

Перспективные направления исследования звуков дыхания в пульмонологии

Корбут Н.Н., Лыховский Ю.И., Лопата В.А., Мясный И.С.,
Петренко Л.В., Попов А.А., Стукалин В.А., Танчик А.В.

Резюме. Выполнен обзор современных методов исследования акустических эффектов в лёгких и их использования для диагностики в пульмонологии. Рассмотрены проблемы формирования теории респираторной акустики, моделирования легочных структур и разработки на их основе аппаратных и программных средств исследования звуков дыхания. Отмечены перспективные пути решения этих проблем.

Ключевые слова: акустические эффекты в легких, стетоскоп, фонендоскоп, перкуссия, аускультация, бронхофония, пульмонография, регистрация акустических эффектов

Актуальность проблемы. Функциональная диагностика легких, изучающая параметры легочных структур и заполняющего их воздуха, использует методы прямого и косвенного исследования. Современная практика располагает единственным прямым методом исследования легочной ткани – бронхоскопией, т. е. визуализацией внутренней поверхности трахеобронхиального дерева с помощью эндоскопа. Косвенными методами исследуются воздействия на лёгкие различных физических факторов (активные косвенные методы) или вторичные физические явления, сопровождающие работу легких (пассивные косвенные методы). Особое место среди косвенных методов исследования лёгких занимают акустические – активный (перкуссия) и пассивный (аускультация).

С точки зрения физиологии, акустические процессы наиболее близки дыхательным, поскольку их объединяют общие законы движения воздушных потоков.

Перкуссия – метод исследования пациента посредством постукивания по его телу и оценки возникающих при этом звуков, – применялся в диагностике уже во времена Гиппократов. Но в дальнейшем этот способ был забыт, и только солидная публикация венского врача Leopold Auenbrugger «Новое обнаружение ударами по груди человека скрытых внутренних признаков заболеваний сердца» (рис. 1) в 1761 году заново открыла его. Auenbrugger описал непосредственную перкуссию грудной клетки сложенными полусогнутыми пальцами правой руки.

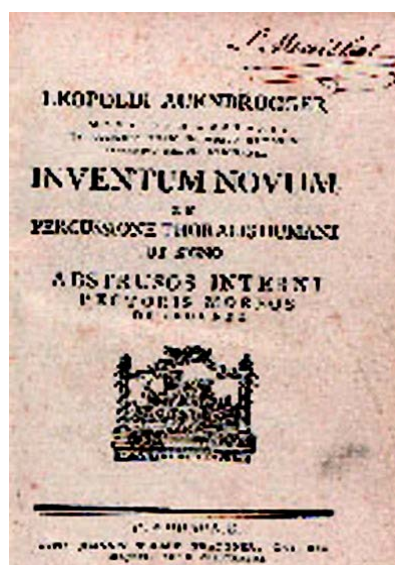


Рис. 1. Leopold Auenbrugger и титульный лист его книги



Рис. 2. Jean Nicolas Corvisart (а); Joseph Skoda (б); Rene Theophile Laennec (в)

Несмотря на то, что способ перкуссии был достаточно разработан автором, он не нашел последователей среди врачей – вероятно, потому, что требовал для своего освоения постоянной тренировки. Почти 50 лет никто не применял этот метод, пока Jean Nicolas Corvisart – лейб-медик Наполеона и профессор Парижского университета (рис. 2а) не познакомился с книгой Auenbrugger.

Он перевел ее на французский язык и стал преподавать метод перкуссии, что стало началом научного периода в его развитии, а в 1839 г. венский клиницист Joseph Skoda (рис. 2б) обосновал метод теоретически, применив к объяснению перкуSSIONНЫХ звуков законы акустики.

