

# О ВОЗМОЖНОМ МЕХАНИЗМЕ ВОЗНИКНОВЕНИЯ СУХИХ ХРИПОВ В БРОНХИАЛЬНОМ ДЕРЕВЕ ЧЕЛОВЕКА

И. В. ВОВК В. Г. БАСОВСКИЙ

*Институт гидромеханики НАН Украины  
ул. Желябова, 8/4, 03057, Киев, Украина  
тел. (044) 456-69-83, e-mail: vovk@visti.com*

Предложена гипотеза об одном возможном механизме возникновения сухих хрипов (тональных звуковых колебаний) в бронхиальном дереве человека при патологиях. Суть ее состоит в том, что в пораженных воздухоносных путях за счет выделившейся вязкой тягучей мокроты могут образовываться аэродинамические структуры типа “сопло-струя-препятствие”. Роль сопла может играть стеноз, который при акте дыхания формирует скоростную струю воздуха, а роль препятствия может играть другой стеноз, разветвления воздухоносных путей и другие формы, образующиеся из мокроты. Состоятельность гипотезы проверялась экспериментально на физической модели в широком диапазоне геометрических характеристик стеноза и препятствий, а также скорости потока воздуха. Полученные результаты подтвердили принятые предположения и показали, что наличие подобного рода структур действительно обеспечивает эффективное преобразование энергии потока в энергию звуковых колебаний по характеру близких сухим хрипам.

## ВСТУПЛЕНИЕ

Вот уже много десятков лет продолжают дискуссии о природе возникновения шумов и звуков в бронхиальном дереве. И хотя глобальный механизм их возникновения в целом ясен и заключается во взаимодействии потока воздуха при акте дыхания с различными нерегулярностями внутреннего строения бронхиального дерева, многие конкретные геометрические и физические особенности этих нерегулярностей и, что особенно важно, их ответственность за появление тех или иных типов шумов и звуков остаются во многом неясными. Особенно это касается так называемых дополнительных дыхательных шумов, которые возникают при некоторых патологиях воздухоносных путей бронхиального дерева. К ним, в частности, относятся сухие хрипы, которые будут нас интересовать. Как указывается в Большой медицинской энциклопедии [1], “...сухие хрипы представляют собой протяженные звуки с различным музыкальным тембром... и появление их связано с тем, что в местах патологии бронха происходит изменения его формы и сечения, вызванные скоплением здесь комков вязкой, тягучей мокроты (секрета) и местным отеком слизистой оболочки стенки бронха...”. Далее, в энциклопедии говорится, что “...сухие хрипы обусловлены колебаниями стенок бронхов и завихрениями струи воздуха при прохождении через зону сужения (стеноза) 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 оказалось не так все просто. Экспе-

риментальные работы, направленные на изучение особенностей движения потока газа или жидкости в каналах (в том числе и 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, [2, 3] и обширную в них библиографию).

Вместе с этим, из литературы по аэромеханике и акустике хорошо известно, что в структурах типа “сопло-струя-препятствие” при определенных условиях могут возникать почти тональные звуковые колебания, см., например, [4, 5]. При этом генерация тональных звуков в таких структурах возможна только при наличии механизма обратной связи, заключающегося в значительном 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. Мы предположили, что в пораженных бронхах за счет появления тягучей вязкой мокроты могут образовываться подобного рода структуры, которые и обеспечивают условия для генерации сухих хрипов при акте дыхания. Экспериментальной проверке этой гипотезы и посвящена настоящая работа.

## 1 ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ БРОНХА И ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Для проведения измерений были разработаны физическая модель и измерительная установка, которые изображены на рис. 1. Для определенности в качестве препятствия на этом рисунке изображен стеноз. Однако, исследования проводились также с использованием и других нерегулярностей.

