

АНАЛИЗ ГАРМОНИК СВИСТЯЩИХ ЗВУКОВ В ШУМАХ ФОРСИРОВАННОГО ВЫДОХА ЧЕЛОВЕКА

© 2021 г. М. А. Сафронова^{а, *}, А. Д. Ширяев^а, В. И. Коренбаум^а

^аТихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН,
ул. Балтийская 43, Владивосток, 690041 Россия

*e-mail: safronova@poi.dvo.ru

Поступила в редакцию 08.07.2020 г.

После доработки 20.04.2021 г.

Принята к публикации 23.04.2021 г.

Спектральные гармоники свистящих звуков форсированного выдоха (СФВ), соответствующие целочисленному ряду, обнаружены над трахеей у 19 из 28 обследованных добровольцев. Проведен анализ состава, соотношения и распределения по поверхности грудной клетки спектральных гармоник СФВ, записанных 11-ю акустическими датчиками по поверхности грудной клетки, на выдохе здоровых лиц ($n = 9$) и больных респираторными заболеваниями ($n = 10$). Наиболее вероятной причиной возникновения гармоник СФВ признана нелинейность в источнике их формирования, а предполагаемым механизмом – взаимодействие турбулентных вихрей воздушного потока с упругой стенкой центральных дыхательных путей бронхиального дерева человека.

Ключевые слова: шум, форсированный выдох, свистящие звуки, гармоники, статистический анализ, механизмы, нелинейность

DOI: 10.31857/S0320791921040122

ВВЕДЕНИЕ

В медицинской функциональной диагностике для выявления нарушений вентиляции легких используют анализ потока-объемных характеристик маневра форсированного выдоха [1]. В то же время при форсированном выдохе наблюдается и интенсивный шум, содержащий свистящие звуки – так называемые свисты форсированного выдоха (СФВ) [2].

По мнению многих исследователей, начиная с Р. Forgacs [3], СФВ потенциально применимы для диагностики бронхиальной обструкции, являющейся признаком таких распространенных заболеваний как бронхиальная астма и хроническая обструктивная болезнь легких. Однако до сих пор нет единого мнения о механизмах формирования СФВ, а также локализации их источников по уровням бронхиального дерева человека.

Известно несколько модельных представлений о механизмах формирования СФВ. Так, в серии работ Gavriely и Grotberg с соавторами [4–6] рассмотрены биомеханические аспекты формирования свистов. Выделяют 5 возможных моделей продуцирования свистов: 1) резонанс стенок дыхательных путей (ДП), возбуждаемых турбулентными пульсациями давления, 2) возбуждаемый турбулентным потоком резонатор Гельмгольца, 3) акустически стимулированный звук

вихрей, 4) резонанс стенок ДП, возбуждаемый срывающимися вихрями. 5) автоколебание стенок ДП [4]. Была разработана математическая модель флаттера [5, 6], в соответствии с которой при некоторой критической скорости в предварительно сплюсненной трубе наблюдается установление симметричных автоколебаний стенок. В отношении СФВ флаттер предположен основным механизмом [7, 8]. Для проверки этого предположения в работе [9] записывали трахеальные СФВ в газах с различной плотностью у пяти здоровых взрослых обследуемых. Было установлено, что плотность газа не влияет на частоту СФВ, и этот результат истолкован в качестве доказательства модели автоколебания стенок ДП. Тем не менее, авторы работ [4, 10, 11] полностью не исключают и механизм срыва вихрей в области пережатия просвета ДП в качестве возможного объяснения СФВ.

Конкурирующие модели формирования СФВ в результате срыва вихрей на бифуркациях бронхиального дерева выдвинули Schroter и Sudlow [12]. Эти авторы наблюдали турбулентные вихри на ветвлениях стеклянной модели бронхиального дерева (четыре генерации ветвления) в диапазоне чисел Рейнольдса от 50 до 4500. Позднее [13] турбулентные вихри на бифуркациях бронхиального дерева наблюдались на реалистичной модели и с

помощью технологии лазерной визуализации PIV. Hardin и Patterson [14] разработали теорию срыва вихрей на бифуркациях бронхиального дерева с числом Струхала около 0.3.

Был также предложен альтернативный кластер моделей срыва вихрей в окрестностях трахеи (трахея, главные и долевые бронхи). В работе [15] разработана численная модель, описывающая срыв вихрей на участке уменьшения просвета трубы с числами Струхала около 0.9. Срыв вихрей на пережатии просвета трахеи, вызванном функциональным экспираторным обжатием, предложен в работе [16] как механизм возникновения свистов. Здесь проведен модельный эксперимент в аэродинамической трубе с диафрагмой, моделирующей зону пережатия, однако СФВ зарегистрированы не были. В работе [17] предполагается срыв вихрей на голосовых складках. На основе физической модели участка дыхательных путей человека, образованных гортанью и непосредственно прилегающими к ней полостями преддверия гортани и трахеи, было показано, что аэродинамическое сопротивление диафрагмы, моделирующей голосовую щель, зависит от формы щели и ее размеров. В работе [18] предполагается возможность срыва вихрей на ребрах жесткости, обусловленных хрящевым скелетом трахеи.

Нами [19–21] развита эмпирическая модель, согласно которой часть СФВ (среднечастотные и ранние высокочастотные СФВ) формируются за счет потокозависимого механизма не самими вихрями, а колебаниями кромки сочленения ДП в местах ветвления, вызванными переменными силами, возникающими при сходе вихрей с числами Струхала порядка 0.2. Причем происходит это в достаточно широком диапазоне уровней бронхиального дерева – от нижней части трахеи до примерно 6-го уровня ветвления ДП. Напротив, поздние высокочастотные СФВ формируются за счет автоколебательных механизмов и в более глубоко расположенных уровнях бронхиального дерева.

Вышерассмотренные механизмы, в основном, характерны для здоровых обследуемых. У пациентов с респираторными заболеваниями свисты дополнительно могут образовываться за счет возбуждения вязкой или жидкой мокроты в просвете воздухоносных путей [22, 23], а также за счет автоколебательного возбуждения колебаний смыканий стенок слизистой оболочки дыхательных путей. Во втором случае свисты могут образовываться как за счет продольных колебаний со смыканием просвета ДП [3, 24], так и изгибных колебаний около положения равновесия без смыкания просвета ДП [25].

Таким образом, моделей разработано много, а достаточной ясности с механизмами формирования СФВ как у больных, так и у здоровых людей

не достигнуто. Столь же противоречивая ситуация и с локализацией источников СФВ. Согласно существующим моделям, они могут находиться и в трахее, и в крупных бронхах, и в бронхиальном дереве в широком диапазоне генераций ветвления.

Нужно отметить, что в последние годы данная тематика преимущественно исследуется в работах нашей группы [2], что может быть связано со сложностью и спецификой набора экспериментальных данных, лежащих на стыке акустики, респираторной физиологии и функциональной диагностики дыхательной системы человека.

