают тональные звуковые сигналы [3, 13, 17]. К сожалению, какого-либо фактического подтверждения этой гипотезы в литературе обнаружить не удалось. Вместе с тем, из аэромеханики и акустики известно, что если на пути потока газа расположить некоторое препятствие, то при определенных условиях могут возникать почти тональные звуковые колебания [18, 19]. Существенно, что колебания самих препятствий, как правило, играют в этом процессе второстепенную роль. Главной же причиной генерации звука являются эффекты вихреобразования и срыва вихрей при обтекании препятствий потоком. Существует множество публикаций, посвященных изучению этих явлений. В качестве примера можно указать прекрасный обзор [15], в котором обобщаются работы, связанные с исследованием процессов генерации тональных звуковых сигналов аэродинамическими системами, состоящими из сопла с вытекающей струей газа и расположенных на ее пути препятствий в виде механических тел различных конфигураций. Одним из главных обобщающих результатов [15] является вывод о том, что генерация тональных звуков в таких системах возможна только при наличии механизма обратной связи. Последний заключается в существенном влиянии физических процессов, протекающих вблизи препятствий, на процессы в зоне корня струи. В этом случае аэродинамическая система сопло – струя – препятствие, по сути, становится автоколебательной системой, эффективно преобразующей энергию потока в акустическую энергию.

Таким образом, становится очевидным, что интуитивные догадки о возможной природе сухих хрипов [3, 13, 17] могут оказаться не такими уж далекими от истины. Однако для того, чтобы утверждать что-либо с большей определенностью, необходимо ответить на следующие вопросы.

1. Могут ли при патологиях воздухоносных путей бронхиального дерева образовываться структуры, хоть в какой-то мере подобные системам сопло – струя – препятствие?
2. Могут ли при этом создаваться условия для достижения относительно высоких скоростей

потока, при которых начинается автоколебательный процесс?

Действительно, хорошо известно, что скорости потока воздуха в респираторном тракте невелики. Максимальная его скорость наблюдается в голосовой щели и достаточно быстро падает по мере продвижения потока к периферии бронхиального дерева [20]. Так, при спокойном дыхании человека максимальная мгновенная скорость потока в трахеи составляет не более $1 \div 1.5$ м/с, а в бронхах 10-го поколения – уже менее 0.15 м/с. Учитывая известные величины диаметров трахеи и бронха 10-го поколения [21], получаем, что указанные скорости соответствуют числам Рейнольдса ~ 1800 и 15, что явно недостаточно для эффективного звукообразования.

Желание авторов хотя бы частично найти ответы на поставленные вопросы и стимулировало появление настоящей работы.

1. ПРИНЯТЫЕ ГИПОТЕЗЫ И ПРЕДПОЛОЖЕНИЯ

Как уже говорилось во введении, известен ряд аэродинамических систем, в которых при определенных условиях поток может достаточно эффективно возбуждать тональные звуковые колебания [15, 16]. К ним относятся, в частности, системы типа сопло – струя – препятствие. В такой системе вытекающая из сопла струя ударяется о расположенное на ее пути препятствие. В результате этого образуются вихри, которые, срываясь с поверхности препятствия, способствуют возникновению звуковых колебаний. При этом необязательно, чтобы скорость струи была очень велика. Для возникновения звука вполне достаточно, если числа Рейнольдса будут составлять около $10^3 \div 10^4$, а числа Маха – менее 0.3. Важно, что в таких системах возникает обратная связь между аэродинамическими процессами, протекающими в окрестности препятствия и в области корня струи. Именно наличие такой связи и позволяет говорить о системе сопло – струя – препятствие как об автоколебательной системе, преобразующей энергию потока газа в звуковую энергию (см. более подробно в [14 – 16, 24, 25]).

Исходя из этого, можно сделать предположение, что в пораженных воздухоносных путях бронхиального дерева за счет обильного выделения мокроты может образоваться не только один, а два или несколько следующих друг за другом стенозов. Такой случай будем называть мультистенозом. Можно также предположить, что за стенозом

(ниже по потоку) из мокроты образуются структуры типа нитей, растянутых между стенками бронха нормально к направлению потока. Не исключен и вариант расположения стеноза перед бифуркацией (разветвлением) бронха. Очевидно, что во всех этих случаях образуется аэродинамическая система, элементами которой являются стеноз, за которым следует некоторый объем, ограниченный стенками бронха, и далее – препятствие в виде другого стеноза, мультистеноза, нити из мокроты, бифуркации и пр.

При наличии указанной совокупности нерегулярностей внутри бронха роль сопла, где поток может разогнаться до необходимой скорости (при соответствующем отношении диаметра бронха к диаметру стеноза), играет верхний по потоку стеноз. Натекая на препятствие, струя воздуха из этого стеноза порождает вихри, которые, двигаясь в замкнутом объеме между стенозом и препятствием в обратном по отношению к потоку направлении, будут оказывать воздействие на корень струи. Таким образом реализуется обратная связь между процессами в окрестности препятствия (выход системы) и процессами в зоне корня струи (вход системы). При некоторых “удачных” комбинациях геометрических характеристик системы и параметров потока воздуха можно ожидать возникновения звуковых колебаний. Не исключено, что на эффективность звукообразования будет влиять и объем участка бронха между стенозом и препятствием-стенозом, который можно рассматривать как резонатор Гельмгольца. Вероятно, в случае совпадения собственной частоты такого резонатора с частотой генерируемых потоком звуковых колебаний амплитуда последних должна значительно возрастать [22].

К сожалению, в доступной нам литературе мы не нашли каких-либо сведений, подтверждающих или отрицающих возможность образования в воздухоносных путях бронхиального дерева аэродинамических структур, подобных описанным выше. Однако высказанные гипотезы и предположения не противоречат здравому смыслу. Более того, есть сведения, что в некоторых случаях при патологиях кровеносных сосудов в них могут образовываться, например, два стеноза [23].

Исходя из этого, попытаемся оценить возможность генерации потоком тональных звуковых колебаний, подобных сухим хрипам в бронхиальном дереве. Для этого проведем физическое моделирование воздухоносных путей с нерегулярностями типа стеноза и следующих за ним препятствий, а также процессов, связанных с динамикой потока в таких областях.

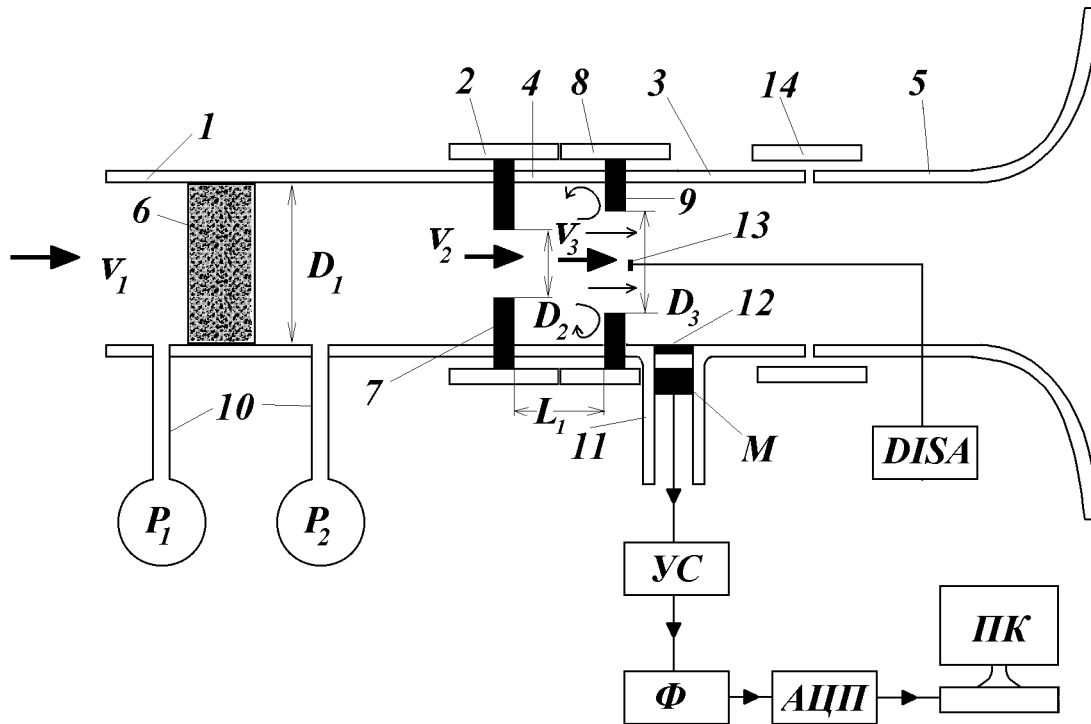


Рис. 1. Схема физической модели и измерительной установки

2. ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ БРОНХА И ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Для проведения измерений использованы ранее разработанные физическая модель и измерительная установка [5], подвергшиеся модернизации (рис. 1). Для определенности в качестве препятствия на рисунке изображен стеноз, однако исследования проводились и с использованием других нерегулярностей.

Модель состоит из трубки 1, которая с помощью монтажных колец 2 и 8 последовательно соединена с межстенозной трубкой 4 и измерительной трубкой 3. Последняя, в свою очередь, с помощью монтажного кольца 14 соединена с рупором 5. Внутри трубки 1 расположен детурбулизатор 6, представляющий собой слой медицинской ваты, помещенный в тонкую капроновую ткань. Между трубками 1 и 3 расположен участок, моделирующий стеноз и препятствие в виде второго стеноза (диафрагмы 7 и 9), которые в общем случае имеют отверстия с разными диаметрами. Расстояние между стенозами регулируется за счет изменения длины межстенозной трубки 4. В трубке 1 до и после детурбулизатора 6 имеются отводы (патрубки) 10, соединенные с манометрами P_1 и P_2 .