В отличие от перкуссии, аускультация исследует звуки лёгких, возникающие в процессе дыхания. Выслушивание таких звуков применялось в диагностике ещё Гиппократом, в сочинениях которого упоминаются шум трения плевры – «скрип кожаного ремня» и влажные хрипы в легких – «кипение уксуса». Но затем, в течение 2 200 лет, выслушивание не играет заметной роли в медицине, а диагностическим методом становится благодаря французскому врачу Rene Theophile Laennec (рис. 2в), который изобретением стетоскопа в 1819 г. положил начало современной аускультации и настолько детально её разработал, что она до сих пор ос-

тается в намеченных им рамках. Аускультация быстро и широко распространилась, стала повседневным и необходимым методом врачебного исследования, а стетоскоп получил символическое значение эмблемы врача.

Первый стетоскоп представлял собой разъемную полую деревянную трубку длиной 33 см с каналом в 6 мм. Дальнейшие изменения первоначальной формы стетоскопа привели к более целесообразному для улавливания звуков устройству приёмной части – вплоть до ее удвоения для создания стереозвука (рис. 3а) и применению для изготовления трубки различных пород дерева, металла, каучука, стекла (рис. 3б).

В 1894 году появился первый фонендоскоп. Он отличался от стетоскопа мембраной, которая закрывала всю рабочую поверхность (рис. 4). Она улучшала проведение звуков, появилась возможность расслышать в них больше нюансов.

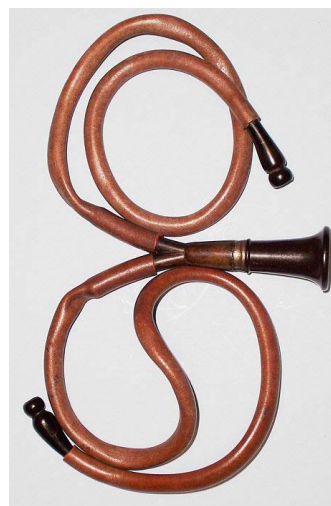
Экскурс в историю изучения звуков лёгких даёт возможность оценить новые методы, разработанные за последнее время, а также модификации уже существующих в этой области. В их необходимости нет сомнений, поскольку восприятие перкуссии и аускультации легких остаётся субъективным, а понимание физики происхождения и распространения звуков в системе дыхания человека – недостаточным. До сих пор аускультация

легких остается более искусством, чем наукой, т. к. ее результаты зависят от квалификации врача, особенностей его слуха, акустических свойств стетоскопа. Такое положение дел постоянно служило стимулом для

создания новых акустических методов диагностики легких: пневмофонографии (1923), бронхофонографии (1957), электронной перкуссии (1967) и трахеофонографии (1989).



а)



б)

Рис. 3. Конструкции стетоскопов XIX века



а)



б)

Рис. 4. Конструкции фонендоскопов: 1894 г. (а), 2014 г. (б)

Все новые способы исследования звуков лёгких являются развитием методик перкуссии и аускультации и, соответственно, относятся к косвенным методам. Из активных косвенных методов акустического исследования лёгких в практике применяют бронхофонию.

Перкуссию и бронхофонию объединяет то, что оба метода исследуют воздействие на легкие звуковых колебаний. Но если при перкуссии звук подается с поверхности груд-

ной клетки, то при бронхофонии – голосом по трахее, с иной закономерностью распределения звуковых колебаний по воздушному столбу. Предлагая пациенту произносить шепотом различные слова, возбуждающие звуковые колебания сложного спектрального состава, врач контролирует фонендоскопом, установленным на поверхности грудной клетки, изменения интенсивности и тона звуков. Заключение о локальном состоянии воздушного тракта лёгких формируется на эмпири-

ческом опыте, накопленном за время использования бронхофонии.