Ранее, при анализе спектрограмм трахеальных шумов форсированного выдоха как у больных, так и у здоровых добровольцев, нами было замечено, что спектрограмма СФВ содержит ряд выраженных максимумов (“дорожек” спектральных пиков) на частотах, примерно кратных основной частоте СФВ. Исследование этих составляющих, похожих на гармоники, вероятно, может служить одним из подходов к пониманию механизмов формирования СФВ. Поэтому цель настоящей работы заключалась в обнаружении гармоник СФВ, оценке их параметров и анализе возможных акустических механизмов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Экспериментальное оборудование состояло из 11 акустических датчиков, выполненных на базе акселерометров 333B52 (PCB Piezotronics) с динамическим диапазоном 80 дБ [26], подключенных к входам каналов аппаратно-программного комплекса на основе 16-канального электронного самописца PowerLab (ADInstruments) с 16-разрядным АЦП [27]. Частота дискретизации 10 кГц. Акустические датчики крепились к коже на двухсторонней липкой ленте, в точках поверхности грудной клетки, показанных на рис. 1. При этом датчики 1–5 расположены преимущественно над центральными (крупными) дыхательными путями бронхиального дерева, а датчики 6–11 размещены над удаленными (дистальными) дыхательными путями, лежащими в нижних долях легких.

Исследуемая выборка состояла из 28 добровольцев обоего пола в возрасте от 20 до 77 лет, давших информированное согласие на проведение эксперимента. Выборка была поделена на две группы: 17 пациентов с заболеваниями (пневмония и хроническая обструктивная болезнь легких), 11 здоровых лиц. Каждый доброволец после тщательного инструктирования выполнял маневр форсированного выдоха (минимум 2–3 попытки). На нос накладывался зажим. Для анализа бралась одна наиболее качественная попытка записи шумов форсированного выдоха (сигнал без явных помех и без амплитудных ограничений).

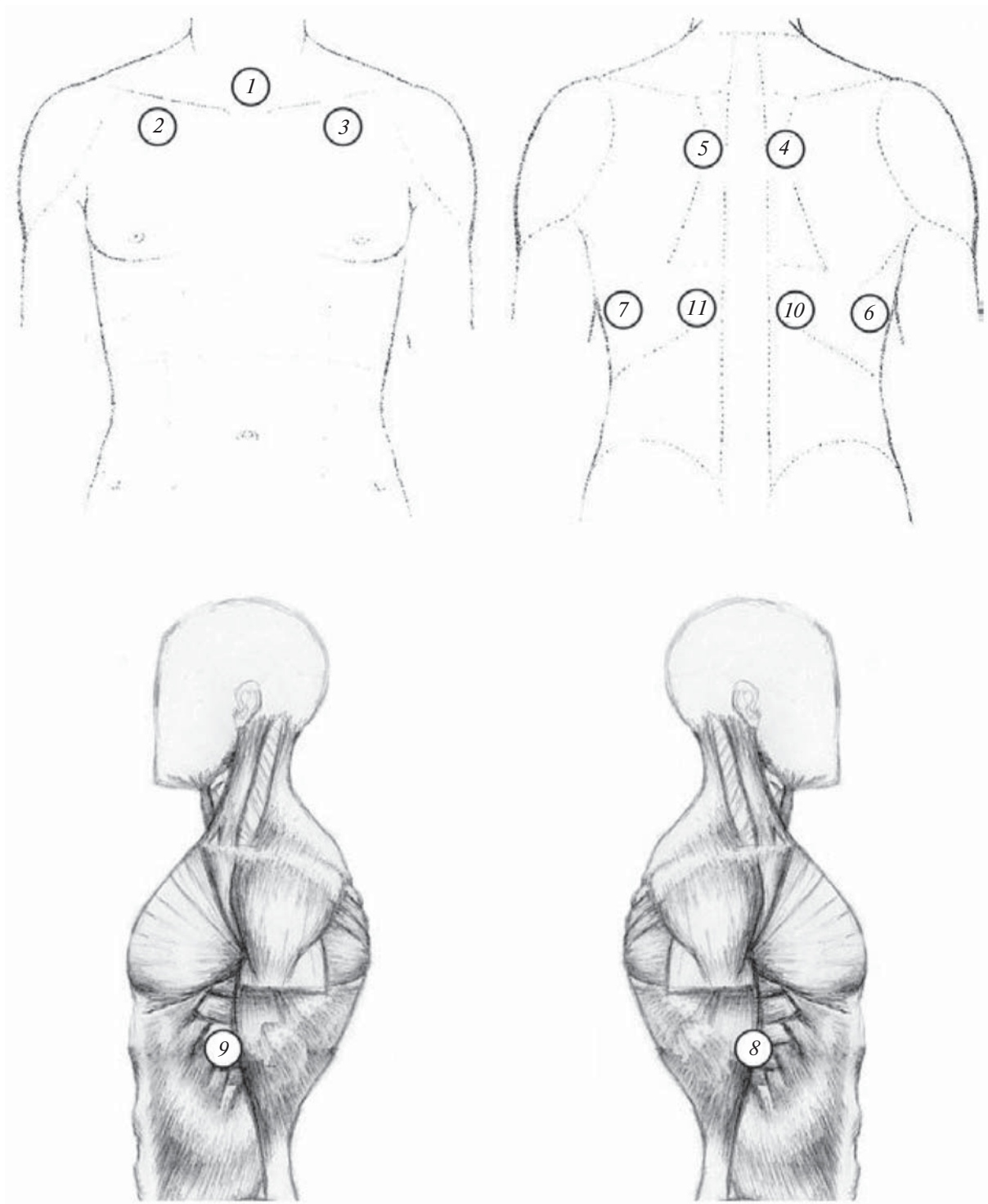


Рис. 1. Схема расположения акустических датчиков (каналов) на поверхности грудной клетки: 1 – над средней частью трахеи; 2 – I межреберье по окологрудинной линии справа; 3 – I межреберье по окологрудинной линии слева; 4 – IV межреберье по околопозвоночной линии справа; 5 – IV межреберье по околопозвоночной линии слева; 6 – VIII межреберье между лопаточной и заднеподмышечной линиями справа; 7 – VIII межреберье между лопаточной и заднеподмышечной линиями слева; 8 – VIII межреберье между заднеподмышечной и среднеподмышечной линиями справа; 9 – VIII межреберье между заднеподмышечной и среднеподмышечной линиями слева; 10 – VIII межреберье между лопаточной и околопозвоночной линиями справа; 11 – VIII межреберье между лопаточной и околопозвоночной линиями слева.

