

АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ДАНИХ ПРО БІОМЕХАНІКУ ПАТОЛОГІЧНИХ ЛЕГЕНЕВИХ ШУМІВ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

Роботу присвячено дослідженню сучасних даних про біомеханіку патологічних легеневи́х шумів, їх різновидам, походженню та особливостям. Вивчено закономірності виникнення, проаналізовано біомеханіку відтворення.

Ключові слова: аускультация, респіраторна система, класифікація шумів, легені, дихальні шуми, паталогія дихання

Abstract

The work is devoted to the study of modern data on the biomechanics of pathological pulmonary murmurs, their types, origins, and characteristics. The patterns of occurrence have been studied, and the biomechanics of reproduction have been analyzed.

Keywords: auscultation, respiratory system, classification of noises, lungs, breathing noises, respiratory pathology

Вступ

Аускультация респіраторної системи залишається наріжним каменем клінічної діагностики легеневи́х захворювань, проте її інтерпретація часто базується на емпіричних асоціаціях, а не на глибокому розумінні фундаментальних фізичних процесів.

Легені являють собою складне гетерогенне середовище, що складається з газової фази, рідкої фази (кров, інтерстиціальна рідина, слиз) та в'язко-пружних твердих структур (стілки бронхів, альвеолярні перегородки, плевра). Розуміння генерації звуку в такій системі вимагає застосування принципів акустики суцільних середовищ та механіки рідин. Звук, що вислуховується на поверхні грудної клітки, є результатом трьох послідовних процесів: генерації акустичної енергії всередині дихальних шляхів або паренхіми, передачі цієї енергії через легеневу тканину та грудну стінку та сприйняття датчиком [1].

Актуальність даної роботи обумовлена необхідністю глибокого розуміння біомеханіки легеневи́х звуків для покращення аускультатії при зростаючому тягарі респіраторних захворювань у світі. Оскільки пневмонія залишається провідною причиною дитячої смертності, туберкульоз продовжує бути глобальною пандемією, а хронічне обструктивне захворювання легень та астма вражають сотні мільйонів людей.

Метою дослідження є вивчення фізики і механізму легеневи́х звуків, розбір класифікації легеневи́х шумів згідно з CORSA.

Результати дослідження

Фундаментальною передумовою виникнення дихальних шумів є рух повітря. У здорових легенях, особливо у дистальних відділах, потік переважно ламінарний. Цей режим описується законом Пуазейля, де об'ємна швидкість потоку (Q), прямо пропорційна градієнту тиску (ΔP), та четвертому ступеню радіуса трубки (r^4), і обернено пропорційна в'язкості газу (η) та довжині трубки (l):

$$Q = \frac{\Delta P \pi r^4}{8 \eta l} \quad (1)$$

Ламінарний потік характеризується впорядкованим рухом шарів повітря паралельно стінкам дихальних шляхів і є акустично "німим" (silent flow) [2]. Відсутність хаотичного перемішування та зіткнень молекул газу зі стінками не створює флуктуацій тиску, достатніх для генерації звуку. Перехід до турбулентного режиму, який є джерелом більшості нормальних та патологічних дихальних шумів, визначається безрозмірним числом Рейнольдса.

Легенева паренхіма діє як низькочастотний фільтр. Звукова енергія, що генерується у центральних дихальних шляхах (трахея, головні бронхи), зазнає значного ослаблення при проходженні через повітряні альвеоли. Високочастотні компоненти звуку розсіюються та поглинаються значно ефективніше, ніж низькочастотні. Це пояснює різницю між трахеальним диханням (широкий спектр

100-5000 Гц) та везикулярним диханням, яке чути на периферії (переважно <400 Гц). Патологічні процеси, такі як консолидація (пневмонія), змінюють акустичний імпеданс тканини, перетворюючи її на кращий провідник високих частот, що клінічно проявляється як бронхіальне дихання над ураженою ділянкою.

Сучасний підхід до класифікації легеневих шумів базується на об'єктивних фізичних параметрах, затверджених Європейським респіраторним товариством (ERS) та проектом CORSA.

Свистячі хрипи визначаються як безперервні, музикальні звуки з переважаючою частотою вище 400 Гц (часто >100 Гц і до 1000+ Гц), які зазвичай вислуховуються під час фази видиху. Довгий час існували хибні уявлення про механізм їх виникнення, зокрема теорії, що пов'язували їх з резонансом стовпа повітря (як в органій трубі) або вихровими доріжками Кармана. Сучасна біофізика відкидає ці гіпотези на користь теорії аеропружного флаттера стінок дихальних шляхів.