В измерительной трубке 3 находится патрубок 11, в котором расположен электретный микрофон М. Микрофон соединен электрическим кабелем с электронным усилителем сигналов УС, на выходе которого последовательно подключены электронные фильтры Ф, аналого-цифровой преобразователь АЦП и персональный компьютер ПК. Кроме того, на выходе отверстия нижней по потоку диафрагмы 9 размещен датчик термоанемометра 13, соединенный с термоанемометром DISA.

Остановимся на функциональном назначении отдельных элементов и принципе работы установки. К левому концу трубки 1 подсоединяется источник сжатого воздуха. Создаваемое источником давление контролируется манометром P_1 . Далее воздух проходит через детурбулизатор 6 и попадает в правую половину трубки 1, где давление контролируется манометром P_2 . Основное назначение детурбулизатора состоит в уменьшении турбулентности потока (которая может вызываться источником), выравнивании скорости потока по сечению трубки 1 и акустической изоляции измерительной трубки 3 от возможных шумов источника. После прохождения через стенозную часть модели поток попадает в измерительную трубку 3, где с помощью микрофона М регистрируются ге-

нерируемые им звуковые колебания и пульсации давления. Чтобы убрать возможную паразитную турбулизацию потока на отверстии, соединяющем трубку 3 с патрубком 11, последнее закрыто тонким слоем ткани 12. Из трубки 3 поток попадает в рупор 5, где его средняя скорость падает благодаря быстро увеличивающейся площади поперечного сечения рупора. Кроме этого, рупор согласует акустические импедансы трубок 1 и 3 с акустическим импедансом окружающего пространства, что в совокупности с детурбулизатором 6 практически исключает появление стоячих волн во внутреннем объеме трубок 1 и 3, которые также могут оказаться помехой при регистрации звуковых колебаний, генерируемых потоком. С помощью датчика 13 и термоанемометра *DISA* регистрируется средняя скорость потока на выходе стенозного участка.

Методически процесс эксперимента разделялся на два этапа. На первом этапе оценивалось пороговое значение скорости потока, при котором впервые начинал возникать тональный звук, и фиксировалась начальная частота этого звука. На втором этапе давление воздуха на входе трубки 1 увеличивалось таким образом, чтобы скорость потока плавно (и линейно во времени) изменялась от нуля до некоторого значения, при котором происходил срыв и исчезновение тональных звуковых колебаний. В течение этого интервала времени с помощью микрофона *M* и приемного тракта звуковой сигнал преобразовывался в электрический, усиливался, фильтровался, оцифровывался, после чего записывался на жесткий диск компьютера в виде *wave*-файла. Полученная таким образом фонограмма в дальнейшем обрабатывалась с помощью процедуры быстрого преобразования Фурье, после чего строились сонограммы². Строго говоря, сонограмма – это характеристика, показывающая как изменяется мгновенный спектр звукового сигнала во времени [26]. Нас же интересовали изменения мгновенного спектра звукового сигнала в зависимости от скорости потока. Однако, учитывая, что в наших экспериментах скорость потока линейно нарастала с течением времени, представленные ниже зависимости мгновенного спектра звуковых сигналов от скорости потока вполне допустимо считать сонограммами.

В заключение следует отметить, что использованная установка и методика практически полностью заимствованы из [5]. Новым элементом является лишь термоанемометр, предназначенный для измерения скорости потока.

²Сонограмма – спектрограмма звуковых сигналов.

3. ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

Экспериментальные исследования проводились в достаточно широком диапазоне геометрических характеристик модели и физических параметров потока. В частности, отношение D_1/D_2 изменялось от 9 до 1.8, а отношение L_1/D_2 – от 0.17 до 6.3 (см. рис. 1). Скорость потока V_2 в отверстии первого стеноза изменялась от 0.5 до 70 м/с. В целом все измерения находились в диапазоне чисел Рейнольдса от 10^2 до 10^4 .

3.1. Препятствие в виде одиночного стеноза

3.1.1. Отверстия расположены в центрах стенозов и одинаковы

Обратимся к рис. 2–6, на которых представлены сонограммы, характерные для модели воздухоносного пути с двумя стенозами. При этом первый стеноз играет роль “сопла”, где поток ускоряется и формируется струя, а второй стеноз – роль “препятствия”, на которое струя натекает, образуя вихри. Рассмотрим ситуацию, когда размер отверстий обоих стенозов одинаков ($D_2 = D_3$).

Даже беглый анализ представленных сонограмм позволяет убедиться, что в рассматриваемой аэродинамической системе поток действительно может достаточно эффективно генерировать тональные звуковые колебания. Это подтверждается как присутствием четких дискретных спектральных составляющих, имеющих значительные амплитуды³, так и тем, что их частота практически линейно растет с ростом скорости потока. Именно эти признаки являются наиболее характерными и определяющими, когда мы имеем дело с аэродинамическими источниками звуковых колебаний [15, 19]. Вместе с тем, хорошо видно, что наряду с дискретными спектральными составляющими присутствует и широкополосный шум, уровень которого также повышается с ростом скорости потока. Причины его возникновения в целом известны (см., например, [5]). Они обусловлены пульсациями давления в турбулизованном потоке в области за вторым стенозом.

Анализ сонограмм, приведенных на рис. 2–6, позволил установить ряд общих характерных черт, присущих воздухоносным путям с двумя стенозами.

- Тональные звуковые колебания начинают во-

³Тональные звуковые колебания имели сравнительно большие уровни громкости и поэтому не только весьма четко прорисовывались на сонограммах, но и прекрасно воспринимались на слух в процессе записи фонограмм.

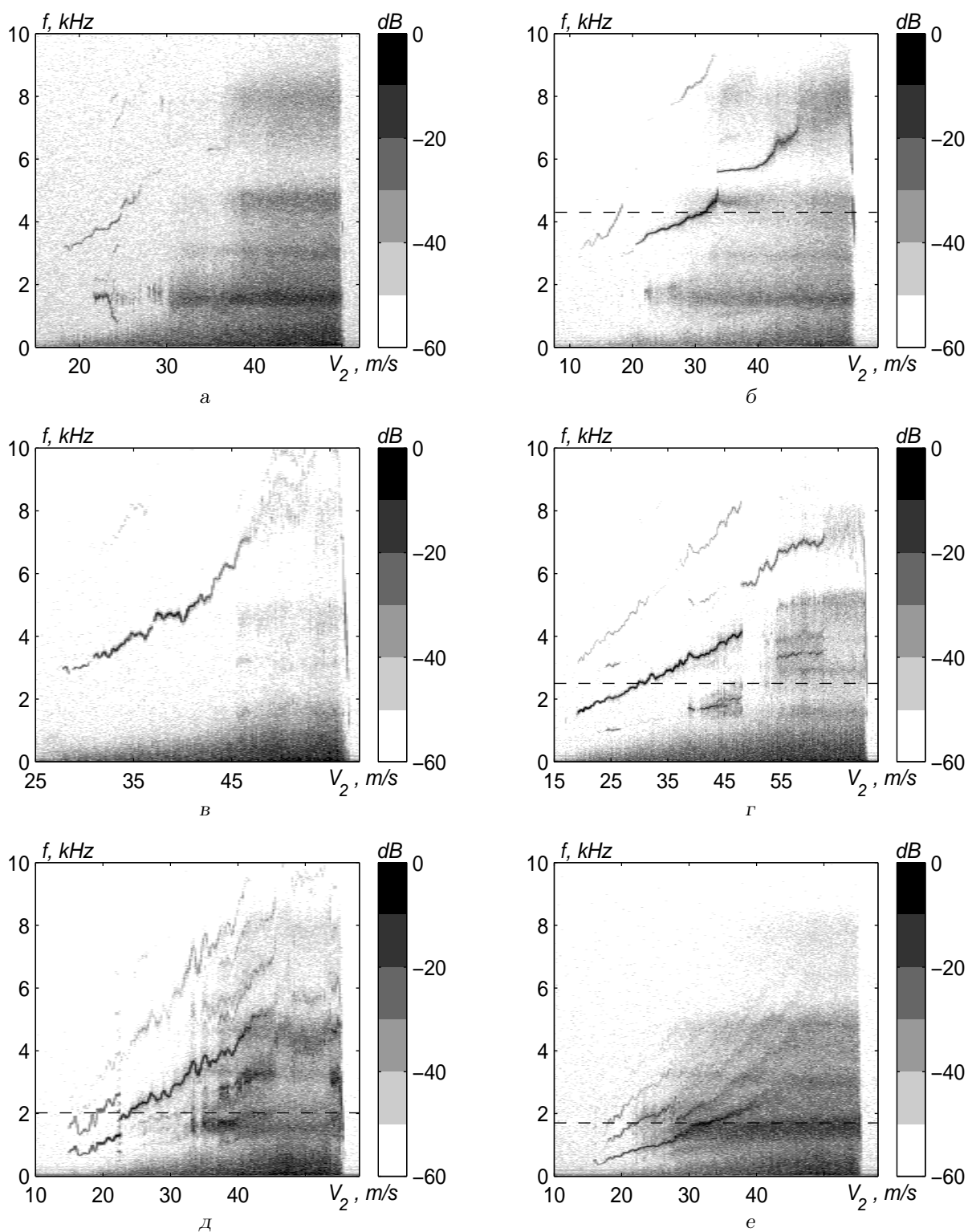


Рис. 2. Сонограммы для $D_1/D_2 = D_1/D_3 = 9$:
 а-е - $L_1/D_2 = 0.4, 1.0, 1.8, 2.9, 4.5, 6.3$ соответственно