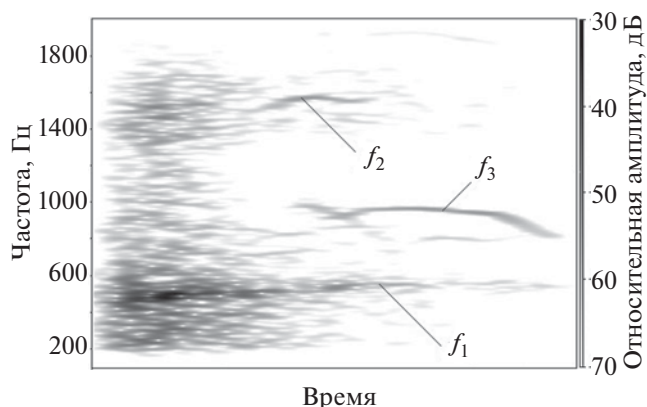


Рис. 2. Типичные СФВ, наблюдаемые на спектрограмме трахеальных шумов форсированного выдоха: f_1 – дорожка среднечастотных СФВ в полосе 400–600 Гц; f_2 – дорожка высокочастотных СФВ (более 600 Гц) в первой половине маневра; f_3 – дорожка высокочастотных СФВ (более 600 Гц) во второй половине маневра.

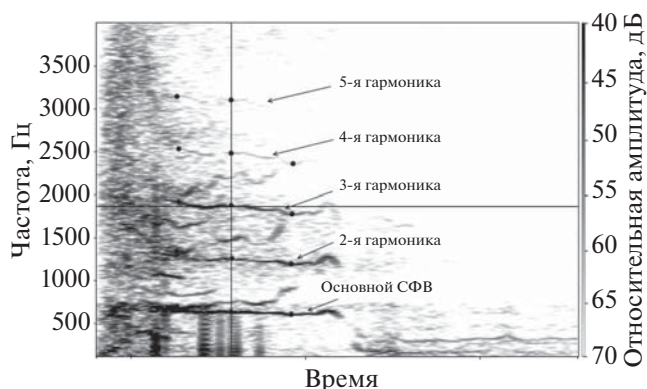


Рис. 3. Спектрограмма трахеальных (датчик 1, рис. 1) шумов форсированного выдоха одного из обследуемых (основной тон СФВ относится к среднечастотному типу).

Записанные самописцем акустические сигналы преобразовывались в двухканальные файлы wave-формата. Дальнейший анализ осуществлялся в пакете прикладных программ SpectraPLUS (Pioneer Hill Software) и отображался (рис. 2) в виде спектрограммы (алгоритм быстрого преобразования Фурье, 1024 отсчета по времени, 50% перекрытие временных выборок, окно Hanning, логарифмическая амплитуда, динамический диапазон 80 дБ от максимума сигнала). На спектрограмме визуально выделяли “дорожки” среднечастотных свистов (СЧ СФВ) с частотами 400–600 Гц, ранних высокочастотных свистов (ранние ВЧ СФВ) на частотах выше 600 Гц, наблюдаемых в первой половине форсированного выдоха, и поздних высокочастотных (поздние ВЧ СФВ) на частотах выше 600 Гц, наблюдаемых во второй половине форсированного выдоха.

В качестве гармоник рассматривались “дорожки” на спектрограмме, схожие по форме с “дорожкой” основного тона СФВ, но лежащие выше по частоте (рис. 3). Именно определяемое визуально опытным оператором соответствие формы дополнительных “дорожек” на спектрограммах (рис. 3) служило главным признаком выявления гармоник СФВ. На спектральной “дорожке” каждой гармоники СФВ фиксировалось три точки во времени: начало, середина, конец свиста (рис. 3), в каждой из них программными средствами измерялись пиковая частота и амплитуда максимума. Отмечалось, к какому из типов СФВ (среднечастотный, ранний или поздний высокочастотный) относится та или иная гармоника. Заметим, что основные частоты СФВ для одного и того же обследуемого в каждом из каналов, как правило, совпадали. Кроме того, у одного обследуемого могло быть несколько гармоник СФВ одного типа.

Для оценки статистической значимости различий между параметрами гармоник использовался непараметрический тест Манна–Уитни в программе Statistica (StatSoft Inc.). Для оценки статистической значимости различий частот встречаемости гармоник между центральными и более удаленными отделами легких, между больными и здоровыми, а также между сторонами грудной клетки (лево/право) использовался односторонний Difference test в программе Statistica (StatSoft Inc.).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Групповые оценки СФВ над трахеей

В группе больных ($n = 17$) у десятирех человек были обнаружены спектральные гармоники СФВ, а в группе здоровых ($n = 11$) у девятирех. Таким образом, из всей выборки ($n = 28$) у 19 (68%) испытуемых были обнаружены гармоники СФВ. У каждого из этих лиц присутствовала хотя бы одна гармоника СФВ над трахеей, а у некоторых из них гармоники с теми же частотами и временами, что и на трахее, наблюдались и над различными отделами легких по поверхности грудной клетки.

Интенсивность шумов форсированного выдоха, регистрируемых над трахеей (датчик 1, рис. 1), была сравнена в подгруппах обследуемых, у которых были найдены гармоники ($n = 19$), и у которых они отсутствовали ($n = 9$). Для этого в программе LabChart (ADInstruments) с помощью расширения DataPad измерены среднеквадратические значения (RMS) электрического напряжения шумового сигнала с выхода датчика 1 (рис. 1).

Значения RMS для каждого человека были усреднены по всем сделанным им качественным попыткам форсированного выдоха. С помощью

теста Манна–Уитни между этими подгруппами найдены значимые различия ($p = 0.001$). Из диаграммы “ящик с усами” (рис. 4) следует, что интенсивность шумов форсированного выдоха на трахее в подгруппе, где есть гармоника СФВ, значимо выше, чем в подгруппе, где гармоник СФВ не было.

Индивидуальные оценки над трахеей

Над трахеей (канал 1, рис. 1) в каждой точке оценивалось отношение частот спектральных гармоник (F , разы) по отношению к основной частоте СФВ в синхронные моменты времени. Эти величины усреднены по трем точкам измерений. У некоторых добровольцев присутствовало по несколько свистов одного типа, поэтому полученные значения усреднены по каждому виду СФВ. Результаты (среднее \pm среднеквадратичное отклонение – $M \pm SD$) представлены в табл. 1 и табл. 2. Как следует из этих таблиц, отношения частот F близки к номерам гармоник. Исключения составляет гармоника 4 раннего ВЧ СФВ у здорового добровольца № 7 (табл. 1, выделено жирным шрифтом). Максимальное число гармоник равно пяти. Для СЧ СФВ чаще встречаются 2-е и 3-е гармоники (56 и 44% соответственно), 4-е гармоники наблюдаются только у 2-х человек (22%), а 5-е и вовсе у одного (11%). Для ранних ВЧ СФВ по частоте встречаемости преобладают вторые гармоники (67%), тогда как 3-е встречаются в 2 раза реже (33%), 4-е наблюдаются у 2-х человек (11%). Для поздних ВЧ СФВ чаще встречаются 2-е гармоники (56%), 3-е наблюдаются у 3-х человек (33%), а 4-е только у одного (11%).