Механізм генерації свистячих хрипів найкраще описується моделлю спадання еластичної трубки, відомою як резистор Старлінга. Ця модель розглядає потік рідини або газу через еластичний канал, на який діє зовнішній тиск.

Ключовим елементом є "закон трубки", який описує залежність площі поперечного перерізу (A) від трансмурального тиску ($P_{tm} = P_{in} - P_{out}$). У дихальних шляхах внутрішній тиск (P_{in}) падає по довжині бронха через опір потоку, тоді як зовнішній тиск (P_{out} , плевральний тиск) під час форсованого видиху стає позитивним і високим.

Коли трансмуральний тиск стає негативним (зовнішній тиск перевищує внутрішній), еластична стінка бронха втрачає стійкість і колапсує. Однак повного перекриття не відбувається через динаміку потоку:

1. Прискорення Бернуллі: У місці звуження (стенозу) швидкість потоку зростає. Згідно з законом Бернуллі, це призводить до подальшого падіння внутрішнього тиску, що посилює стиснення стінки[4].
2. Зворотний зв'язок: Зменшення просвіту обмежує потік, що призводить до зростання тиску перед звуженням і відновлення просвіту. Цей цикл "спадання-відкриття" створює автоколивання.

Дослідження Гротберга та Гавріелі встановили, що свистячі хрипи виникають внаслідок взаємодії між інерційними силами потоку та пружними силами відновлення стінки бронха, подібно до тріпотіння прапора на вітрі [5].

Важливим доказом на користь теорії флаттера стінок, а не резонансу газу, є експерименти з гелієво-кисневими сумішами. Заміна повітря на гелій змінює густину газу, що мало б змінити частоту звуку, якби джерелом був резонанс повітряного стовпа. Однак частота свистячих хрипів залишається практично незмінною, що свідчить про те, що частота визначається механічними властивостями стінки бронха (масою, жорсткістю на вигин), а не властивостями газу [6].

Дзижчачі хрипи (rhonchi) — це низькочастотні (<200 Гц), тривалі звуки, що часто описуються як "хрюпіння" або "бурчання". Вони зазвичай чутні як на вдиху, так і на видиху, і часто змінюються або зникають після кашлю.

На відміну від свистячих хрипів, які пов'язані з вібрацією "сухих" стінок в умовах обмеження потоку, дзижчачі хрипи нерозривно пов'язані з наявністю вільного секрету (слиз, ексудат) у просвіті великих та середніх бронхів. Біофізичний механізм включає:

1. Формування рідинних містків: В'язкий секрет під дією поверхневого натягу утворює перетинки або меніски, що перекривають просвіт дихального шляху.
2. Розрив плівок: Потік повітря створює тиск на ці плівки. Коли тиск перевищує сили поверхневого натягу, плівка розривається, вивільняючи акустичну енергію. Цей процес є циклічним: плівка формується, розтягується, розривається і знову формується.
3. В'язко-пружні коливання: Низька частота rhonchi (<200 Гц) пояснюється більшою ефективною масою коливальної системи. У даному випадку коливуються не тонкі стінки бронхіол, а масивні скупчення слизу разом із розслабленими стінками більших бронхів.

Аналіз часових форм хвилі демонструє фундаментальну різницю: Свистячі хрипи мають синусоїдальну форму хвилі, що свідчить про гармонічні коливання стінки. Дрижчачі нерегулярну, часто переривчасту форму з крутими фронтами, що відповідає хаотичним процесам розриву рідини та турбулентності навколо перешкод.

Вологі хрипи — це короткі, переривчасті звукові події тривалістю менше 20 мс. Історично їх пояснювали проходженням повітря через рідину ("булькання"), однак сучасні біофізичні дослідження довели, що цей механізм є валідним лише для частини великопухирчастих хрипів, тоді як дрібнопухирчасті хрипи мають зовсім іншу природу.