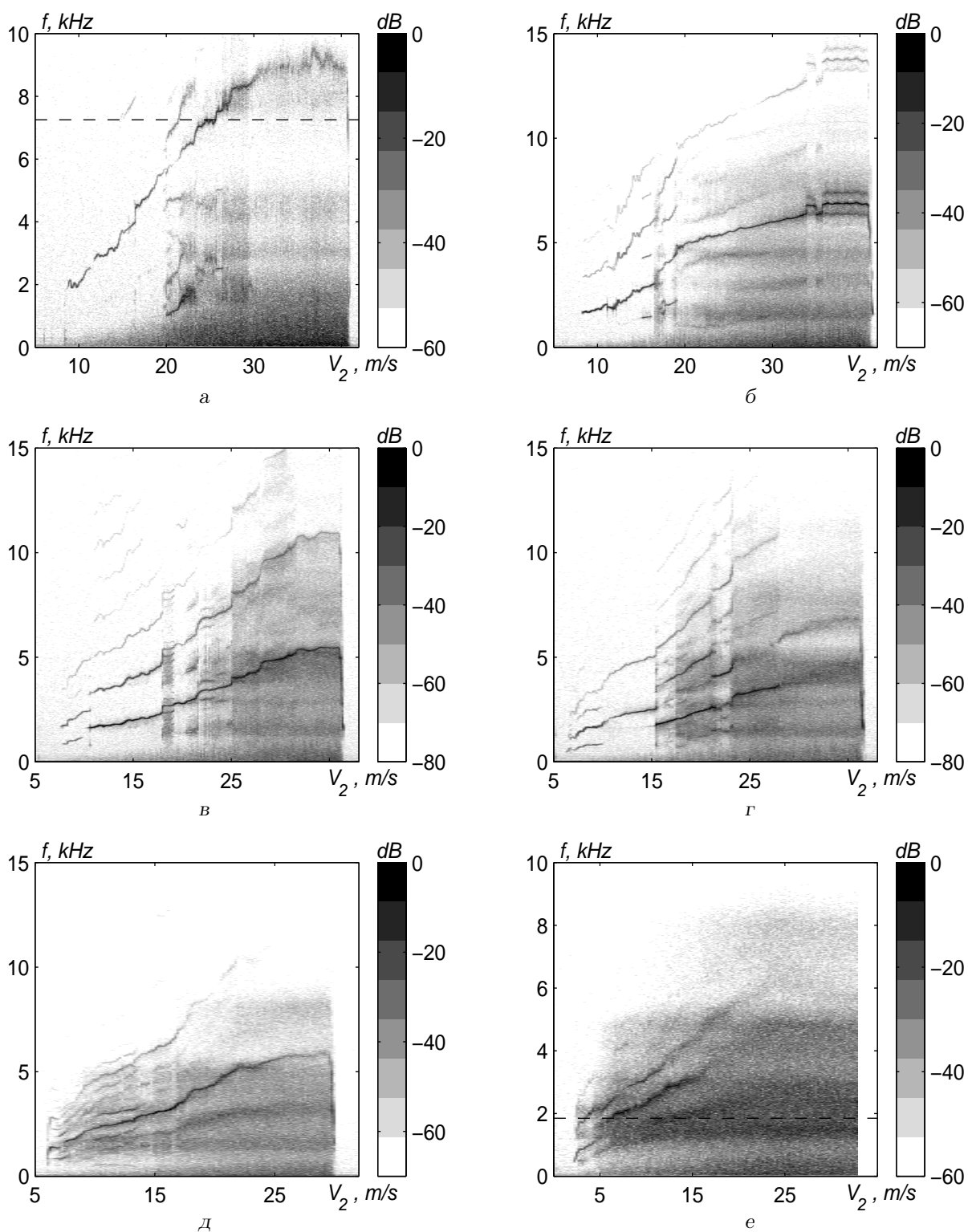


Рис. 3. Сонограммы для $D_1/D_2 = D_1/D_3 = 6$:
 а-е - $L_1/D_2 = 0.265, 0.67, 1.2, 1.93, 3.0, 4.2$ соответственно

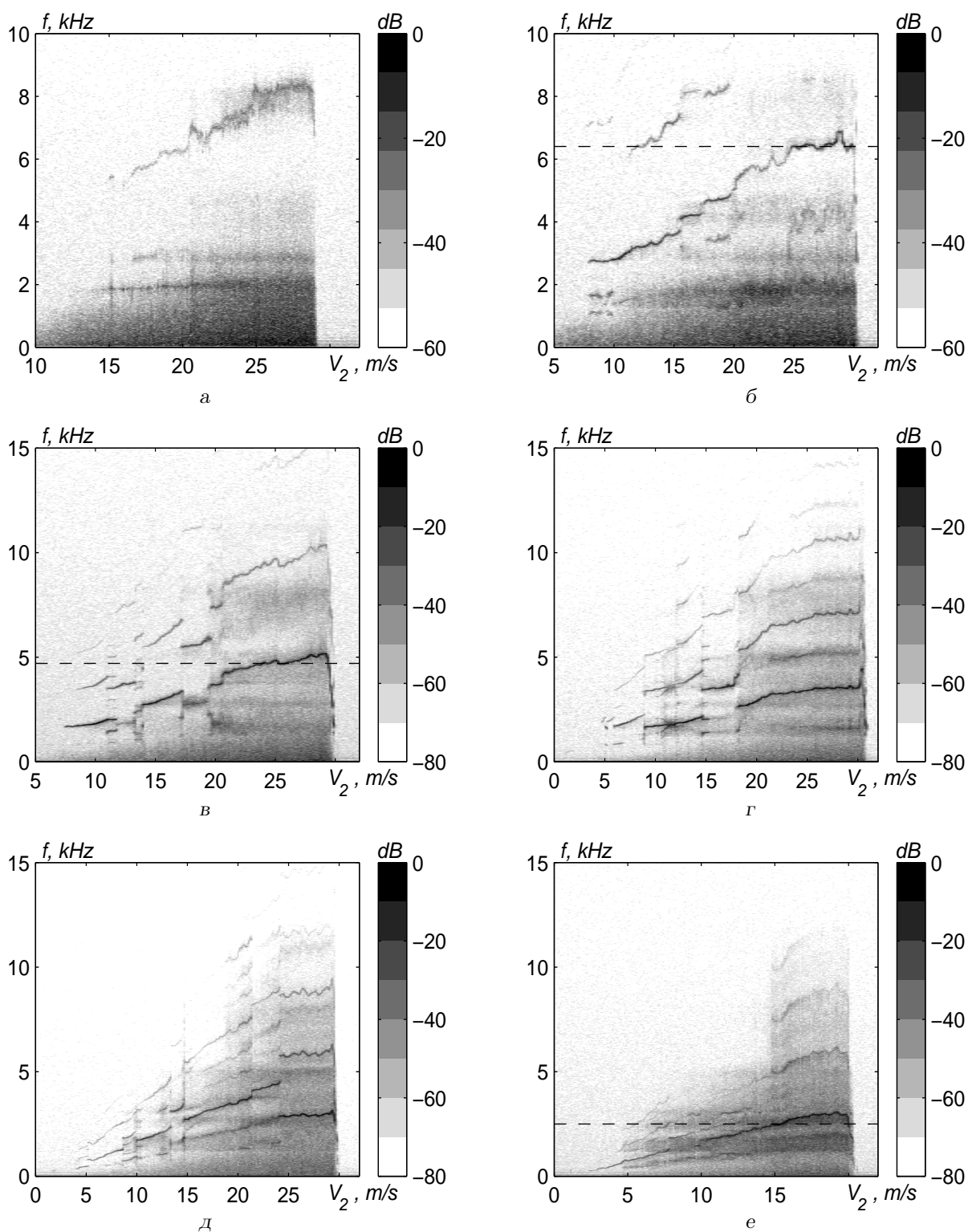


Рис. 4. Сонограмма для $D_1/D_2 = D_1/D_3 = 3.9$:
 а-е - $L_1/D_2 = 0.173, 0.435, 0.78, 1.25, 1.95, 2.75$ соответственно