Что касается пациентов с респираторными заболеваниями (табл. 2), то отношения частот F также, в основном, близки к номерам гармоник.

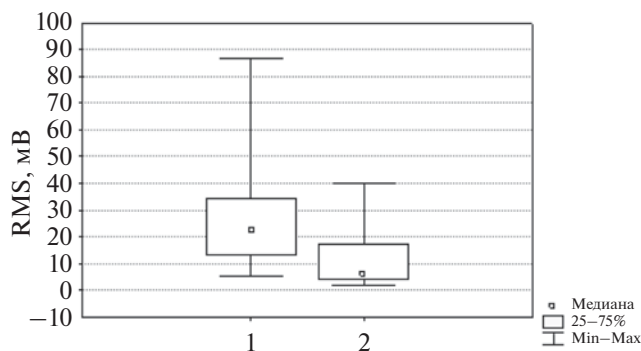


Рис. 4. Усредненные по ансамблю значения RMS шумов ФВ над трахеей (канал 1): 1 – группа с гармониками СФВ ($n = 19$), 2 – группа без гармоник СФВ ($n = 9$).

Исключения составляют 4-е гармоники СЧ СФВ у больных № 7 и 8 (табл. 2, выделено жирным шрифтом). Максимальное число гармоник равно семи. Для СЧ СФВ чаще встречаются 2-е и 3-е гармоники (80 и 70% соответственно), 4-е гармоники также встречаются довольно часто (40%), тогда как 5-е, 6-е и 7-е гармоники встречаются только у 2-х человек (20%). Для ранних ВЧ СФВ по частоте встречаемости преобладают вторые гармоники (70%), тогда как 3-е наблюдаются у 2-х человек (20%). Гармоники поздних ВЧ СФВ встречаются лишь у 2-х человек и представлены 2-й и 3-й гармониками (по 20%).

Таким образом, как у больных, так и у здоровых по частоте встречаемости преобладают 2-е и 3-е гармоники. У здоровых распределение числа гармоник по всем видам свистов более равномерное, тогда как у больных явно преобладают гармоники СЧ СФВ. Причем, чем выше номер гармоники, тем реже они встречаются.

Таблица 1. Отношения частот спектральных гармоник СФВ к основной частоте СФВ, осредненные по трем точкам дорожки СФВ у здоровых

Доброволец	СЧ СФВ				Ранние ВЧ СФВ			Поздние ВЧ СФВ		
	Номера гармоник									
№	2	3	4	5	2	3	4	2	3	4
1	2.0 ± 0.06	3.0 ± 0.06	4.0 ± 0.15		1.8 ± 0.33			2.0 ± 0.01		
2					2.0 ± 0.002					
3					1.9 ± 0.05	2.9 ± 0.03	3.9 ± 0.07			
4	2.0 ± 0.02				2.0 ± 0.01					
5								2.0 ± 0.004	3.0 ± 0.004	
6	1.9 ± 0.04	3.5 ± 0.07						2.0 ± 0.03	3.0 ± 0.03	
7					2.0 ± 0.01	3.1 ± 0.01	2.7 ± 2.31			
8	2.0 ± 0.01	2.7 ± 0.01			2.2 ± 0.04	3.0 ± 0.07		2.0 ± 0.05		
9	2.0 ± 0.02	2.9 ± 0.05	4.0 ± 0.06	5.0 ± 0.03				2.0 ± 0.02	3.0 ± 0.02	4.0 ± 0.05
Частота встречаемости в группе, %	56	44	22	11	67	33	11	56	33	11

Таблица 2. Отношения частот спектральных гармоник, осредненные по трем точкам дорожки СФВ у больных

Доброволец	СЧ СФВ						Ранние ВЧ СФВ		Поздние ВЧ СФВ	
	Номера гармоник									
№	2	3	4	5	6	7	2	3	2	3
1	2.0 ± 0.07	3.0 ± 0.07	4.1 ± 0.03				2.0 ± 0.04			
2	1.9 ± 0.12	2.8 ± 0.44								
3	2.1 ± 0.12	2.9 ± 0.20	4.1 ± 0.34				2.0 ± 0.01			
4	2.0 ± 0.03	3.0 ± 0.07	4.0 ± 0.02	5.0 ± 0.03	6.0 ± 0.04	7.0 ± 0.03	2.0 ± 0.008	3.0 ± 0.02		
5							2.0 ± 0.02	2.8 ± 0.06		
6	2.1 ± 0.07						2.0 ± 0.01			
7	2.0 ± 0.007	3.3 ± 0.14	4.9 ± 0.14							
8	2.0 ± 0.04	3.0 ± 0.07	4.5 ± 0.42				1.8 ± 0.03			
9							2.0 ± 0.03		1.9 ± 0.16	3.0 ± 0.08
10	2.0 ± 0.03	3.0 ± 0.04	4.0 ± 0.10	5.1 ± 0.24	6.1 ± 0.28	6.9 ± 0.14			2.0 ± 0.004	3.0 ± 0.04
Частота встречаемости в группе, %	80	70	40	20	20	20	70	20	20	20

Таблица 3. Средние значения относительных уровней интенсивности гармоник СФВ (дБ) у здоровых

Доброволец	СЧ СФВ				Ранние ВЧ СФВ			Поздние ВЧ СФВ		
	Номера гармоник									
№	2	3	4	5	2	3	4	2	3	4
1	-10.6 ± 2.3	-12.1 ± 3.5	-13.6 ± 2.5		3.8 ± 3.3			6.5 ± 1.2		
2					-29.7 ± 6.2					
3					-8.3 ± 2.3	-15.0 ± 11.1	-19.8 ± 9.1			
4	-11.2 ± 2.9				-1.9 ± 5.9					
5								-7.8 ± 7.7	-25.5 ± 11.6	
6	-11.6 ± 8.0	-18.6 ± 7.9						-10.0 ± 10.8	-15.2 ± 1.6	
7					-6.9 ± 4.8	-18.3 ± 2.4	-25.7 ± 6.9			
8	-11.1 ± 3.4	-22.8 ± 1.9			-19.5 ± 3.6	-20.2 ± 4.4		-3.7 ± 4.8		
9	-0.7 ± 3.2	<i>1.8 ± 3.0</i>	<i>4.7 ± 4.2</i>	-17.2 ± 5.6				0.3 ± 3.0	-4.5 ± 1.9	-24.6 ± 11.5

Над трахеей (датчик 1, рис. 1) также оценивалась разность уровней спектральных гармоник (А, дБ) в сравнении с основным тоном. Для анализа брали по одному свисту каждого вида с наибольшей амплитудой основного тона (если были еще СФВ, но с меньшими амплитудами, они не учитывались). Затем в каждой из трех точек дорожек гармоник СФВ определялась разность уровней (дБ) при сравнении с основным тоном. Измеренные значения усреднялись по трем точкам. Полученные величины характеризуют относительные уровни интенсивности гармоник.

