

УДК 534.7:616-071.6-71

НЕЗАВЕРШЕНА ІСТОРІЯ СТЕТОСКОПА

В. Т. Грінченко, В. Н. Олійник[†]

Інститут гідромеханіки НАН України
вул. Марії Капніст, 8/4, 03057, Київ, Україна

[†]E-mail: v_oliynik@yahoo.com

Отримано 24.03.2023 ◊ 12.03.2024

Медична аускультация – вислуховування лікарем звуків серця, органів дихання, шлунково-кишкового тракту та ін. – вважається однією з базових методик первинного діагностування різного роду захворювань і патологій людського організму. У статті детально висвітлено історію винайдення та двохсотрічної еволюції стетоскопа як інструмента для здійснення опосередкованої аускультатії. Прослідковано трансформацію стетоскопа від слухової трубки Лаеннека до добре впізнаваного сучасного дизайну. Особливу увагу приділено запровадженню в практику реєстрації звуків життєдіяльності спершу електроакустичних, а згодом і електронних технологій. Всупереч усталеним явленням, такі спроби було започатковано ще на межі XIX і XX століть. Ідея реалізації повного циклу реєстрації, запису й аналізу об'єктивних акустичних характеристик звуків аускультатії втілювалась кілька разів на різних щаблях розвитку тогочасної техніки. Це спростовує поширений міф про те, що методологія електронної аускультатії – фактична ровесниця епохи персональних комп'ютерів. Зокрема, електронні стетоскопи, які виокремилися в самостійну гілку портативних інструментів для аускультатії, безперервно еволюціонували, починаючи принаймні з 1920-их рр. Побіжно проаналізовано конструктивні й експлуатаційні особливості деяких популярних моделей сучасних електронних стетоскопів. Електронні стетоскопи мають великий потенціал як елемент телемедицини та для оперативного самоконтролю пацієнта. Нині ключова умова для їх успішного впровадження в дослідницьку та клінічну практику – зручне спряження з пристроями цифрового зв'язку класу смартфонів. При цьому мають підтримуватись функції локального документування, організації, первинного алгоритмічного аналізу та візуалізації даних аускультатії разом з опцією інтеграції в глобальну мережу Інтернет. У перспективі необхідно забезпечити гнучкий доступ користувача до розподілених мережових баз медичних даних і діагностичних серверів з використанням можливостей штучного інтелекту.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: стетоскоп, аускультация, звуки життєдіяльності, електронна реєстрація, цифрова обробка сигналу, телемедицина, смартфон

1. ВСТУП

Сьогодення світової медицини асоціюється з постійно оновлюваною палітрою фармацевтичних препаратів, модерним обладнанням і апаратурою, інноваційними діагностичними та лікувальними методиками. На цьому тлі несподіваним аутсайдером виглядає аускультация, в основу якої покладено вислуховування звуків життєдіяльності організму людини. Цей факт є тим дивнішим, що свого часу запровадження опосередкованої аускультации знаменувало справжній прорив у діагностиці пульмонологічних і серцево-судинних захворювань, а винайдений для неї інструмент – стетоскоп – став однією з візитівок професії медика.

Не можна сказати, що протягом останніх двохсот років стетоскоп і аускультация застигли у своєму розвитку. Однак, як неодноразово зазначалось у фахових дискусіях, основною їхньою вадою й досі залишається суб'єктивізм розпізнавання діагностично значущих ознак, продиктований монопольною роллю особистості лікаря в цьому процесі [1]. Тому останнім часом багато зусиль докладається для перетворення інструментальної аускультации на об'єктивну методику, яка базується на коректній статистичній інтерпретації результатів обробки акустичних характеристик звуків життєдіяльності, зареєстрованих і задокументованих в електронно-цифровій формі. Зокрема, акустоелектронне перетворення сигналу відкриває можливість телемедичного обміну даними аускультации задля віддаленого моніторингу стану здоров'я пацієнтів.

Здавалось би, такий підхід закладає підвалини для якісного стрибка в диференціальному діагностуванні бронхо-легеневих захворювань. Утім великі надії, які покладалися на електронну аускультацию сорок-п'ятдесят років тому, все частіше змінюються розчаруванням і певним охолодженням інтересу цієї до теми. У нашій статті ми намагатимемось з'ясувати, чому ж так сталося. Читачеві, якого цікавить ширший контекст проблеми подолання соціальних і психологічних перешкод, які виникають на шляху впровадження нових організаційно-технологічних рішень у медицину, можна порекомендувати блискучу монографію [2], написану одним із безпосередніх учасників процесу становлення телемедицини в США. Є в ній і розділ, присвячений історії спроб поєднати аускультацию з можливостями електроакустики й телефонії. Після знайомства з цим захопливим матеріалом доходимо доволі несподіваного висновку: здавалось би, ультрасучасні, абсолютно новаторські ідеї модернізації методики інструментальної аускультации значною мірою повторюють досягнення сто- й навіть стоп'ятдесятилітньої давності, вже втілені на тогочасному рівні технічних можливостей.