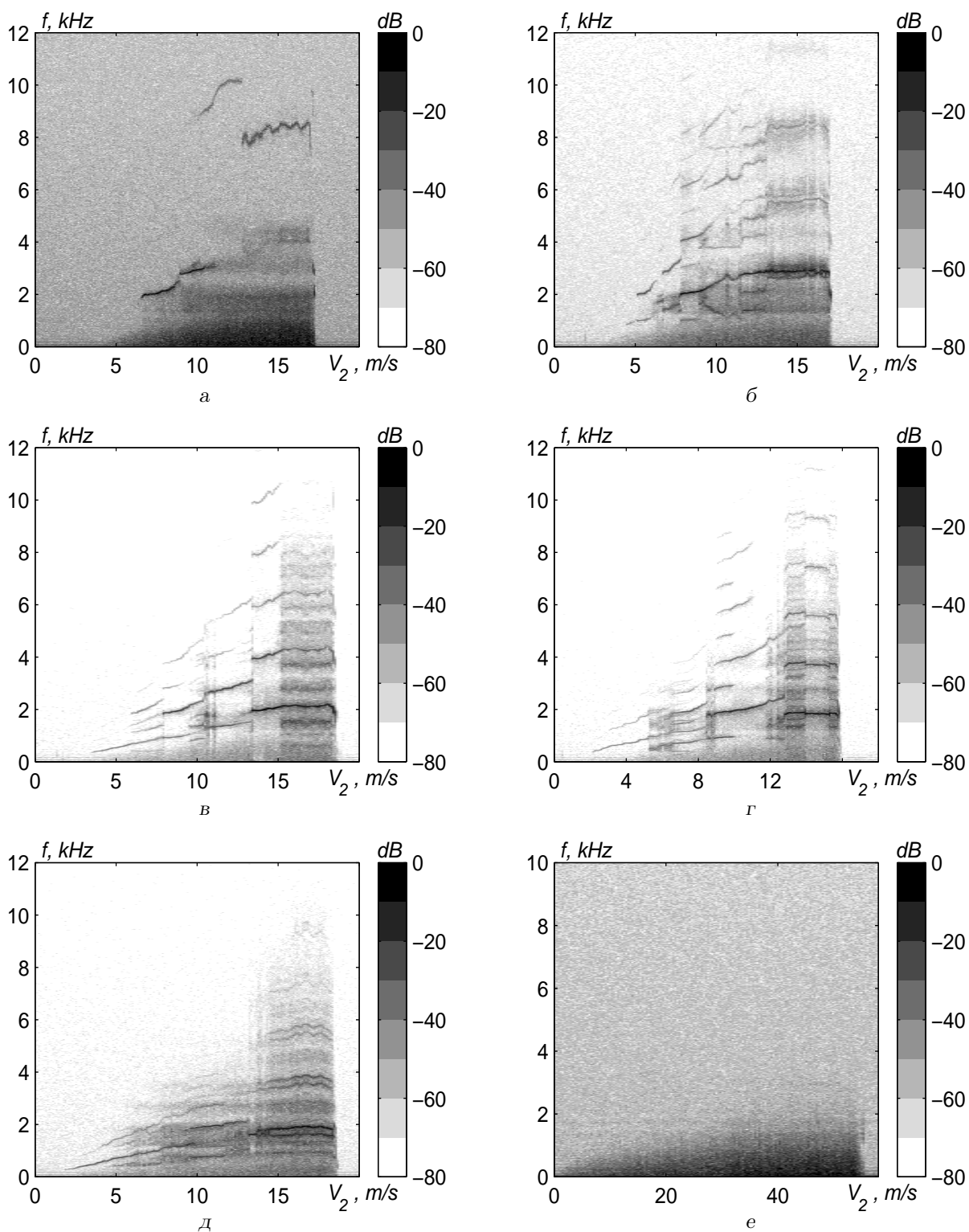


Рис. 5. Сонограмма для $D_1/D_2 = D_1/D_3 = 2.57$:
 а-д - $L_1/D_2 = 0.286, 0.52, 0.83, 1.28, 1.8$ соответственно;
 е - $D_1/D_2 = 9$ при отсутствии второго стеноза

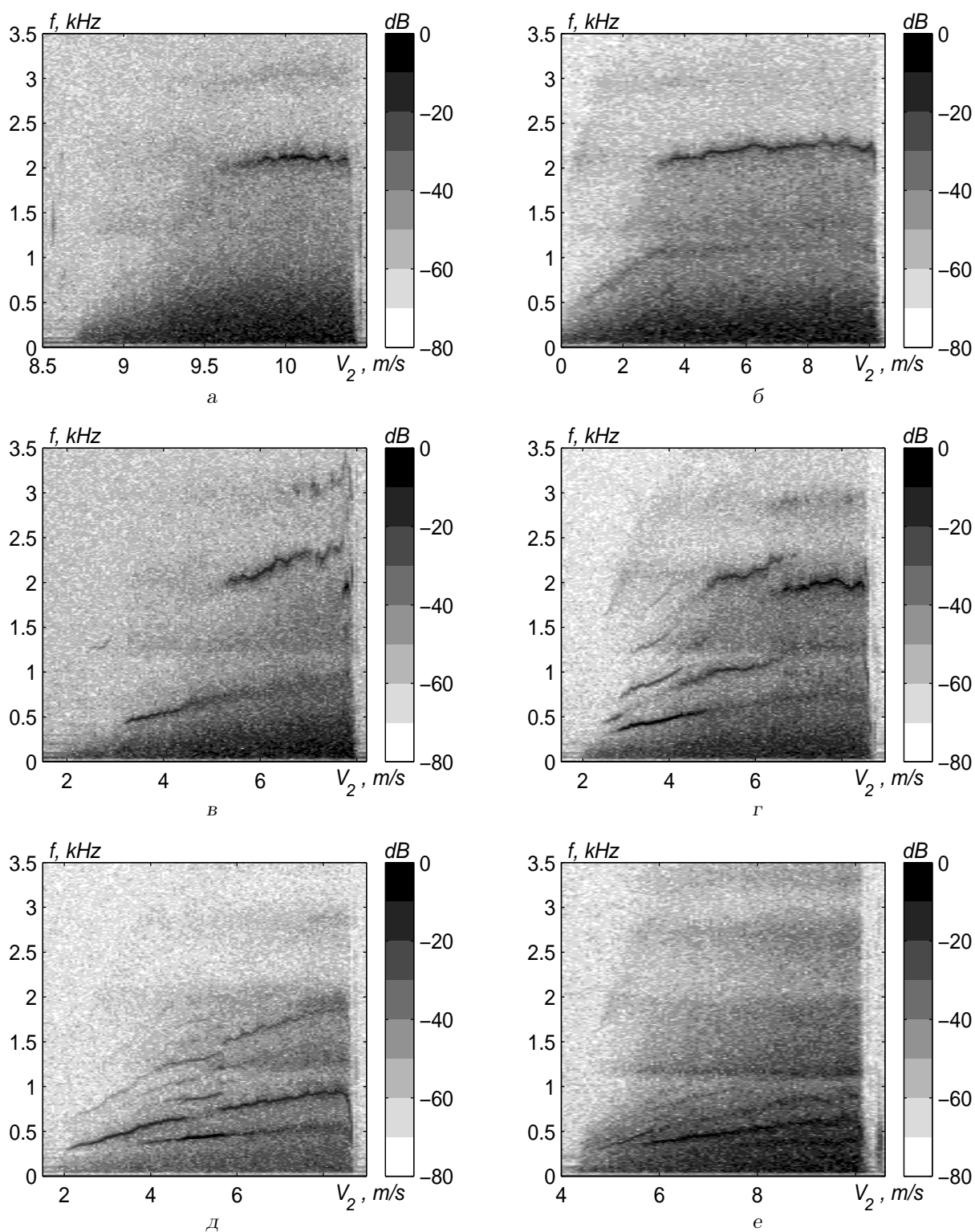


Рис. 6. Сонограмма для $D_1/D_2 = D_1/D_3 = 1.8$:
 а-е - $L_1/D_2 = 0.2, 0.36, 0.58, 0.9, 1.26, 2.6$ соответственно

зникать только при достижении определенных пороговых значений скорости потока $V_{2,p}$ в струе, вытекающей из первого стеноза. Обобщение полученных данных по пороговым скоростям позволило установить, что пороговые числа Рейнольдса $Re_p = V_{2,p} D_2 / \nu$ (ν – кинематическая вязкость воздуха) в целом имеют тенденцию к снижению по мере увеличения относительного расстояния между стенозами (рис. 7, а).

- Пороговая частота f_p тональных звуковых колебаний, возникающих при достижении пороговых скоростей потока, имеет выраженную тенденцию к снижению с ростом L_1/D_2 (рис. 7, б).
- Пороговое число Струхалия $Sh_p = f_p L_1 / V_{2,p}$, по крайней мере в зоне $L_1/D_2 \leq 3$, имеет четкую тенденцию к росту с увеличением относительного расстояния между стенозами (рис. 7, в).

Любопытно, что число Струхалия можно представить и как отношение некоторых временных интервалов. Действительно, $f_p = 1/T_p$, где T_p – период звуковых колебаний, а $L_1/V_{2,p} = T_L$ – время, за которое частица среды движущегося потока пробегает межстенный участок. Тогда $Sh_p = T_L/T_p$, т. е. изначально выбранное только из соображений размерности число Струхалия становится более физичным и показывает как соотносится время пробега потоком межстенного участка с периодом возбуждаемого этим потоком звукового колебания.