В табл. 3 и 4 приведены средние значения относительных уровней интенсивности гармоник СФВ по каждому обследуемому для здоровых и больных соответственно. У здоровых по всем видам свистов имеет место тенденция уменьшения относительных уровней интенсивности с ростом номера гармоники. Однако у обследуемого № 9 для СЧ СФВ эта тенденция нарушается, начиная

с 3-й гармоники (значения выделены курсивом), а максимальное значение относительного уровня интенсивности приходится на гармонику 4. Нужно заметить, что в некоторых случаях гармоники оказываются мощнее основного тона. Так, у добровольца № 1 интенсивней основного тона 2-е гармоники раннего и позднего СФВ (в табл. 3 выделены жирным шрифтом). У добровольца № 9 над основным тоном преобладают 3-я и 4-я гармоники СЧ СФВ, а также 2-я гармоника позднего СФВ. Следует отметить, что используемые в качестве акустических датчиков одинаковые акселерометры на исследуемых частотах выше 400 Гц характеризуются линейным спадом амплитудно-частотной характеристики 6 дБ/октава [27] в высокочастотную область, что частично может объяснять уменьшение уровня интенсивности гармоник с ростом их номера.

У больных по всем видам свистов наблюдается уменьшение относительных уровней интенсив-

Таблица 4. Средние значения относительных уровней интенсивности гармоник СФВ (дБ) у больных

Доброволец	СЧ СФВ						Ранние ВЧ СФВ		Поздние ВЧ СФВ	
	Номера гармоник									
№	2	3	4	5	6	7	2	3	2	3
1	-0.9 ± 1.1						-22.5 ± 3.5			
2	-7.7 ± 3.0									
3	-7.7 ± 5.9	-12.1 ± 12.7	-20.1 ± 1.5				-5.0 ± 0.4			
4	-11.0 ± 2.7	-16.9 ± 2.92	-23.1 ± 5.4				-4.2 ± 0.9	-20.1 ± 2.5		
5							-11.0 ± 10.9	-39.8 ± 2.0		
6	-5.2 ± 2.6						-4.5 ± 3.8			
7	-6.5 ± 1.1	-38.0 ± 4.3	-46.2 ± 8.4							
8	-8.3 ± 6.2	-33.4 ± 4.4					-21.1 ± 2.8			
9							1.7 ± 15.8		-19.8 ± 5.5	
10	7.8 ± 14.9	-9.0 ± 15.6	-25.7 ± 21.4	-11.7 ± 18.9	-14.2 ± 21.1	-8.7 ± 14.4			-8.8 ± 2.0	-16.7 ± 3.3

Таблица 5. Частоты встречаемости гармоник СФВ по поверхности грудной клетки (каналам), %

№ канала	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Здоровые (<i>n</i> = 9)	100	78	78	78	22	33	44	56	67	44	33
Больные (<i>n</i> = 10)	100	80	60	60	60	20	30	20	20	20	0

ности СФВ с ростом номера гармоники, как и у здоровых. Только для пациента № 10 эта тенденция нарушается, начиная с 5-й гармоники (выделены курсивом). У двух пациентов 2-е гармоники мощнее основного тона (№ 10 – гармоника СЧ СФВ, и № 9 – гармоника раннего ВЧ СФВ).

Индивидуальные оценки над поверхностью грудной клетки

Были проанализированы гармоники свистов в каждом из 11 записанных каналов (датчиков, рис. 1) без разделения на типы СФВ. Свисты, зафиксированные над трахеей (канал 1), для которых наблюдались спектральные гармоники, искали в откликах остальных десяти каналов. При этом на спектральной дорожке каждого СФВ фиксировалась только одна точка, в которой измерялась пиковая частота.

Сначала для каждого канала была рассчитана частота встречаемости гармоник СФВ в группах без разделения на типы свистов (табл. 5). У больных наблюдается выраженное спадание частот встречаемости гармоник от трахеи (канал 1) к более удаленным (дистальным) ДП, лежащим в нижних отделах легких (периферически расположенные по грудной клетке каналы 6–11), тогда как у здоровых частота встречаемости гармоник СФВ распределена более равномерно. Кроме того, у здоровых, в целом, величины частот встречаемости гармоник в нижних отделах (с 6-го по 11-й канал) легких выше, чем в группе больных. Таким образом, разница между частотами встречаемости

гармоник в центральных (каналы с 1-го по 5-й) и более удаленных (нижних) ДП сильнее выражена у больных, где достигает статистической значимости ($p < 0.05$). Так, у больных статистическая значимость по частоте встречаемости между центральными (1–5 каналы) и удаленными (6–11 каналы) ДП наблюдается всюду, кроме канала 7. У здоровых статистическая значимость по частоте встречаемости наблюдается между каналом 1 (трахея) и всеми периферически размещенными каналами, между центральными ДП (2–4 каналы) и удаленными ДП (6–11 каналы), а также между каналами 5 и 9.

Кроме того, была оценена статистическая значимость различий частот встречаемости гармоник между больными и здоровыми по отдельным каналам. Без разделения на типы свистов значимые различия в пользу здоровых (67% у здоровых против 20% у больных) присутствуют только в 9-м канале ($p = 0.03$). Анализ распределения частот встречаемости гармоник по сторонам грудной клетки (лево-право) выявил статистически значимое различие только у здоровых и только между каналами 4 и 5 (78% против 22%, $p = 0.015$).

Далее по всем 11 каналам в каждой точке установки датчиков (рис. 1) оценивалось отношение частот спектральных гармоник (F , разы) по отношению к основной частоте СФВ в синхронные моменты времени. По каждому номеру гармоники и по каждой точке приема (каналу) отношения частот усреднили по ансамблю и, где это было возможно, рассчитали стандартную девиацию. Результаты ($M \pm SD$) представлены в табл. 6 и 7.