Модель состоит из трубки 1, которая с помощью монтажных колец 2 и 8 последовательно соединяется с межстенозной трубкой 4 и измерительной трубкой 3. Последняя, в свою очередь, с помощью монтажного кольца 14 соединяется с рупором 5. Внутри трубки 1 расположен детурбулизатор 6, представляющий собой слой медицинской ваты, помещенный в тонкую капроновую ткань. Между трубками 1 и 3 располагается участок, моделирующий стеноз и препятствие в виде второго стеноза (диафрагмы 7 и 9), в общем случае имеющих отверстия разного диаметра. Расстояние между стенозами регулируется за счет изменения длины межстенозной трубки 4. В трубке 1 до и после детурбулизатора 6 имеются отводы (патрубки) 10, которые соединяются с манометрами  $P_1$  и  $P_2$ . В измерительной трубке 3 имеется патрубков 11, в котором находится электретный микрофон  $M$ . Микрофон соединен электрическим кабелем с электронным усилителем сигналов  $УС$ , который, в свою очередь, соединен с электронными фильтрами  $\Phi$  и далее с аналого-цифровым преобразователем  $АЦП$  и персональным компьютером  $ПК$ . Кроме этого, на выходе отверстия нижней по потоку диафрагмы 9 размещен датчик термоанемометра 13, который соединен кабелем с термоанемометром  $DISA$ .

Функциональные назначения отдельных элементов модели состоят в следующем. 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 его давление контролируется

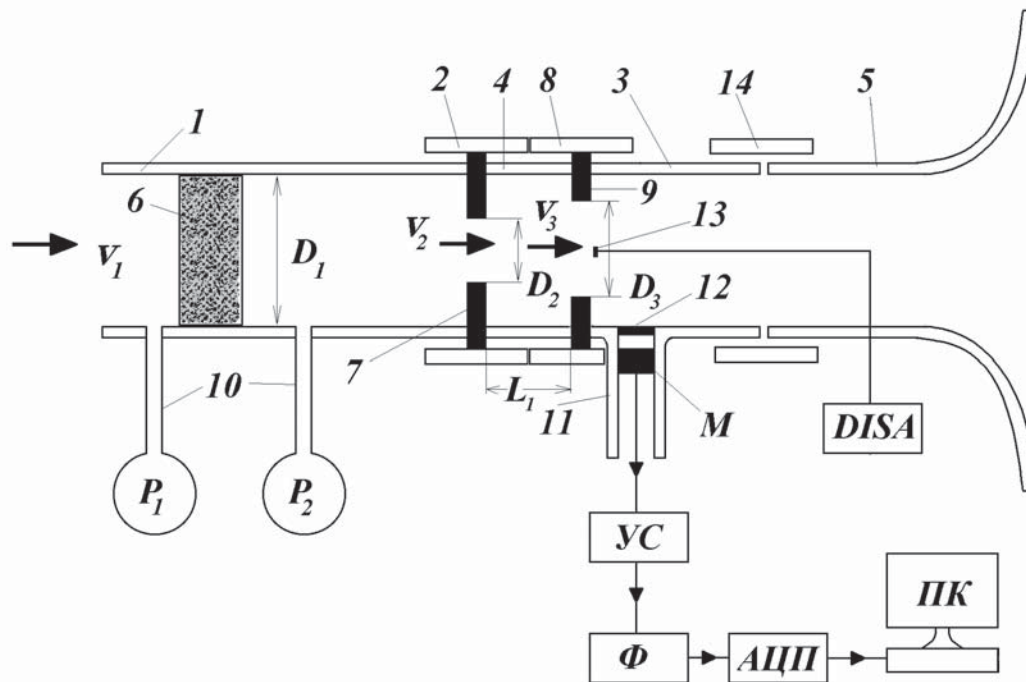


Рис. 1. Схема физической модели и измерительной установки

манометром  $P_2$ . Основным назначением детурбулизатора является уменьшение турбулизации потока (которая может вызываться источником), выравнивание скорости потока по сечению трубки  $1$  и акустическая изоляция измерительной трубки  $3$  от возможных шумов источника. После прохождения через стенозную часть модели поток попадает в измерительную трубку  $3$ , где с помощью микрофона  $M$  регистрируются генерируемые 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.