Современная бронхофония основана на объективном компьютерном анализе различных характеристик дыхательных шумов. Метод компьютерной бронхофонографии (КБФГ) оценивает интенсивность акустических феноменов дыхания, связанных с увеличением турбулентности воздушных потоков по респираторному тракту, фиксируя амплитудно-частотные характеристики дыхательных шумов, что позволяет объективно оценивать выраженность нарушений. В педиатрической практике России бронхофонографическое исследование проводится с помощью комплекса «Паттерн-01» [13]. Датчик со специальным загубником, помещается в ротовую полость пациента так, что его чувствительный элемент направлен в сторону го-

ртани, а носовое дыхание перекрывается с помощью зажима. Регистрация дыхательных шумов производится троекратно при спокойном дыхании пациента в течение 5-10 с в полосе частот от 200 до 12600 Гц, формируемой комплектом частотных фильтров. Результаты компьютерной обработки данных представляют собой множество эквидистантных мгновенных спектров, образующих трёхмерную поверхность – бронхофонограмму, которая отображает акустический паттерн дыхания (рис. 5).

В состав комплекса, наряду с аппаратной частью, входят прикладные программы PATTERN (обработка и визуализация специфических акустических сигналов) и PATTERN ANALYZER (расчет количественных показателей, характеризующих респираторный цикл).

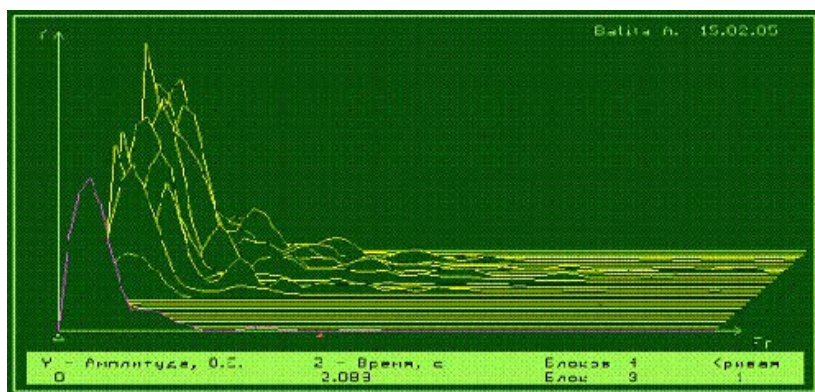


Рис. 5. Образец бронхофонограммы ребенка с тяжелым течением бронхиальной астмы

Активным косвенным методом акустического исследования лёгких является также пульмофонография (ПФГ). Этот метод, изобретённый в СССР в 1959 г. Л.И. Немеровским и соавторами [11], предусматривает подачу в лёгкие акустического сигнала частотой 80 Гц и уровнем звука до 60 дБ. Сигнал, прошедший по воздуху, заполняющему легкие, частично поглощённый лёгочной тканью и модулированный дыханием, воспринимается датчиками на поверхности грудной клетки и регистрируется в виде пульмофонограммы (рис. 6).

Несмотря на отсутствие теоретического обоснования в начальном периоде своего становления, пульмофонография была позитивно воспринята пульмонологами и внед-

рена в клиническую практику на базе аппарата «Фонопультмограф ФПГ 3-1», выпускавшегося Киевским ПО «Медаппаратура» с 1979 г. Современные исследования в области фонопультмографии сосредоточены на решении проблем цифровой обработки её сигнала спектральным и вейвлетным анализом, создания программно-аппаратного комплекса диагностики лёгких [1, 7].

Автор метода в монографии [11] начал разработку теории распространения звука по воздушному тракту бронхиального дерева и адекватных моделей процесса. Эти разработки дали импульс интенсивному развитию новых методик, связанных с регистрацией звуков дыхания и их интерпретацией. Фор-

мируется новое перспективное направление теоретических и прикладных исследований – респираторная акустика, использующая технологии цифровой обработки и визуализации результатов исследований, а также опыт клинической физиологии дыхания в диагностике респираторного тракта. Ясно, что прогресс в этой области невозможен без глубокого понимания природы звуков, которые

сопровождают акт дыхания в норме и при различных патологиях. Таким образом, очерчивается проблема моделирования источников респираторных звуков и каналов их распространения в грудной клетке человека [6]. К настоящему времени опубликованы работы, предлагающие различные варианты моделирования, из которых можно выделить следующие:

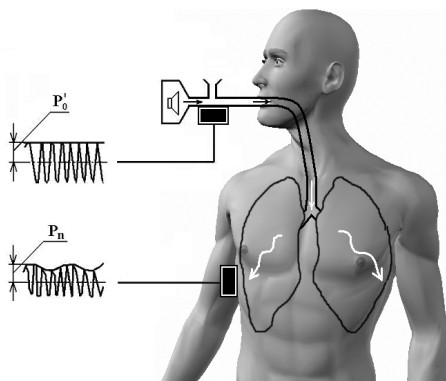


Рис. 6. Схема проведения пульмофонографии легких

1. Аналоговые модели импеданса лёгких на основе теории электрических цепей [3, 15].

2. Акустомеханические модели возникновения дыхательных шумов при турбулентном режиме воздушных потоков [1, 12].

3. Математические модели лёгких как системы с распределёнными параметрами [6].

4. Моделирование респираторного тракта двухрезонансной системой [9].

В этой обзорной статье нет возможности проводить сравнительный анализ указанных методов. Отметим только, что каждый из них приближает к лучшему пониманию акустических эффектов в процессе дыхания. Однако ожидать скорейшей разработки общей акустической технологии анализа дыхательных звуков пока что не приходится. По мнению большинства исследователей ещё не достигнуто достаточно ясное понимание процессов формирования и распространения звуков в бронхиальном дереве, которое с точки зрения акустики можно рассматривать как своеобразную разветвленную систему волноводов, имеющую 23 уровня.

Вторую по сложности методическую проблему респираторной акустики составляет анализ зарегистрированных звуков, содержа-

щих большой объем информации [4, 8], имеющих сложный статистический характер и широкий частотный спектр (20-2500 Гц). Эта проблема решается с помощью нескольких возможных способов обработки сигналов:

1. Расширенный во времени анализ формы сигнала (time-expanded waveform analysis – TEWA) с использованием записи звуков дыхания на магнитные ленты и медленного режима их воспроизведения [16].

2. Спектральный анализ, позволяющий исследовать частотный состав сигнала [17].

3. Преобразования Фурье (быстрое и оконное) [9].

4. Вейвлет-преобразование одномерного сигнала [18].

Технической проблемой внедрения компьютерного акустического анализа легочных звуков в клиническую практику остаётся аппаратное обеспечение. Исследователи отмечают, что должен быть разработан надежный преобразователь легочных звуков, максимально нечувствительный к посторонним шумам в диапазоне до 2000 Гц.

Обзор литературы показал, что в качестве преобразователей применяются электронный микрофон и контактный акселерометр.

Задача выбора типа преобразователя сложна, поскольку необходимо удовлетворить противоречащие друг другу метрологические и эксплуатационные требования. Микрофоны неперспективны из-за зависимости результатов измерений от условий контакта с грудной клеткой, а их технические особенности затрудняют стандартизацию регистрации и анализа исследуемых сигналов [11]. Преимущества контактных акселерометров – малые габариты и масса, отсутствие влияния условий контакта с грудной клеткой на результаты измерений, возможность калибровки, чувствительность к высокочастотным компонентам. В то же время акселерометры отличаются хрупкостью и склонны к внутреннему резонансу в диапазоне, близком к частотам легочных звуков [14].

Несмотря на то, что рассмотренные проблемы далеки от полного разрешения, это не мешает использованию методов анализа звуков дыхания в диагностической практике. Кроме бронхофонии и пульмофонографии, аппаратура которой активно модернизируется [2, 3], известны также и другие аппаратные методики, с успехом применяемые в пульмонологии. Исследовательская группа проф. В.И. Коренбаума разработала комплекс трахеофонографии (рис. 7), позволяющий регистрировать и анализировать звуки форсированного выдоха электретным микрофоном со стетоскопической насадкой [9, 10].

Обработка акустических сигналов пакетами программ «Пульмофонотест» и SpectraLab даёт возможность объективной диагностики состояния трахео-бронхиальной системе при хроническом бронхите и бронхиальной астме.