Таблица 6. Отношения частот спектральных гармоник СФВ по поверхности грудной клетки, осредненные по группе здоровых ($n = 9$)

№ гармоники	№ канала										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
2	2.0 ± 0.1 $n = 21$	2.0 ± 0.2 $n = 17$	2.1 ± 0.2 $n = 13$	2.1 ± 0.2 $n = 10$	2.0 ± 0.3 $n = 4$	2.1 ± 0.3 $n = 3$	2.1 ± 0.2 $n = 4$	2.0 ± 0.3 $n = 3$	2.0 ± 0.3 $n = 4$	2.1 ± 0.1 $n = 3$	1.8 ± 0.3 $n = 4$
3	3.1 ± 0.3 $n = 13$	3.1 ± 0.4 $n = 10$	3.3 ± 0.5 $n = 6$	3.4 ± 0.8 $n = 4$	3.4 ± 1.1 $n = 3$	3.7 $n = 1$	3.3 $n = 1$	3.5 ± 0.8 $n = 4$	3.2 ± 0.8 $n = 6$	3.1 ± 0.1 $n = 2$	3.0 ± 0.1 $n = 2$
4	3.9 ± 0.1 $n = 5$	4.2 ± 0.9 $n = 5$	4.3 ± 0.9 $n = 4$	3.9 ± 0.1 $n = 3$	3.2 $n = 1$	4.6 $n = 1$	4.4 $n = 1$	–	3.9 ± 0.2 $n = 2$	4.1 ± 0.0 $n = 2$	4.0 $n = 1$
5	5.0 $n = 1$	4.7 ± 0.5 $n = 2$	5.4 $n = 1$	5.3 $n = 1$	–	–	5.5 $n = 1$	–	5.0 $n = 1$	5.2 $n = 1$	5.3 $n = 1$

Примечание. n – количество свистов (любого типа), соответствующих определенному номеру гармоники (например, в трахее (канал 1) у всех добровольцев наблюдается 21 свист, соответствующий 2-й гармонике).

Таблица 7. Отношения частот спектральных гармоник СФВ по поверхности грудной клетки, осредненные по группе больных ($n = 10$)

№ гармоники	№ канала										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
2	2.0 ± 0.1 $n = 21$	2.0 ± 0.1 $n = 17$	2.0 ± 0.1 $n = 13$	2.0 ± 0.1 $n = 14$	1.9 ± 0.2 $n = 9$	1.9 ± 0.1 $n = 2$	1.9 ± 0.1 $n = 4$	2.0 ± 0.1 $n = 2$	2.0 ± 0.1 $n = 2$	1.9 ± 0.1 $n = 3$	–
3	2.9 ± 0.2 $n = 13$	3.0 ± 0.2 $n = 5$	2.9 ± 0.1 $n = 6$	2.9 ± 0.1 $n = 6$	2.8 ± 0.1 $n = 2$	–	–	–	–	2.7 $n = 1$	–
4	4.1 ± 0.4 $n = 7$	4.2 ± 0.7 $n = 4$	4.1 ± 0.2 $n = 3$	3.9 $n = 1$	–	–	–	–	–	–	–
5	4.9 ± 0.1 $n = 2$	4.9 $n = 1$	–	–	–	–	–	–	–	–	–
6	6.0 ± 0.1 $n = 2$	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
7	6.9 ± 0.1 $n = 2$	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–

Примечание. n – количество свистов (любого типа), соответствующих определенному номеру гармоники (например, в трахее (канал 1) у всех добровольцев наблюдается 21 свист, соответствующий 2-й гармонике).

У здоровых, в основном, отношения частот оказались близки к номерам гармоник. Максимальное число гармоник равно 5. Что касается количества гармоник, то больше всего наблюдается 2-х гармоник над трахеей (канал 1) и каналах 2–4, а также 3-х гармоник в каналах 1 и 2. Чем более периферически была расположена точка съема сигнала канала (соответственно удаленнее от центральных ДП), тем меньше гармоник СФВ в нем встречалось. Также уменьшалось количество гармоник свистов с ростом номера гармоники. У больных отношения частот всюду были близки к номерам гармоник. Максимальное число гармоник равно 7, а в 11-м канале гармоники отсутствовали. По количеству гармоник преобладали 2-е и 3-е гармоники над трахеей, а также 3-е гармоники в канале 2. Чем дальше от трахеи по грудной клетке были расположены точки съема (каналы), тем количество гармоник СФВ было меньше. Как и у здоровых, количество гармоник СФВ уменьшалось с ростом номера гармоники.

Дополнительно заметим, что у здоровых все гармоники (со 2-й по 5-ю) наблюдаются практически во всех каналах (т.е. и над центральными, и над удаленными ДП), тогда как у больных только 2-е гармоники встречаются во всех каналах (кроме 11-го), 3-е и 5-е гармоники встречаются только над центральными ДП, а 6-е и 7-е только над трахеей. Таким образом, у больных отмечается более отчетливая ассоциация гармоник СФВ с центральными ДП, чем у здоровых.

ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ отношений частот спектральных гармоник свистов форсированного выдоха с частотами основного тона над трахеей показал, что как у больных, так и у здоровых отношения частот, в основном, близки к номерам гармоник, а по встречаемости преобладают 2-е и 3-е гармоники свистов. У здоровых максимальное число гармоник равно 5-ти, тогда как у больных это число достигает 7-ми. У здоровых распределение числа

гармоник по всем видам свистов более равномерное, тогда как у больных явно преобладают гармоники среднечастотных свистов. При этом, чем выше номер гармоники, тем реже они встречаются.

Оценка относительных уровней интенсивностей гармоник свистящих звуков над трахеей показала, что как у здоровых, так и у больных в подавляющем большинстве случаев по всем видам свистов происходит уменьшение относительных уровней интенсивности с ростом номера гармоники. Как у больных, так и у здоровых по интенсивности преобладают вторые гармоники.

Анализ распределения гармоник свистов (без разделения по типам) по грудной клетке показал, что гармоники чаще встречаются над центральными дыхательными путями, чем над удаленными, лежащими в нижних отделах легких, для всех видов свистов, как у здоровых, так и, особенно, у больных.

Анализ отношений частот спектральных гармоник по всем 11 акустическим датчикам (каналам), распределенным по грудной клетке, показал, что как у больных, так и у здоровых во всех каналах отношения частот близки с номерами гармоник. По количеству преобладают 2-е и 3-е номера гармоник над центральными дыхательными путями. Чем удаленнее датчик (канал) от трахеи, тем меньше гармоник свистов в его отклике встречается. Также уменьшается количество гармоник с ростом их номера. У больных отмечается более отчетливая ассоциация гармоник с центральными дыхательными путями.

Закономерен вопрос, каково происхождение наблюдаемых гармоник свистящих звуков форсированного выдоха? Источниками гармоник, как известно, могут быть многомодовые колебательные системы или нелинейность колебательного процесса/системы.

Многомодовой колебательной системой, в принципе, является бронхиальное дерево человека, представляющее собой систему воздухонаполненных трубок. Известно, что цилиндрическую трубу с абсолютно жесткими стенками можно рассматривать как длинную линию, поскольку вдоль такой трубы может бежать одномерная волна любого профиля. Для звука с длиной волны λ труба круглого сечения будет “узкой” при радиусе $a < 0.61\lambda$ (очень узкая $a \ll 0.61\lambda$) [28].