Звісно, висвітлюючи обрану тему, не просто уникнути повторів: літописові розвитку опосередкованої аускультации присвячено вже не одну сотню публікацій [3–7]. З огляду на це, ми вважали за доречне подати еволюцію стетоскопа з точки зору поступового розширення його функціональних можливостей у ході трансформацій від слухової трубки Рене Лаеннека до сучасних смартфон-орієнтованих електронних пристроїв. Хочеться вірити, що такий аналіз допоможе точніше визначити, чого ж саме наразі ще не вистачає для того, щоби нарешті на повні груди задихала одна з базових методик медичної експрес-діагностики майбутнього – цифрова аускультация.

2. ДОБА МЕХАНІЧНИХ СТЕТОСКОПІВ

2.1. Тріумф слухової трубки

З давніх-давен для діагностування стану серця, легень, шлунково-кишкового тракту людство використовувало так звану безпосередню аускультацию. Завдяки своїй неінвазивності, оперативності, доступності й мобільності вона здобула визнання ще за часів давніх Греції, Індії та Єгипту [3, 8]. Від Гіппократа, аж до початку XIX сторіччя лікарі сприймали звуки життєдіяльності організму, приклавши вухо до тіла хворого [6]. Зрозуміло, що ця процедура не відзначалась особливою зручністю чи гігієнічністю. До того ж виникали проблеми з прослуховуванням пацієнтів із надмірною вагою [5]. Згодом до вказаних складнощів додалися соціальні: з огляду на обмеження, накладені тогочасними моральними нормами, жінки-пацієнтки часто відмовлялись від обстежень.

Поворотним пунктом у розвитку аускультатії став вересень 1816 року, коли Рене Теофіль Гіаццинт Лаеннек [4, 7] винайшов спеціальний інструмент для неї, поійменований стетоскопом (Рис. 1). Відомо, що прообразом стетоскопа став згорнутий у трубку зошит, використаний для передачі звуків роботи серця від поверхні грудної клітки молодої жінки до вуха діагноста [10]. За деякими відомостями, окрім природної сором'язливості, вона страждала від ожиріння. Сам Лаеннек був вражений тим, як покращилась чутність сприйнятого сигналу [5, 6, 11]. Слухова трубка – саме так спочатку називали стетоскоп – спрацювала як акустичний хвилевід, каналізуючи проходження звуку від джерела до приймача.

Протягом 1818 року доповіді про можливості нового інструмента первинної діагностики були представлені перед Академією наук і Медичною академією в Парижі [3, 5], а 1819 рік ознаменувався опублікуванням знаменитого трактату Лаеннека «Про опосередковану аускультацию або розпізнавання хвороб легень і серця» [9]. У ньому було систематично викладено загальні принципи нового способу вислуховування та вперше класифіковано основні аускультативні феномени. Трактат майже одразу був перекладений кількома європейськими мовами та став медичним бестселером, витримавши десятки перевидань. Цікаво, що, попри численні схвальні відгуки, внаслідок невеликого маркетингу найперший наклад цієї книжки розходився вкрай погано [3].

Консерватори від медицини намагались звинуватити Лаеннека в шарлатанстві [3], проте інструментальна аускультация дуже швидко набула популярності та стала одною з найпоширеніших методик первинної медичної діагностики. Головним аргументом, який схилив шальки терезів на користь нового інструмента стало те, що саме використовуючи стетоскоп, лікар-діагност уперше отримав можливість відрізнити туберкульоз від пневмонії, орієнтуючись на особливості звуків голосу й дихання пацієнта [12]. До цього

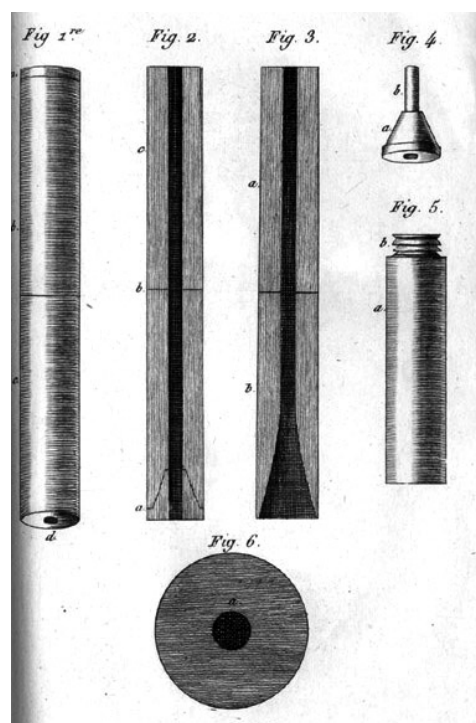


Рис. 1. Креслення слухової трубки Рене Лаеннека [9]

така диференціація була можлива лише в ході анатомічного розтину тіла померлого.