Компьютерная система для экспресс-анализа и классификации звуков дыхания, разработанная в Институте гидромеханики НАН Украины, предназначена для многоканального неинвазивного мониторинга и диагностики состояния респираторного тракта пациента. Регистрация звуков дыхания (рис. 8) осуществляется с помощью чувствительных пьезоэлектрических акселерометров, которые крепятся на спинке кресла пациента [4].

Фирма «Deep Breeze» (Израиль) предлагает систему VRI вибрационной диагностики дыхания (рис. 9) для регистрации акустических эффектов турбулентности воздушных потоков при дыхании микрофонами, соединёнными в матрицы. Система применяется как в условиях амбулаторий, так и искусственной вентиляции легких.

Каковы же перспективы методического и аппаратного обеспечения исследования звуков лёгких? Они характеризуются следующим образом [5, 10]:

1. Соединение респираторной акустики со спирометрическими измерениями.
2. Возможность определения обструкции верхних дыхательных путей акустическим мониторингом регионарной вентиляции с поверхности грудной клетки.



а)



б)

Рис. 7. Комплекс трахеофонографии: общий вид (а) и проведение исследования (б)

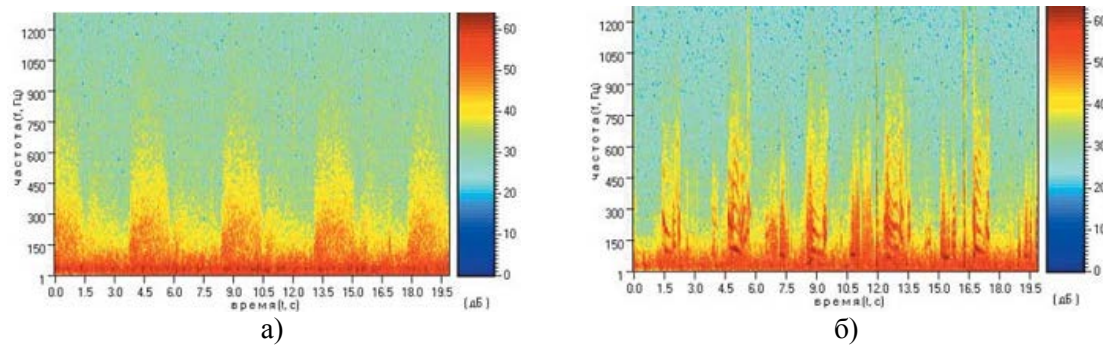


Рис. 8. Респираграммы, формируемые компьютерной системой для экспресс-анализа и классификации звуков дыхания: а) норма; б) патология

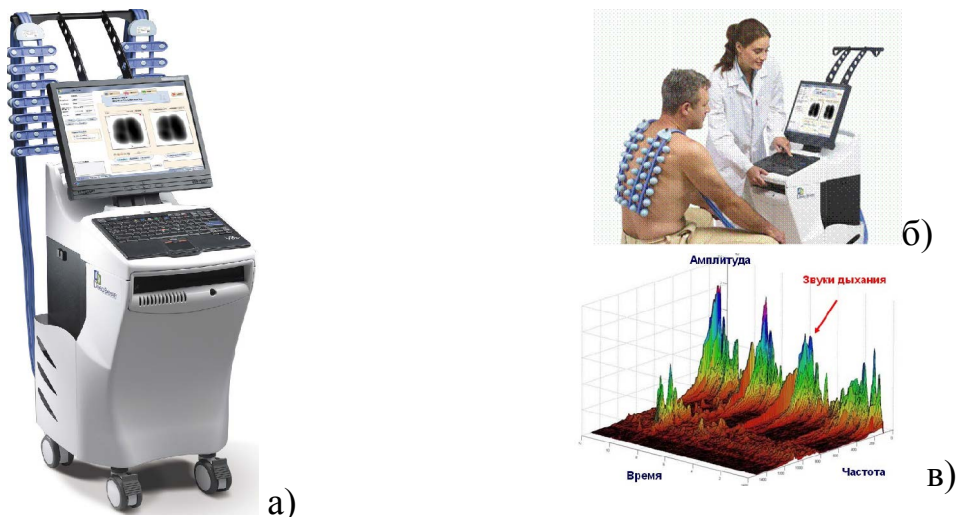


Рис. 9. Система VRI вибрационной диагностики дыхания: а) внешний вид; б) обследование пациента; в) 3D-диаграмма регистрируемых звуков