## 2 ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Экспериментальные исследования проводились для случая, когда в качестве препятствия выступал второй стеноз, в достаточно широком диапазоне геометрических характеристик модели и физических параметров потока. В частности, отношение  $D_1/D_2$  изменялось от 9 до 1.8, отношение  $L_1/D_2$  от 0.17 до 6.3, а отношение  $D_1/D_3 = 1$ ,

см. рис. 1. Скорость потока  $V_2$  в отверстии первого стеноза изменялась от 0.5 м/с до 70 м/с. В целом все измерения находились в диапазоне чисел Рейнольдса примерно от  $10^2$  до  $10^4$ .

В качестве примера на рис. 2 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 играет роль “препятствия”, на которое струя натекает образуя вихри.

Даже беглый анализ представленных сонограмм дает возможность убедиться, что в рассматриваемой аэродинамической системе поток действительно может достаточно эффективно генерировать тональные звуковые колебания. Это подтверждается как присутствием на сонограммах четких дискретных спектральных составляющих, имеющих значительные амплитуды, 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 аэрогидродинамическими источниками звуковых колебаний. Вместе с этим, также хорошо видно, что наряду с дискретными спектральными составляющими присутствует и широкополосный шум, уровень которого также повышается с ростом скорости потока. Причины его возникновения обусловлены пульсациями давления в турбулизированном потоке в области за вторым стенозом.

Анализ многочисленных сонограмм, полученных в ходе экспериментов, позволил установить ряд общих характерных черт, которые могут быть присущи воздухоносным путям с двумя стенозами.

Во-первых, тональные звуковые колебания начинают возникать в нем 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  $Re_p = V_{2,p}D_2/\nu$  (здесь  $\nu$  - кинематическая вязкость воздуха) в целом имеют тенденцию к снижению по мере увеличения относительного расстояния между стенозами, см. рис. 3а.

Во-вторых, пороговая частота  $f_p$  тональных звуковых колебаний, возникающих при достижении пороговых скоростей потока, имеет хорошо выраженную тенденцию снижаться с ростом  $L_1/D_2$ , см. рис. 3б.

И, наконец, в третьих, пороговое число Струхала  $Sh_p = f_p L_1/V_{2,p}$ , по крайней мере в зоне  $L_1/D_2 \leq 3$ , имеет четкую тенденцию к росту с увеличением относительного расстояний между стенозами, см. рис. 3в.

## ВЫВОДЫ

Выдвинута гипотеза об одном из возможных механизмов возникновения сухих хрипов (тональных звуковых колебаний) в бронхиальном дереве человека при патологиях. В соответствии с этой гипотезой предполагается, что в пораженных отеком воздухоносных путях бронхиального дерева, выделяющих густую вязкую и тягучую мокроту, могут образовываться аэродинамические структуры типа “сопло-струя-препятствие”. Состоятельность гипотезы была проверена с помощью экспериментальной установки, содержащей физическую модель воздухоносного пути и аппаратуру для регистрации и обработки звуковых сигналов и оценки скорости потока воздуха в модели. Установлен ряд закономерностей, характерных для рассматриваемых аэродинамических структур