По данным, например [29, 30], в диапазоне выше 400 Гц, соответствующему рассматриваемым свистам, скорость звука в просвете дыхательных путей близка к скорости звука в неограниченной воздушной среде. Отсюда следует, что стенки трубы, образованной дыхательными путями, ведут себя в исследуемом диапазоне частот как абсолютно жесткие. Известно, что в этом случае в узких трубах распространяется плоская звуковая волна.

Действительно, для частоты выше 400 Гц и скорости звука 330 м/с длина звуковой волны в воздухе составит $\lambda = 82.5$ см. Так как наибольший диаметр дыхательных путей (в трахее) составляет около 2 см, то условие $a \ll 0.61\lambda$ выполняется с запасом. Поэтому мы можем рассматривать трахеобронхиальное дерево как очень узкую в волновом смысле трубу. Заметим, что, несмотря на увеличение совокупного сечения бронхиального дерева после 5–7 генераций ветвления, сами трубки остаются узкими и поэтому приближение узкой трубы работает не только в районе крупных дыхательных путей, но и на всем протяжении бронхиального дерева.

В модели узкой трубы в зависимости от типа крышек на концах могут наблюдаться ряды волновых резонансов. Если обе крышки абсолютно жесткие или абсолютно мягкие, будет наблюдаться полуволновой целочисленный ряд гармоник. В трубе с одной абсолютно жесткой и другой абсолютно мягкой крышкой, на первой из них должна оказаться пучность, а на второй – узел давлений. Поэтому по длине такой трубы должно укладываться нечетное число четвертей длин волн. Открытый конец равносильно абсолютно мягкой крышке. Трахеобронхиальное дерево, как правило, представляют узкой трубой, у которой один конец, у рта, закрыт (сужение просвета), а другой открыт (резкое увеличение совокупного сечения просвета). В таком случае должны наблюдаться только нечетные четвертьволновые гармоники, что и было показано для гласных звуков голоса в [31]. Как видно, последнее противоречит наблюдаемой нами экспериментально картине, в которой имеет место целочисленный ряд гармоник.

В этом свете необходимо напомнить о том обстоятельстве, что гармоники выявлены нами не у всех обследуемых. У 9 из 28 добровольцев их нет ни в одном из каналов. При этом интенсивность шумов форсированного выдоха над трахеей у тех обследуемых, у которых есть гармоники, выше, чем у тех, у кого гармоник нет. Из всего вышесказанного следует, что более вероятным механизмом возникновения гармоник свистящих звуков в нашем случае является нелинейность, которая, как известно, характеризуется целочисленным рядом гармоник.

Однако, что же тогда является источником предполагаемых нелинейных эффектов? Поскольку динамический диапазон измерительных трактов (датчик–АЦП–спектральный анализатор) составлял не менее 80 дБ, маловероятно, чтобы наблюдаемая нелинейность была связана с ограничением регистрируемых сигналов в нем. Помимо измерительного тракта, нелинейность может возникать в источнике сигнала или в акустическом тракте его распространения к датчикам. Сходство

основных частот свистов и преимущественное распределение гармоник и, следовательно, нелинейных эффектов над центральными дыхательными путями бронхиального дерева (табл. 6, 7) свидетельствует, скорее, в пользу нелинейности в источнике. Вероятно, что источник нелинейности расположен в трахее и крупных бронхах. В этом случае нелинейные гармоники должны затухать (по частоте встречаемости, числу и/или интенсивности) при распространении вдаль от источника, что и наблюдается по результатам нашего эксперимента.

Каков же предполагаемый механизм возникновения нелинейности в источнике при продуцировании свистов? Претендентами, очевидно, могут быть собственно аэро-гидродинамические турбулентные вихри воздушного потока или их взаимодействие с упругой стенкой дыхательных путей. В первом случае можно ожидать существенного ослабления акустического излучения гармоник на границе стенки дыхательных путей (значительно превышающей по акустическому сопротивлению воздух в просвете дыхательных путей). Второй случай представляется более вероятным, т.к. здесь акустическое излучение генерируется уже в тканях легкого и далее распространяется в более однородной по акустическому сопротивлению среде.

Заметим, что из предполагаемых вариантов источников свистов, рассмотренных во введении, последняя картина качественно соответствует вибрациям, возникающим при сходе вихрей с кромки ветвления крупных дыхательных путей [12, 13], в том числе с коэффициентами Струхала 0.2–0.3 [14, 19–21], срыву вихрей во внутригрудной части трахеи [15, 16, 18], автоколебанию стенок дыхательных путей [8]. Вопрос, насколько выявленные особенности позволяют уточнить механизмы функционирования источников свистов, требует дальнейшего исследования.

Из ограничений исследования следует упомянуть субъективное выделение “дорожек” свистящих звуков на спектрограммах. Надо отметить, что нами предпринимались попытки формализовать процедуру распознавания свистов, но в связи с нестационарностью процесса (частоты свистов и гармоник меняются произвольным образом в течение маневра форсированного выдоха), сделать этого не удалось. Поэтому свисты и их гармоники распознаются одним и тем же опытным экспертом. Ранее нами была показана высокая внутриэкспертная стабильность оценок параметров свистов [32].

Исследование поддержано Программой фундаментальных исследований Российской академии наук (номер государственной регистрации проекта АААА-А20-120031890011-8).

ВЫВОДЫ

1. Гармоники СФВ, соответствующие целочисленному ряду, обнаружены над трахеей у 19 (68%) из 28 добровольцев группы, включающей здоровых и больных респираторными заболеваниями.

2. При оценке над трахеей: у больных респираторными заболеваниями ($n = 10$) наблюдается до 7 гармоник СФВ, у здоровых ($n = 9$) – до 5; в обеих группах имеется тенденция к снижению интенсивности и частоты встречаемости гармоник СФВ с ростом ее номера.

3. При оценке по поверхности грудной клетки: гармоники СФВ чаще встречаются над крупными центральными дыхательными путями бронхиального дерева, чем над дистальными дыхательными путями, расположенными в нижних отделах легких, и это более отчетливо выражено у больных, а осредненные значения отношения частот спектральных гармоник СФВ с частотами основного тона как у больных, так и у здоровых, в основном, соответствуют номерам гармоник.