3. Регистрация и исследование звуков с различных участков лёгких для объективного контроля эффективности проводимой терапии.

4. Многоканальная запись дыхательных звуков и их ретрансляция.

5. Мониторинг регионарной вентиляции пациентов, находящихся на искусственном дыхании.

6. «Акустическое картирование» поверхности грудной клетки.

7. Разработка автоматического распознавания и отсеечения посторонних помех, избирательная обработка основных и дополнительных дыхательных шумов.

Публикации последнего времени в изданиях по акустике, физиологии, медицине и информационным технологиям поставили вопрос об объединении научно-исследовательских усилий в области респираторной акустики. В этом направлении были предприняты организационные шаги.

Международные исследования финансируются Европейской комиссией по стандартизации компьютерного анализа дыхательных звуков (CORSA project) [18]. Международная Ассоциация по звукам лёгких (International Lung Sounds Association, ILSA) ежегодно проводит международные научные конференции. Необходимость проведения первой из них в Бостоне (1976 г.) аргументировалась следующим образом: «Исследования звуков лёгких в последние годы проводятся всё чаще. Эта конференция созывается для того, чтобы обеспечить возможность обмена идеями и опытом среди тех, кто активно интересуется этой темой. Клиницисты, физиологи, инженеры и психологи могут способствовать лучшему пониманию того, что такое звуки лёгких. Они будут иметь больше шансов для этого после совместных обсуждений». Десятки лет, прошедшие с тех пор, убедительно доказывают правоту этих слов.