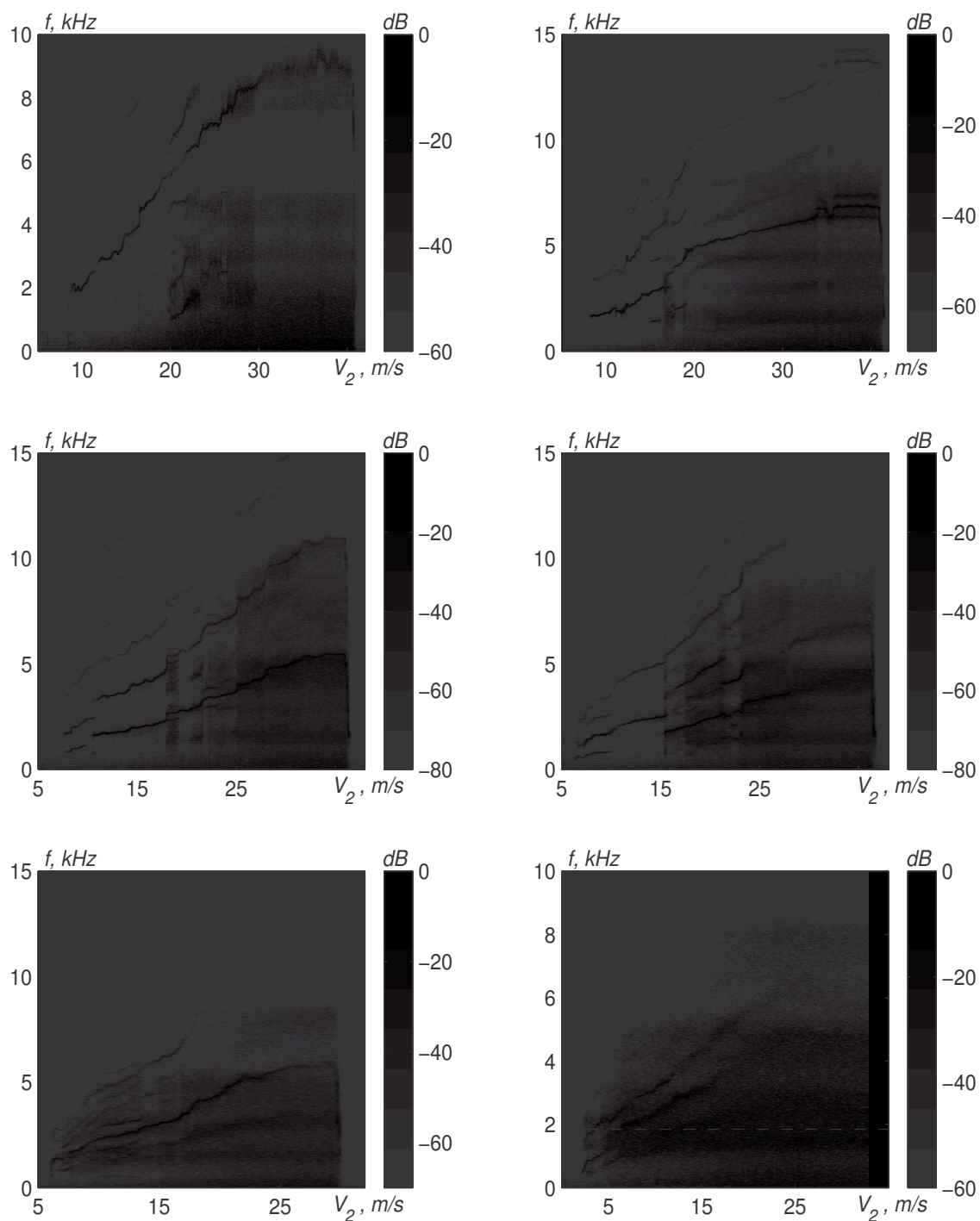


Рис. 2. Сонограмма для  $D_1/D_2 = D_1/D_3 = 9$ ; при  $L_1/D_2 = 0.4; 1.0; 1.8; 2.9; 4.5; 6.3$  соответственно