Перейдем к более детальному анализу сонограмм, представленных на рис. 2–6. Как видно, они отличаются очень большим спектральным разнообразием. Попробуем их каким-либо образом классифицировать. Прежде всего, следует отметить, что при относительно малом расстоянии между стенозами $L_1/D_2 < 0.25 \div 0.4$ спектр дискретных составляющих достаточно беден – присутствует преимущественно один чистый тон, без гармоник (см. рис. 2, а–б, а). С ростом величины L_1/D_2 спектральная палитра становится более насыщенной. У основных тонов появляются гармоники (обертоны, кратные целым числам), количество которых может достигать трех и более (см. рис. 2, г–е, рис. 3, б–г, рис. 4, б–е и др). В некоторых случаях наблюдается появление субгармоник, частоты которых составляют половину частоты основного тона или $3/4$ частоты его первой гармоники. Например, на рис. 2, г субгармоники четко просматриваются при $V_2 \approx 25$ м/с и $V_2 \approx 42$ м/с, на рис. 3, г – при $V_2 \approx 7$ м/с, на рис. 5, д – при

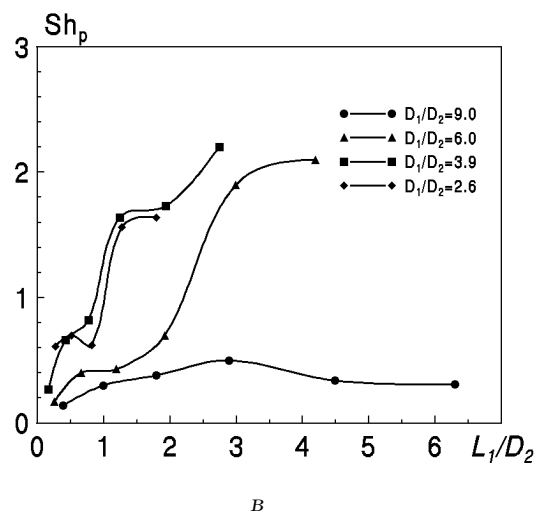
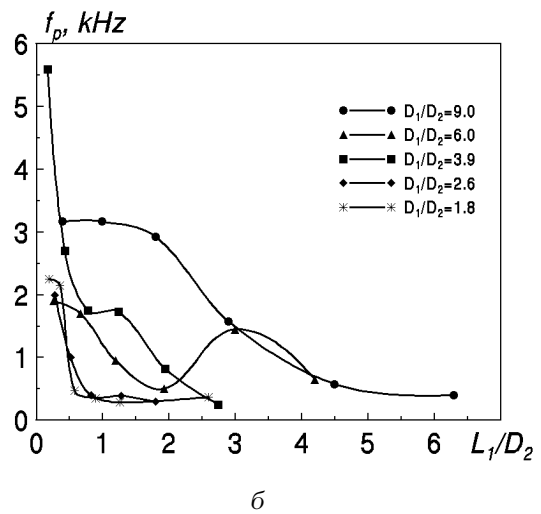
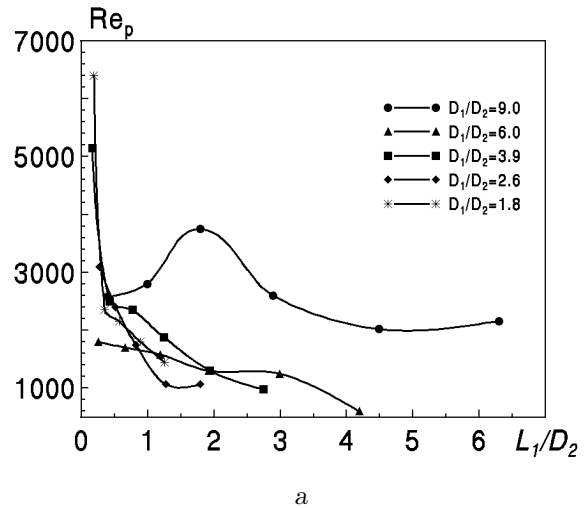


Рис. 7. Пороговые значения:
а – чисел Рейнольдса, б – частот тона,
в – чисел Струхалия

$V_2 \approx 5.6$ м/с и т. д.

Еще одной характерной чертой представленных сонограмм являются резкие изменения частот основного тона и его гармоник (до полутора раз) на фоне плавного непрерывного возрастания скорости потока. В результате этого частоты основного тона и его гармоник принимают новые (большие или меньшие) значения. Примечательно, что эти изменения могут происходить неоднократно в процессе нарастания скорости потока (см., например, рис. 2, д при $V_2 \approx 23$ м/с, рис. 3, г при $V_2 \approx 15$ м/с, рис. 4, в–д, рис. 5, в, г и др). Участки между соседними резкими изменениями частоты, где значение частоты тонального сигнала плавно растет с увеличением скорости потока, называют стадиями или этапами (stages), а сами резкие изменения – скачками частоты (abrupt jumps) [15, 22]. Можно предположить, что такие резкие и внезапные перестройки частоты как-то связаны с изменением фазовых соотношений в обратной связи между процессами, идущими в окрестности препятствия и в области корня струи.

На представленных сонограммах можно встретить и более экзотические явления. Например, на рис. 5, д в области значений $V_2 = 13 \div 18$ м/с наблюдаются два тона примерно равной амплитуды и отличающиеся по частоте всего лишь на 11 % (своеобразный звуковой дуплет). При этом подобные же дуплеты образуют и три их высшие гармоники.

Как уже отмечалось, при наличии двух стенозов, наряду с тональными звуковыми колебаниями, поток генерирует сравнительно широкополосный шум, обусловленный пульсациями давления в турбулизованном потоке за нижним по потоку стенозом. Представляет определенный интерес сравнение спектра этого шума со спектром шума, генерируемого потоком при наличии только одного стеноза (на рис. 5, е представлена соответствующая сонограмма при $D_1/D_2 = 9$). Как и следовало ожидать, в рассматриваемом диапазоне скоростей потока спектр для одного стеноза не имеет каких-либо особенностей – для всех значений скоростей уровни плавно спадают с ростом частоты. Этот факт хорошо согласуется с результатами, приведенными в [5]. В отличие от этого, при двух стенозах спектр шума спадает с ростом частоты не плавно, а волнообразно, причем такое поведение почти не зависит от геометрических характеристик стенозирования участка. Чтобы более детально рассмотреть различия в спектрах шума, на рис. 8, е приведены мгновенные спектры для двух указанных случаев при одинаковой скорости потока $V_2 \approx 62$ м/с. Видно, что до 2 кГц оба спектра

практически совпадают. Однако, начиная с 2 и до 8 кГц, отличия в спектральных уровнях становятся существенными и могут достигать 15 дБ. Возможно, что повышение уровня шума и его структуризация вдоль оси частот связаны с пульсациями вытекающей из второго стеноза струи воздуха, обусловленными аэродинамическими процессами в межстенозной области.

В заключение следует отметить, что межстенозный участок модели с точки зрения акустики можно рассматривать как резонатор Гельмгольца (см. рис. 1). Действительно, он представляет собой цилиндрический объем воздуха с длиной L_1 и диаметром D_1 , а также два горлышка (отверстия в диафрагмах). Учитывая, что в диапазоне частот, генерируемых потоком тональных звуковых колебаний, геометрические размеры цилиндрического объема и горлышек намного меньше длины волны, цилиндрический объем воздуха допустимо считать сосредоточенной упругостью, а объемы воздуха в горлышках – сосредоточенными массами. Исходя из этого, нетрудно оценить собственную частоту такого резонатора [27]. Как известно [19, 22], акустические резонаторы играют в процессах генерирования звука потоком второстепенную роль. Тем не менее, если собственная частота резонатора совпадает с частотой звуковых колебаний, вызванных потоком, то амплитуда последних может заметно возрасти.

Мы оценили собственные частоты межстенозных участков как резонаторов Гельмгольца и нанесли их значения в виде штриховых линий, параллельных оси абсцисс, на рис. 2–6. Как нетрудно заметить, в некоторых случаях резонаторы действительно способствуют некоторому увеличению амплитуды звуковых колебаний генерируемых потоком (см., например, рис. 2, б, г–е, рис. 3, а, е и рис. 4, б, в, е).

3.1.2. Отверстия в стенозах сдвинуты относительно друг друга

Выше исследован случай, когда отверстия в стенозах одинаковы и находятся в их центрах. Перейдем к случаям, когда отверстия в стенозах одинаковы, но сдвинуты относительно друг друга в плоскости, нормальной к продольной оси модели. На рис. 8, а, б представлены сонограммы соответственно для двух случаев:

- 1) отверстие в первом стенозе расположено в центре, а во втором сдвинуто от центра на расстояние $1.7D_2$;
- 2) отверстие в первом стенозе сдвинуто от цен-