Для дрібнопухирчастих хрипів, характерних для інтерстиціального фіброзу легень (ІФЛ) та пневмонії, загальноприйнятою є теорія раптового відкриття дихальних шляхів, розроблена Фредбергом і Холфордом. Механізм включає наступні етапи:

1. Колапс на видиху: У базальних відділах легень, де транспульмональний тиск найменший, дрібні дихальні шляхи можуть спадатися (ателектаз) наприкінці видиху. При фіброзі підвищена жорсткість паренхіми та зміни сурфактанту сприяють цьому процесу
2. Наростання градієнта тиску: Під час вдиху плевральний тиск стає більш негативним. Однак, закритий сегмент бронха утримується силами поверхневого натягу та адгезії стінок. Виникає значний перепад тиску між проксимальною (відкритою) та дистальною (закритою) частинами.
3. Вибухове відкриття: Коли різниця тисків досягає критичного значення, дихальний шлях миттєво розкривається. Це відбувається не плавно, а стрибкоподібно за час менше мілісекунди.
4. Акустична емісія: Раптова зміна геометрії викликає миттєвий перерозподіл механічних напружень у навколишній легеневої тканині. Ця подія моделюється як акустичний квадруполь — система джерел, що генерує звукову хвилю внаслідок релаксації напруги. Енергія цього процесу значно вища, ніж при закритті, тому інспіраторні хрипи є домінуючими.

Стридор — це інтенсивний, переважно інспіраторний звук високої тональності, джерело якого знаходиться в екстраторакальних дихальних шляхах (гортань, трахея). Його виникнення повністю підпорядковується законам течії рідини через трубки змінного перерізу.

Висновок

Отже, у роботі було досліджено фундаментальні фізіологічні та біомеханічні принципи, що визначають виникнення легеневих шумів. Проаналізовано залежність наявності шумів від різноманітних патологій, узагальнено різновиди дихальних шумів. Встановлено біомеханіку відмінностей здорових легень від тих, які мають патологію. Класифіковано шуми згідно з CORSA.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Pasterkamp H. Respiratory sounds. Advances beyond the stethoscope [Електронний ресурс] / H. Pasterkamp, S. S. Kraman, G. R. Wodicka // American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine. – 1997. – Vol. 156, № 3. – P. 974–987. – Режим доступу: <https://www.atsjournals.org/doi/10.1164/ajrccm.156.3.9701115>.
2. Sarkar M. Auscultation of the respiratory system [Електронний ресурс] / M. Sarkar, I. Madabhavi, N. Niranjana, M. Dogra // Annals of Thoracic Medicine. – 2015. – Vol. 10, № 3. – P. 158–168. – Режим доступу: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC4518345/>
3. Kim Y. Respiratory sound classification for crackles, wheezes, and rhonchi in the clinical field using deep learning [Електронний ресурс] / Y. Kim, Y. Hyon, S. S. Jung [et al.] // Scientific Reports. – 2021. – Vol. 11, № 1. – P. 17186. – Режим доступу: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8387488/>
4. Bernoulli's Principle (K-4) [Електронний ресурс] / National Aeronautics and Space Administration (NASA). – Режим доступу: <https://www.nasa.gov/wp-content/uploads/2023/06/bernoullis-principle-k-4-02-09-17-508.pdf>
5. Grotberg J. B. Flutter in collapsible tubes: a theoretical model of wheezes [Електронний ресурс] / J. B. Grotberg, N. Gavriely // Journal of Applied Physiology. – 1989. – Vol. 66, № 5. – P. 2262–2273. – Режим доступу: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/2745289/>
6. Gregory A. L. An experimental investigation to model wheezing in lungs [Електронний ресурс] / A. L. Gregory, A. Agarwal, J. Lasenby // Royal Society Open Science. – 2021. – Vol. 8, № 4. – P. 201951. – Режим доступу: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8074657/>

Кучер Микита Олександрович – аспірант G22-25a, кафедра біомедичної інженерії та оптико-електронних систем, Вінницький Національний Технічний Університет, м.Вінниця, e-mail: mykyta.kug@gmail.com

Науковий керівник: Карась Олександр Володимирович – доктор філософії, старший викладач кафедри Біомедичної інженерії та оптико-електронних систем, Вінницький національний технічний університет, м.Вінниця, e-mail: karas@vntu.edu.ua

Kucher Mykyta Olexandrovich – postgraduate student G22-25a, Department of Biomedical Engineering and Optoelectronic Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: mykyta.kug@gmail.com

Supervisor: Karas Olexandr Volodymyrovych – PhD, Senior Lecturer, Department of Biomedical Engineering and Optoelectronic Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: karas@vntu.edu.ua