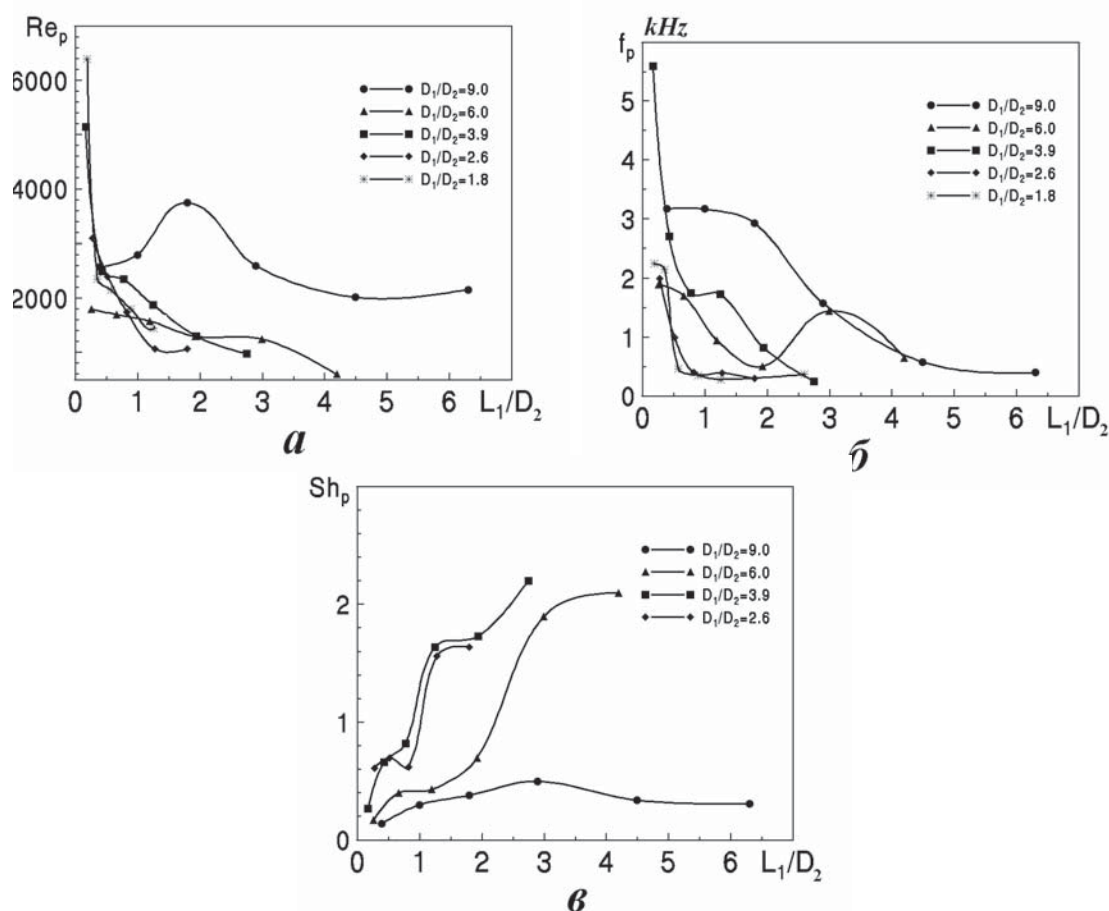


Рис. 3. Пороговые значения: а) чисел Рейнольдса, б) частот тона, в) чисел Струхалия

внутри модели воздухоносного пути. В частности, оценены пороговые значения скоростей потока, при которых начинают возникать тональные звуковые колебания и показано, что с увеличением относительного расстояния между стенозом, формирующим струю, и препятствием пороговые числа Рейнольдса и пороговые частоты тональных сигналов имеют тенденции уменьшаться, а пороговые числа Струхалия увеличиваться.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Большая медицинская энциклопедия М.– БМЭ: 1986, т.27.– 576 с.
2. 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.
3. Sanaa A. Abdallah, Ned H. C., Hwang Arterialstenosis Murmurs: An analysis of flow and pressure fields // J. Acoust. Soc. Am.– 1988.– 83, N 1.– P. 318–334.
4. Маленькая энциклопедия. Ультразвук Под ред. Голяминой И. П.– М: Сов.Энцикл., 1979.– 400 с.
5. Блохинцев Д. И. Акустика неоднородной движущейся среды.– М: Наука, 1981.– 208 с.