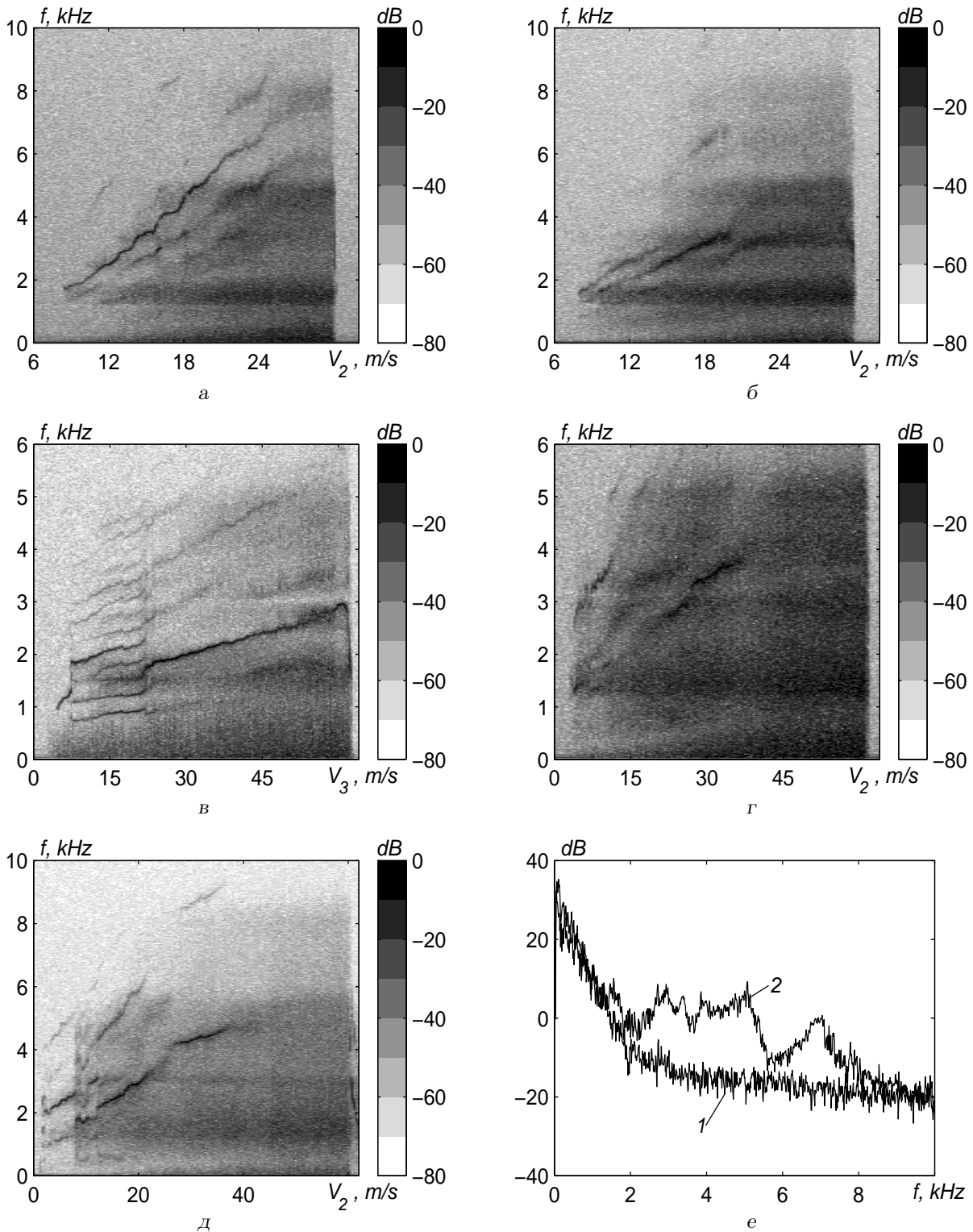


Рис. 8. Сонограммы:

а - $D_1/D_2 = D_1/D_3 = 6$, $L_1/D_2 = 5.8$, отверстие в первом стенозе - в центре, а во втором - сдвинуто;
 б - $D_1/D_2 = D_1/D_3 = 6$, $L_1/D_2 = 5.8$, отверстие в первом стенозе - сдвинуто, а во втором - в центре;
 в - $D_1/D_2 = 3.9$, $D_1/D_3 = 9$, $L_1/D_3 = 2.9$; г - $D_1/D_2 = 9$, $D_1/D_3 = 3.9$, $L_1/D_2 = 2.9$;
 д - $D_1/D_2 = 9$, $D_1/D_3 = 6$, $D_1/D_4 = 3.9$, $L_1/D_2 = 2.9$, $L_2/D_2 = 1.8$;
 е - мгновенные спектры для $D_1/D_2 = 9$, $L_1/D_2 = 5.8$, $Re = 0.85 \cdot 10^4$,
 1 - один стеноз, 2 - два стеноза

тра на ту же величину, а во втором находится в центре.

Сравнивая эти сонограммы между собой, а также с сонограммой для случая, когда отверстия в обоих стенозах расположены по центру (см. рис. 2, г), можно сделать три важных вывода. Во-первых, несимметрия (несоосность) расположения отверстий в стенозах в принципе не приводит к исчезновению или срыву тональных звуковых колебаний. Во-вторых, спектральная палитра существенным образом зависит от расположения отверстий в стенозах относительно друг друга. В-третьих, генерация тональных звуковых колебаний при несоосном расположении отверстий возникает при значительно меньших скоростях потока, чем при их соосном расположении.

Представленный анализ акустических и аэродинамических свойств системы с двумя стенозами и одинаковыми в них отверстиями оказался бы не полным без оценки аэродинамического сопротивления ξ такой системы. Нас в первую очередь интересовал вопрос: насколько отличаются сопротивления систем, содержащих только один стеноз, два стеноза с одинаковыми отверстиями в центрах стенозов и два стеноза с одинаковыми, но несоосно расположенными отверстиями. Разумеется, для всех трех случаев отверстия в стенозах должны иметь одинаковый размер. С помощью методики, изложенной в [5], мы оценили эти сопротивления экспериментально. В результате получены следующие результаты:

- один стеноз – $\xi = 1.08$;
- два стеноза с отверстиями в центре – $\xi = 1.26$;
- два стеноза со смещенными относительно продольной оси отверстиями – $\xi = 2.5$.

По-видимому, такого результата и следовало ожидать, поскольку увеличение количества препятствий на пути потока (и, в особенности, искривление направления его движения) должно неизбежно приводить к общему увеличению сопротивления.

3.1.3. Отверстия расположены в центрах стенозов, но не одинаковы

Рассмотрим случай, когда отверстия в стенозах не одинаковы (см. рис. 8, в, г). Первый график соответствует нижнему по потоку стенозу, имеющему отверстие с меньшим диаметром, чем у верхнего стеноза, а второй – обратной ситуации. При этом расстояние между стенозами в обоих

случаях оставалось одинаковым. Как видно, соответствующие спектральные картины резко разнятся. Спектральная палитра у первого случая гораздо богаче. Действительно, на рис. 8, в в области $5 < V_3 < 23$ м/с имеется необычный звуковой сигнал, спектр которого состоит из более чем дюжины составляющих с дробным соотношением частот:

$$1 : 1.33 : 1.66 : 2 : 2.26 : 2.66 : 2.94 : \\ : 3.33 : 3.66 : 3.94 : 4.55 : 4.89 : \dots$$

На слух он воспринимается как неприятный “жужжащий” звук. В работе [12], в которой анализируются спектры различных типов сухих хрипов, указано, что спектр так называемых “жужжащих” хрипов как раз и характеризуется обилием составляющих с дробным соотношением частот.

Во втором же случае спектральная картина сравнительно бедна (см. рис. 8, г). Можно предположить, что основной причиной этого является то, что диаметр вытекающей из первого стеноза струи почти в два раза меньше диаметра отверстия второго стеноза. Таким образом, тонкая струя “проскакивает” второй стеноз, слабо взаимодействуя с краями его отверстия. Это не способствует эффективному вихре- и звукообразованию.

Уместно более подробно остановиться на особенностях механизма возбуждения звуковых колебаний в рассмотренных аэродинамических системах типа стеноз – струя – стеноз. Учитывая результаты работ [14–16, 18, 19, 24, 25] и собственный опыт, сценарий процесса возбуждения звука опишем следующим образом. Струя, вышедшая из первого стеноза, постепенно расширяется и, достигнув второго стеноза, разделяется на две части (см. рис. 1). Одна часть потока проходит через отверстие второго стеноза, а другая (обратный поток) – возвращается в межстенозный объем, закручиваясь в тороидальный вихрь. “Накачка” межстенозного объема обратным потоком будет приводить к росту давления в нем, поскольку воздух хорошо сжимаем, а струя, обладая определенной жесткостью, “закупоривает” отверстие второго стеноза и не дает выйти воздуху, накопившемуся в межстенозном объеме. Достигнув некоторой критической величины, давление сожмет струю и даст возможность избытку воздуха покинуть межстенозный объем через отверстие второго стеноза. Как только давление в межстенозном объеме упадет, все повторится сначала. Таким образом, в межстенозном объеме будет циклически повышаться и понижаться давление, т. е. будет реализоваться монопольный источник звуковых колебаний, как известно, являющийся наиболее эффективным.

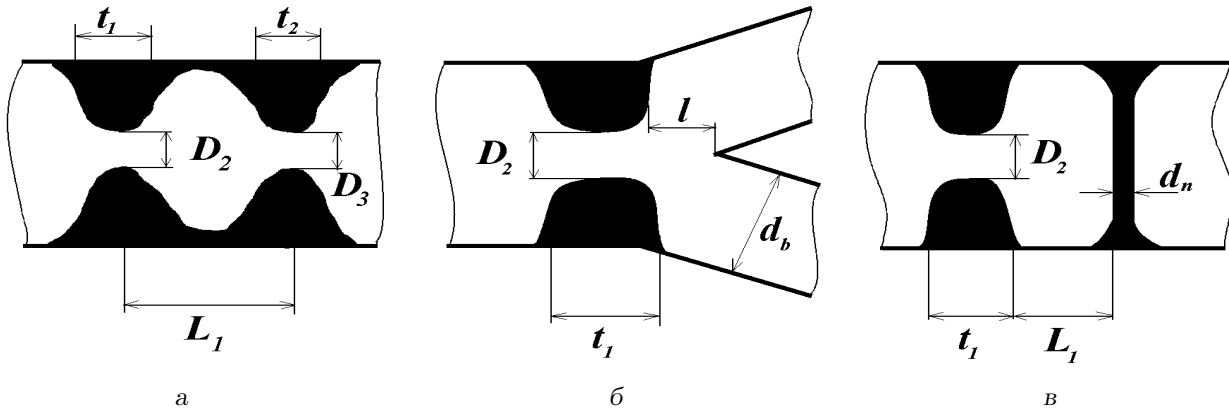


Рис. 9. Модели некоторых типов стенозов и препятствий:

а – два стеноза нерегулярной формы, б – стеноз вблизи бифуркации воздухоносного пути, в – стеноз вблизи нити

Заметим, что описанный механизм звукообразования характерен и для свистков низкого давления (например, свистка Гальтона [18]), которые весьма эффективно преобразуют энергию потока в энергию звуковых колебаний (коэффициент полезного действия достигает $25 \div 30 \%$). Естественно, что такая высокая эффективность при малых размерах свистков, по сравнению с длиной излучаемых ими волн, может быть достигнута исключительно за счет реализации источника монопольного типа.