4. Наиболее вероятной причиной возникновения гармоник СФВ представляется нелинейность в источнике их шумообразования, который может находиться в трахее и крупных бронхах, а предполагаемым механизмом возникновения нелинейности в источнике при генерации СФВ является взаимодействие турбулентных вихрей воздушного потока с упругой стенкой дыхательных путей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Pride N.B.* Tests of forced expiration and inspiration // *Clinics in Chest Medicine*. 2001. V. 22(4). P. 599–622. [https://doi.org/10.1016/s0272-5231\(05\)70055-1](https://doi.org/10.1016/s0272-5231(05)70055-1)
2. *Korenbaum V.I., Pochekutova I.A., Kostiv A.E., Malayeva V.V., Safronova M.A., Kabatsova O.I., Shin S.N.* Human forced expiratory noise. Origin, apparatus and possible diagnostic applications // *J. Acoust. Soc. Am.* 2020. V. 148. № 6. P. 3385–3391.
3. *Forgacs P.* The functional basis of pulmonary sounds // *Chest*. 1978. V. 73. № 3. P. 399–405.
4. *Gavriely N., Palti Y., Alroy G., Grotberg J.B.* Measurement and theory of wheezing breath sounds // *J. Appl. Physiol.* 1984. V. 57. P. 481–492.
5. *Grotberg J.B., Davis S.H.* Fluid – dynamic flapping of collapsible channel: sound generation and flow limitation // *J. Biomechanics*. 1980. V. 13. P. 219–230.
6. *Grotberg J.B., Reiss E.L.* Subsonic flutter // *J. Sound Vib.* 1984. V. 92. P. 349–361.
7. *Xu J., Chen Q., Min Y., Zhang Y.* A study on wheezes models // *ILSA Proceedings*. Helsinki, 1992. P. 60.
8. *Gavriely N., Kelly K.B., Groberg J.B., Loring S.H.* Forced expiratory wheezes are a manifestation of airway flow limitation // *J. Appl. Physiol.* 1987. V. 62. P. 2398–2403.

9. *Shabtai-Musih Y., Grotberg J.B., Gavriely N.* Spectral content of forced expiratory wheezes during air, He, and SF6 breathing in normal humans // *J. Appl. Physiol.* 1992. V. 72. P. 629–635.
10. *Gavriely N., Shee T.R., Cugell D.W., Grotberg J.B.* Flutter in flow-limited collapsible tubes: a mechanism for generation of wheezes // *J. Appl. Physiol.* 1989. V. 66. P. 2251–2261.
11. *Beck R., Rosenhouse G., Mahagnah M.R., Chow M., Cugell D.W., Gavriely N.* Measurements and theory of normal tracheal breath sounds // *Ann. of Biomed. Eng.* 2005. V. 33. P. 1344–1351.
12. *Schroter R.C., Sudlow M.F.* Flow patterns in models of the human bronchial airways // *Respir. Physiol.* 1969. V. 7. № 3. P. 341–355.
13. *Schröder F., Bordin S., Härtel S., Washausen M., Klaas M., Schröder W.* Comparison of steady and unsteady exhalation using multiplane-stereo PIV // 16th Int. Symp. on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics. Lisbon, Portugal, 09–12 July, 2012.
14. *Hardin J.C., Patterson J.L.* Monitoring the state of the human airways by analysis of respiratory sound // *Acta Astronautica.* 1979. V. 6. P. 1137–1151.
15. *Hardin J.C., Pope D.S.* Sound generation by a stenosis in a pipe // *AIAA Journal.* 1992. V. 30. P. 312–317.
16. *Любимов Г.А., Скобелева И.М., Дьяченко А.И., Стронгин М.М.* Оценка интенсивности трахеальных звуков форсированного выдоха // *Физиология человека.* 2013. Т. 39. № 1. С. 126–134.
17. *Вовк И.В., Вовк О.И.* О возможности физического моделирования шумов, генерируемых потоком воздуха в элементах дыхательных путей человека // *Акуст. вісник.* 1999. Т. 2. № 2. С. 11–25.
18. *Копьев В.Ф., Миронов М.А., Яковец М.А.* Шум потока в гофрированной трубке с точки зрения теории волн неустойчивости // *Акуст. журн.* 2015. Т. 61. № 5. С. 547–551.
19. *Коренбаум В.И., Рассказова М.А., Почекутова И.А., Фершалов Ю.Я.* Механизмы шумообразования свистящих звуков, наблюдаемых при форсированном выдохе здорового человека // *Акуст. журн.* 2009. Т. 55. № 4–5. С. 516–525.
20. *Сафронова М.А., Почекутова И.А., Коренбаум В.И.* Пиковая частота свистов форсированного выдоха при бронходилатационной пробе // *Физиология человека.* 2014. Т. 40. № 6. С. 123–128.
21. *Коренбаум В.И., Почекутова И.А., Малаева В.В., Костив А.Е., Сафронова М.А., Шин С.Н.* Шумы форсированного выдоха и их диагностические приложения // *Труды XIV Всероссийской конференции “Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики”.* 2018. С. 625–627.
22. *Александрова Н.И., Бобков А.Г., Богданов Н.А.* Болезни органов дыхания: руководство для врачей: в 4 т. / Под общей редакцией Палеева Н.Р. М.: Медицина, 1989. Т. 1. 683 с.
23. *Редерман М.И.* Актуальные проблемы аускультации легких // *Терапевтический архив.* 1989. Т. 61. № 4. С. 113–116.
24. *Коренбаум В.И., Кулаков Ю.В., Тагильцев А.А.* Акустические эффекты в системе дыхания человека при форсированном выдохе // *Акуст. журн.* 1997. Т. 43. № 1. С. 78–86.
25. *Beck R., Odeh M., Oliven A., Gavriely N.* The acoustic properties of snores // *Eur. Resp. J.* 1995. V. 8. № 12. P. 2120–2128.
26. *Korenbaum V.I., Pochekutova I.A., Kostiv A.E., Tagiltsev A.A., Shubin S.B.* Technology of human pulmonary function testing by means of tracheal forced expiratory noises analysis // *IFMBE Proceedings.* 2013. V. 39. P. 2192–2195.
27. *Коренбаум В.И., Ширяев А.Д.* Особенности звукопроводения в легких человека в диапазонах частот 80–1000 Гц и 10–19 кГц // *Акуст. журн.* 2020. Т. 66. № 5. С. 563–574.
28. *Исакович М.А.* Общая акустика. М.: Наука, 1973. 496 с.
29. *Дьяченко А.И.* Математические модели механики легких с распределенными параметрами / автореф. дис. доктора техн. наук : 01.02.08. Москва, 2003. 38 с.
30. *Басовский В.Г., Вовк И.В., Вовк О.И.* Распространение звука в бронхиальном дереве человека. Анализ численных результатов // *Акуст. вісник.* 2000. Т. 3. № 4. С. 11–20.
31. *Lulich S.M., Alvan A., Arsikere H., Morton J.R., Sommers M.S.* Resonances and wave propagation velocity in subglottal airways // *J. Acoust. Soc. Am.* 2011. V. 130. № 4. P. 2108–2115.
32. *Коренбаум В.И., Сафронова М.А., Маркина В.В., Почекутова И.А., Дьяченко А.И.* Исследование механизмов формирования свистящих звуков форсированного выдоха здорового человека при дыхании газовыми смесями с разной плотностью // *Акуст. журн.* 2013. Т. 59. № 2. С. 268–278.