Список использованных источников

1. Величко О.Н. Анализ данных пульмофонографического исследования / О.Н. Величко, О.В. Вьюнник // Системи обробки інформації. – 2010. – Вип. 2 (83). – С. 233–239.
2. Вовк И.В. Проблемы моделирования акустических свойств грудной клетки и измерения шумов дыхания / И.В. Вовк, В.Т. Гринченко, В.Н. Олейник // Акуст. журн. – 1995. – Т. 41. – № 5. – С. 758–768.
3. В'юник О.В. Система для пульмофонографічних досліджень захворювань легенів : автореф. дис... на здобуття наук. ступеня канд. тех. наук // О.В. В'юник. – Х., 2010. – 25 с.
4. Гринченко В.Т. Компьютерная аускультация – новый метод объективизации характеристик звуков дыхания / В.Т. Гринченко, А.П. Макаренков, А.А. Макаренко-ва // Клиническая информатика и Телемедицина. – 2010. – Т. 6. – Вып. 7. – С. 31–36.
5. Гусейнов А.А. Акустический анализ дыхательных звуков: состояние вопроса / А.А. Гусейнов, З.Р. Айсанов, А.Г. Чучалин // Пульмонология. – 2005. – № 6. – С. 105–112.
6. Дьяченко А.И. Математические модели механики лёгких с распределёнными параметрами : автореф. дисс. ... на соискание ученой степени докт. техн. наук // А.И. Дьяченко. – М., 2003. – 38 с.
7. Ицкович А.И. Современные проблемы анализа дыхательных шумов / А.И. Ицкович, Е.Ю. Шумарова, В.И. Коренбаум // Тихоокеанский медицинский журнал. – 2005. – № 2. – С. 11–13.
8. Комар С.И. Аускультация лёгких и электронный акустический анализ респираторных шумов / Комар С. И. – Челябинск: Челябинская гос. мед. акад., 2008. – 34 с.
9. Коренбаум В.И. Акустическая диагностика системы дыхания человека на основе объективного анализа дыхательных звуков / [В.И. Коренбаум, И.А. Почекутова, Ю.В. Кулаков, А.А. Тагильцев и др.] // Вестник ДВО РАН. – 2004. – № 5. – С. 68–79.
10. Кулаков Ю.В. Акустическая диагностика заболеваний лёгких: возможности методов и перспективы развития / Ю.В. Кулаков // Тихоокеанский медицинский журнал. – 2008. – № 3. – С. 65–68.
11. Немеровский Л.И. Пульмофонография / Л.И. Немеровский. – М.: Медицина, 1981. – 160 с.
12. Олійник В.Н. Вплив в'язкості повітря на поширення звуку в бронхіальному дереві людини / В. Н. Олійник // Акустичний вісник. – 2002. – Т. 5. – № 3. – С. 52–60.
13. Селиверстова Н.А. Применение бронхофонографического исследования лёгких для оценки эффективности терапии бронхиальной астмы и обструктивного бронхита у детей раннего возраста / [Н.А. Селиверстова, Н.А. Геппе, В.С. Малышев, Утюшева М.Г.] // Педиатрия. – 2009. – Т. 87. – № 2. – С. 51–55.
14. Cheng-Li Que. Phonosprometry for non-invasive measurement of ventilation: methodology and preliminary results / Cheng-Li Que, Kolmaga C., Durand L.-G., Kelly S.M., Macklem P.T. // J. Appl. Physiol. – 2002. – V. 93. – № 10. – P. 1515–1526.
15. Diong B. Modeling human respiratory impedance comparing the best method with the least estimation errors / Diong B., Nazeran H., Nava P., Goldman M. // IEEE Engineering In Medicine and Biology Magazine. – 2007. – January/February. – P. 48–55.
16. Gadge P.B. Respiratory sound analysis using MATLAB / Gadge P.B., Mokal B.D., Bagal U.M. // International Journal of Scientific & Engineering Research. – 2012. – V. 3. – № 5. – P. 1–4.
17. Gavriely N. Spectral characteristics of chest wall breath sounds in normal subjects / Gavriely N., Moshe Nissan M., Rubin A.-H.E., Cugell D.W. // Thorax. – 1995. – V. 50. – P. 1292–1300.
18. Sovijarvi A.R.A. Standardization of computerized respiratory sound analysis / Sovijarvi A.R.A., Vanderschoot J., Earis J.E. / Eur. Respir. Rev. – 2000. – V. 10. – № 77. – P. 585.

Перспективні напрямки дослідження звуків дихання в пульмонології

Корбут М.М., Лиховський Ю.І., Лопата В.А., М'ясний І.С., Петренко Л.В., Попов А.А., Стукалін В.А., Танчик А.В.

Резюме. Здійснено огляд сучасних методів дослідження акустичних ефектів у легенях та їх використання для діагностики в пульмонології. Розглянуто проблеми формування теорії респираторної акустики, моделювання легеневої структури і розробки на їх основі апаратури.

Актуальні проблеми клінічної та профілактичної медицини (1.2014, том 2)

тних і програмних засобів дослідження звуків дихання. Зазначено перспективні шляхи розв'язання цих проблем.

Ключові слова: акустичні ефекти в легенях, стетоскоп, фонендоскоп, перкусія, аускультация, бронхофонія, пульмонографія, реєстрація акустичних ефектів.

Promising research directions breath sounds pulmonology

Korbut N., Lyhovsky Y., Petrenko L., Popov A., Stukalin V., Tanchik A.

Summary. *A review of modern methods study of acoustic effects in the lungs and their use for diagnostics in pulmonology are executed. The problems of the respiratory acoustics theory formation, pulmonary structures modeling and development on these bases the software and hardware for breath sounds investigations are reviewed. Prospective ways for these problems solutions are marked.*

Key words: *acoustic effects in the lungs, stethoscope, stethoscope, percussion, auscultation, bronhofoniya, pulmonography, registration acoustic effects.*