3.2. Препятствие в виде двойного стеноза

Мы моделировали также случаи мультистеноза в воздухоносных путях. При этом анализ полученных сонограмм показал, что подобное усложнение рассматриваемой аэродинамической системы не приводит к появлению каких-либо новых эффектов, связанных с звукообразованием. В качестве примера на рис. 8, д представлена сонограмма для случая трех стенозов. Первый по потоку стеноз, как обычно, формирует струю, а два других играют роль препятствия для нее. Как нетрудно заметить, все атрибуты, характерные для изученных выше сонограмм, присутствуют и здесь: имеются дискретные спектральные составляющие, частоты которых растут с ростом скорости потока; гармоники и субгармоники; резкие скачки частоты.

3.3. Форма стенозов нерегулярна

Выше, чтобы выявить основные закономерности спектрально-временных характеристик звуков, генерируемых потоком в воздухоносных путях со

стенозами, мы в значительной мере идеализировали форму стенозов, используя в экспериментах тонкие диафрагмы с круглыми отверстиями. В действительности же тягучая мокрота, появляющаяся при различных патологиях воздухоносных путей бронхиального дерева, вряд ли будет формировать стенозы такой классической формы. К сожалению, в литературе отсутствуют какие-либо сведения о возможных конфигурациях стенозов. Тем не менее, можно предположить, что формы реальных стенозов имеют некоторую “расплывчатость” и нерегулярность поверхности, что в определенной мере характерно для процесса растекания сильно вязких жидкообразных полимеров. В связи с этим возникает вопрос: будут ли сохраняться выявленные выше спектрально-временные характеристики при замене стеноза в виде тонкой диафрагмы с отверстием на стеноз, форма которого (как нам представляется) более приближена к естественной?

Для ответа на него мы смоделировали из пластилина две возможных конфигурации стеноза (рис. 9, а) и провели соответствующую регистрацию сонограмм (рис. 10, а, б). В одном варианте отверстия в стенозах были почти круглыми и находились приблизительно в центрах. Другой вариант отличался наличием в первом стенозе второго отверстия, несколько смещенного от центра. Анализируя сонограммы для обоих вариантов, нетрудно убедиться, что даже радикальное изменение формы стенозов существенно не повлияло на способность такой системы генерировать тональные звуковые колебания при прохождении через нее потока воздуха. Хотя конкретные положения спектральных составляющих на плоскости частота – скорость несколько изменились, главные ха-

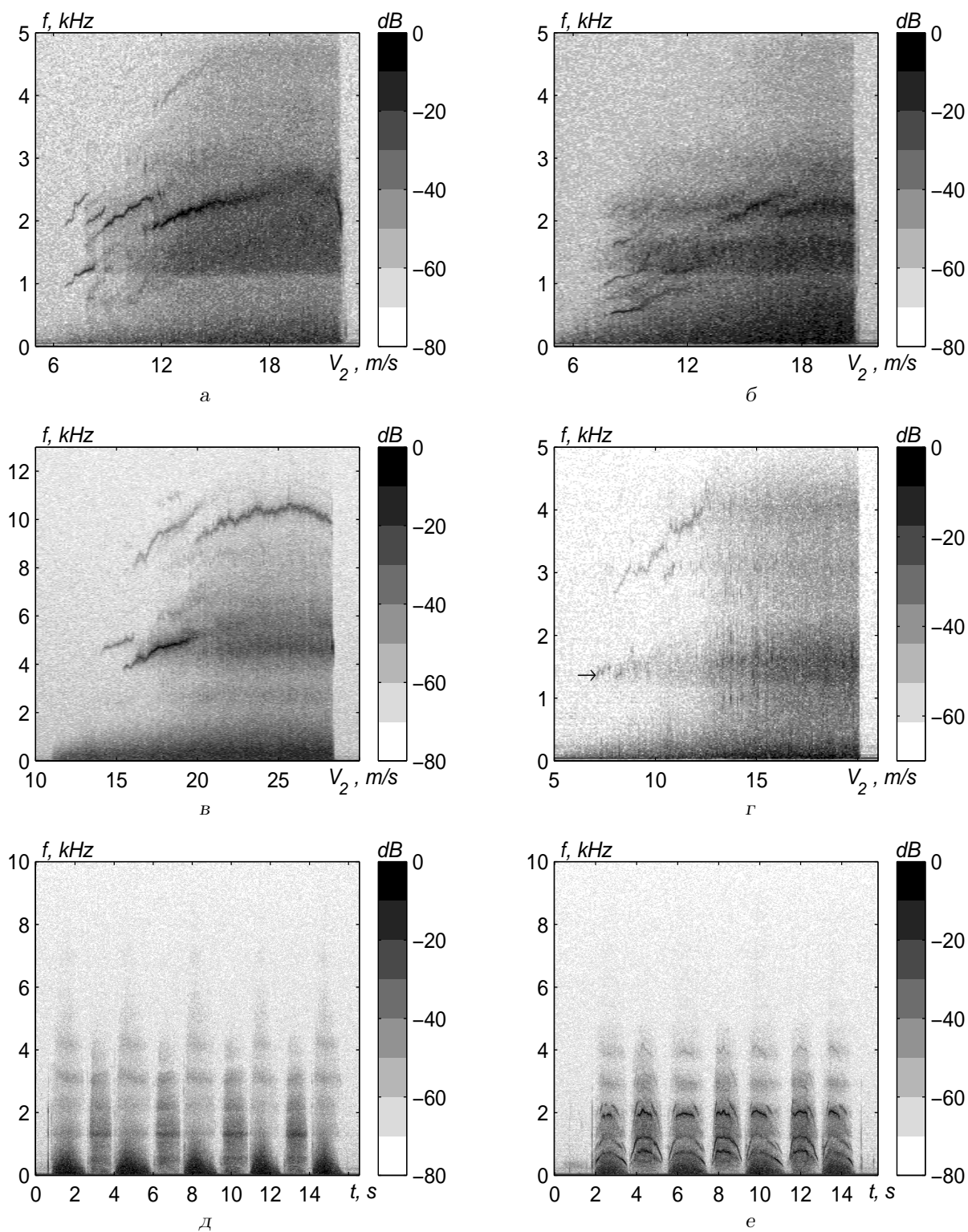


Рис. 10. Сонограммы:

а – два стеноза при $D_1/D_2 = D_1/D_3 = 4.5$, $L_1/D_2 = 1.9$, $t_1/D_2 = 1.6$, $t_2/D_2 = 1.45$;
 б – то же, но в первом стенозе два отверстия, одно в центре, а второе с диаметром $D_2^1 = 0.7D_2$
 сдвинуто от центра на расстояние $1.1D_2$; в – стеноз и бифуркация $D_1/D_2 = 5.2$, $t_1/D_2 = 2.1$, $l/D_2 = 1.6$, $d_b/D_1 = 0.67$;
 г – стеноз и нить $D_1/D_2 = 4.5$, $L_1/D_2 = 2$, $d_n/D_2 = 0.5$, $t_1/D_2 = 2.1$;
 д, е – имитация дыхательных шумов при наличии одного и двух стенозов
 для $D_1/D_2 = 1.8$, $L_1/D_2 = 0.9$ соответственно

ктерные особенности сонограмм остались такими же, как и для стенозов в виде классических диафрагм.

3.4. Препятствие в виде бифуркации воздухоносного пути

Очевидно, что при патологиях воздухоносных путей стеноз может сформироваться и вблизи их разветвления (бифуркации). Тогда роль препятствия на пути струи, вытекающей из отверстия стеноза, будет играть нижняя часть бифуркации, имеющая в сечении в целом клиновидную форму. В литературе по аэрогидромеханике неоднократно рассматривались системы типа сопло – струя – клин (см., например, [15]) и было показано, что они относительно эффективно преобразуют энергию потока в звуковую энергию. Естественно предположить, что это будет иметь место и в рассматриваемом случае. Мы смоделировали бифуркацию воздухоносного пути и разместили там стеноз из пластилина, как показано на рис. 9, б. Полученная в результате продувки системы сонограмма рис. 10, в четко показала, что такое расположение стеноза действительно обеспечивает появление тональных звуковых колебаний. Заметим, что в отличие от других рассмотренных случаев, натекание потока на бифуркацию обуславливает появление более высокочастотных дискретных спектральных составляющих.

3.5. Препятствие в виде нити

Рассмотрим еще один вариант препятствий – нити из вязкой тягучей мокроты, концы которых могут быть закреплены на противоположных сторонах стенки воздухоносного пути. Если предположить, что вблизи такой нити образовался стеноз, то выходящая из него струя, обтекая препятствие, вызовет образование вихрей. Периодически срываясь с поверхности нити, вихри могут порождать периодические импульсы сжатий и разрежений, которые и обуславливают появление звуковой волны. Этот гидроаэродинамический процесс подробно описан, например, в [19]. Следует отметить, что такой относительно простой сценарий реализуется в тех случаях, когда поперечные размеры струи существенно больше поперечных размеров препятствия (в нашем случае, нити). Если поперечные размеры струи и препятствия соизмеримы, то возникает дополнительный эффект, способствующий звукообразованию – поперечные колебания струи, вызванные как обратной связью, о которой мы уже упоминали выше,

так и естественной несимметрией системы стеноз – струя – препятствие.

Мы смоделировали стеноз и нить, как показано на рис. 9, в, используя в качестве материала пластилин. Полученная в результате продувки такой модели сонограмма изображена на рис. 10, г. Как видно, и в этом случае возбуждаются тональные звуковые колебания, однако их энергетический уровень существенно ниже, чем в предыдущих случаях (примерно на $20 \div 30$ дБ).

В заключение отметим, что для порогового звукового сигнала (из-за слабого контраста на сонограмме он отмечен стрелкой) число Струхаля составляет около 0.23, что хорошо согласуется с классическими данными, полученными в экспериментах по обтеканию цилиндров.

4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЫХАТЕЛЬНЫХ ШУМОВ

Исходя из полученных результатов, была предпринята попытка ответить на дополнительные вопросы.

- Как будет выглядеть респиросонограмма (сонограмма дыхательных шумов), если проимитировать процесс дыхания на модели, например, с двумя стенозами?
- Будет ли такая респиросонограмма хотя бы в общих чертах походила на реальную?

Для этого была использована наша экспериментальная установка, причем в качестве источника подачи воздуха использовали добровольца, который дышал через модель воздухоносного пути, взяв левый ее конец в рот. Запись возникающих при этом шумов проводилась для двух случаев: при наличии одного и двух стенозов. Из соответствующих респиросонограмм, представленных на рис. 10, д, е, видно, что при наличии одного стеноза поток генерирует шум, спектр которого плавно спадает с ростом частоты. Это очень похоже, например, на бронхиальные шумы в норме, когда роль стеноза выполняет голосовая щель [12, рис. 2]. В то же время, при наличии двух стенозов на фоне шумов четко выделяются дискретные составляющие спектра, обусловленные появлением тональных звуковых колебаний. Сравнивая эту искусственную респиросонограмму с реальными, на которых зафиксированы сухие хрипы [12, рис. 8, б, рис. 10], убеждаемся в их удовлетворительном качественном совпадении.

Следует обратить внимание, что на рис. 10, е тональные звуковые сигналы присутствуют как на

вдохе, так и на выдохе (на обоих рисунках респиронограммы начинаются с выдоха). Это объясняется тем, что при наличии двух одинаковых стенозов система полностью симметрична относительно направления потока. Конечно, если стенозы будут отличаться, то в фазах вдоха и выдоха спектры тональных сигналов будут разными. В тех же случаях, когда препятствием на пути струи будет не стеноз, а бифуркация или нить, симметрии системы относительно направления потока уже не будет. Поэтому здесь тональные звуковые сигналы будут присутствовать только в фазах выдоха, а в фазах вдоха будет наблюдаться только шумовой сигнал. Возможно, эти отличия спектров в фазах выдоха и вдоха могут служить диагностическими признаками при расшифровке реальных респиронограмм, связанных с патологиями.

ВЫВОДЫ

1. Выдвинута гипотеза об одном из возможных механизмов возникновения сухих хрипов (тональных звуковых колебаний) в бронхиальном дереве человека при его патологиях. Предполагается, что в пораженных отеками воздухоносных путях бронхиального дерева, выделяющих густую вязкую и тягучую мокроту, могут образовываться аэродинамические структуры типа сопло–струя–препятствие. При акте дыхания роль сопла играет стеноз, формирующий скоростную струю. Роль препятствия, на которое налетает струя, образуя вихри, может играть другой стеноз (мультистеноз), разветвления воздухоносных путей и образования из вязкой мокроты.
2. Состоятельность гипотезы была проверена с помощью экспериментальной установки, моделирующей воздухоносный путь респираторного тракта. Эксперименты проводились в широком диапазоне геометрических характеристик стеноза и препятствий, а также параметров потока.
3. Результаты экспериментов показали, что выдвинутая гипотеза имеет право на существование, поскольку наличие в воздухоносных путях указанных аэродинамических структур может обеспечивать эффективное преобразование энергии потока в звуковые колебания, спектр которых содержит дискретные (тональные) составляющие – гармоники и субгармоники, во многом подобные спектрам сухих хрипов.

4. Установлен ряд закономерностей, характерных для рассматриваемых аэродинамических структур внутри модели воздухоносного пути. В частности, оценены пороговые значения скоростей потока, при которых начинают возникать тональные звуковые колебания. Показано, что с увеличением относительного расстояния между стенозом, формирующим струю, и препятствием пороговые числа Рейнольдса и пороговые частоты тональных сигналов имеют тенденцию к уменьшению, а пороговые числа Струхала – к увеличению.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы выражают благодарность канд. техн. наук В. А. Воскобойнику за помощь, оказанную при проведении экспериментальных работ.

1. *Вовк И. В., Дахнов С. Л., Крижановский В. В., Олийнык В. Н.* Возможности и перспективы диагностики легочных патологий с помощью компьютерной регистрации и обработки шумов дыхания // Акуст. вісн.– 1998.– 1, N 2.– С. 21–33.
2. *Gavriely N.* Breath sounds methodology.– London, Tokyo: CRC Press, 1995.– 203 p.
3. *Большая медицинская энциклопедия.* Том 27.– М.: БМЭ, 1986.– С. 576.
4. *Большая советская энциклопедия.* Том 40.– М.: БСЭ, 1957.– С. 645.
5. *Вовк И. В., Вовк О. И.* О возможности физического моделирования шумов, генерируемых потоком воздуха в элементах дыхательных путей человека // Акуст. вісн.– 1999.– 2, N 2.– С. 11–25.
6. *Fredberg J. J.* Origin and character of vascular murmurs: Model studies // J. Acoust. Soc. Amer.– 1977.– 61, N 4.– P. 1077–1085.
7. *Zhaoyan Zhang, Luc Mongeau, Frankel S. H.* Broadband sound generation by confined turbulent jets // J. Acoust. Soc. Amer.– 2002.– 112, N 2.– P. 677–689.
8. *Sanaa A. Abdallah, Ned H. C. Hwang* Arterialstenosis murmurs: An analysis of flow and pressure fields // J. Acoust. Soc. Amer.– 1988.– 83, N 1.– P. 318–334.
9. *Gavriely N., Tunsheng R. S., Cugell D. W., Grotberg J. B.* Flutter in flow-limited collapsible tubes: a mechanism generation of wheezes // J. Appl. Physiol.– 1989.– 66, N 5.– P. 2251–2261.
10. *Grotberg J. B., Gavriely N.* Flutter in collapsible tubes: a theoretical model of wheezes // J. Appl. Physiol.– 1989.– 66, N 5.– P. 2262–2273.
11. *Grotberg J. B.* Pulmonary flow and transport phenomena // Ann. Rev. Fluid Mech.– 1994.– 26.– P. 529–571.
12. *Вовк И. В., Гринченко В. Т., Дахнов С. Л., Крижановский В. В., Олийнык В. Н.* Шумы дыхания человека: Объективизация аускультативных признаков // Акуст. вісн.– 1999.– 2, N 3.– С. 11–32.
13. *Ковалевский А. А.* Перкуссия и аускультация.– Томск: Изд. Томск. ун-та, 1961.– 170 с.

14. Chanaud R. C., Powell A. Some experiments concerning the hole and ring tone // J. Acoust. Soc. Amer.– 1964.– **37**, N 5.– P. 902–911.
15. Rockwell D., Naudascher E. Self-sustained oscillations impinging free shear layers // Ann. Rev. Fluid Mech.– 1979.– **11**.– P. 67–94.
16. Wilson T. A., Beavers G. S., DeCoster M. A., Holger D. K., Regenfuss M. D. Experiments on the fluid mechanics of whistling // J. Acoust. Soc. Amer.– 1971.– **50**, N 1.– P. 366–372.
17. Губергриц А. Я. Непосредственное исследование больного. Курс физикальной диагностики.– Ижевск: Удмуртия, 1996.– 332 с.
18. Ультразвук Маленькая энциклопедия / Под ред. И. П. Голяминой.– М.: Сов. энцикл., 1979.– 400 с.
19. Блохинцев Д. И. Акустика неоднородной движущейся среды.– М.: Наука, 1981.– 208 с.
20. Вовк И. В., Гринченко В. Т., Дахнов С. Л. Влияние физиологических особенностей верхних дыхательных путей на характеристики шумов дыхания // Акуст. вісн.– 1998.– **1**, N 3.– С. 14–23.
21. Вейбель Э. Р. Морфометрия легких человека.– М.: Медицина, 1970.– 175 с.
22. Nyborg W. L., Burkhard M. D., Schilling H. K. Acoustical characteristics of jet-edge and jet-edge-resonator systems // J. Acoust. Soc. Amer.– 1952.– **24**, N 3.– P. 293–304.
23. Sivaprasad Sukavaneshvar, Rosa G. M., Solen K. A. Enhancement of stent-induced thromboembolism by residual stenoses: contribution of hemodynamics // Ann. Biomed. Engng.– 2000.– **28**.– P. 182–193.
24. Назаренко А. А. Анализ акустического сигнала, генерируемого осесимметричной локализованной областью кавитационной природы // Акуст. вісн.– 2000.– **3**, N 4.– С. 45–53.
25. Константинов Б. П. Гидродинамическое звукообразование и распространение звука в ограниченной среде.– Л.: Наука, 1974.– 142 с.
26. Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов.– М–С.–Пб.–К.: Питер, 2003.– 603 с.
27. Ржевкин С. Н. Курс лекций по теории звука.– М.: Изд-во МГУ, 1960.– 335 с.