Лаеннек доклав багато зусиль для того, щоб віднайти оптимальні конструкцію та матеріал для стетоскопа, що зробило б його використання комфортним і для лікаря, і для пацієнтів. Зокрема, він усвідомив необхідність лійкоподібного розтруба з боку, який контактує з тілом людини. Це було зроблено для того, щоб підвищити частку сприйнятої звукової енергії, збільшивши площу поверхні, що випромінює у стетоскоп. Що ж до матеріалу, то зрештою винахідник зупинився на м'яких породах дерева. Надалі пропонувались численні варіації форми слухових трубок, згадки про які можна знайти в роботах [3, 5, 6, 11]. Також продовжувались експерименти з різними матеріалами. Наприклад, знаменитий український пульмонолог і фтизіатр Феофіл Гаврилович Яновський користувався стетоскопічною трубкою, виготовленою з товстого скла [7].

2.2. Еволюційні метаморфози



Рис. 2. Бінауральний стетоскоп Кеммена (XIX століття)

1829 року Чарльз Вільямс (Charles James Blaisius Williams) винайшов перший бінауральний стетоскоп, у якому від воронкоподібної голівки відходили олов'яні звуководи [3, 5]. Така конструктивна схема дозволила суттєво підняти ефективність виявлення й розрізнення патологічних звуків при вислуховуванні обома вухами, а надалі стала загальноприйнятою. Протягом 1840–1850-их років звуковідні трубки стали виготовляти з гнучких матеріалів, що зробило використання стетоскопів іще більш зручним, а у першій половині 1850-их Кеммен (George Philip Camman) запропонував використовувати виточені зі слонової кістки оливи для адаптації виходів звуководів безпосередньо до вушних проходів [3, 5], див. Рис. 2. З деякими маловідомими подробицями раннього етапу еволюції бінауральних стетоскопів можна ознайомитись у статті [13].

Цікаво, що у Великій Британії бінауральні моделі стетоскопа не використовувались аж до 1880-их років [3]. Нині монауральні стетоскопи, схожі на перші лаеннекові слухові трубки, здебільшого застосовують при абдомінальній аускультатії для контролю розвитку плоду при вагітності.

1894 року інженер з Брукліну Роберт Бовлз (R. C. M. Bowles) зробив одне з найсуттєвіших удосконалень стетоскопа, натягнувши на апертуру його голівки еластичну мембрану – діафрагму [3]. Унаслідок резонансних властивостей мембран такий інструмент дозволяв підсилити звучання на частотах понад 200 Гц – в діапазоні, характерному для респіраторних шумів [14]. У зв'язку з цим за стетоскопом з мембраною закріпилися спеціальна назва – «резонуючий стетоскоп» або «фонендоскоп» [3]. Саме з цього часу по-

чалось розділення на кардіологічні моделі стетоскопів з відкритою апертурою голівки й пульмонологічні – з діафрагмою. Нині у фонендоскопах використовуються діафрагми з гуми, пластику або металу. 1926 р. доктор медицини Говард Спрег (Н. В. Sprague) разом з інженером-електриком Рапарттом (М. В. Rappaport) запатентували відому універсальну конструкцію стетофонендоскопа з двобічною голівкою. З одного боку вона мала відкриту апертуру («дзвін», англ. – «bell»), а з протилежного – діафрагму [3, 15, 16].

Слід зазначити, що, на відміну від усталеної вітчизняної традиції, в сучасній закордонній медичній термінології терміни «фонендоскоп» і «стетофонендоскоп» зустрічаються вкрай рідко. Надалі ми будемо називати всі інструменти для аускультатії стетоскопами, попри їхні конструктивні особливості. Цікаво, що зареєстрований при аускультатії звук завжди виникає внаслідок спричинених коливаннями поверхні тіла об'ємних деформацій повітря, яке міститься всередині звукоприймальної голівки. Тому можна вважати, що сама поверхня шкіри завжди відіграє роль своєрідної діафрагми [17].

У різний час пропонувались до розгляду доволі екзотичні конфігурації стетоскопів – так званий диференціальний (для одночасного прослуховування звуків у двох точках), який фактично являв собою два з'єднані монауральні інструменти; варіанти з кількома гарнітурами-оголів'ями, які можна було застосовувати для навчання студентів чи під час консилиумів тощо [18]. Утім такі конструктивні схеми не набули значного поширення. Вочевидь, найкурйознішим у цьому ряду став «універсальний пристрій» Ейдона Сміта (Е. Т. Aydon Smith), який міг використовуватись як монауральний, бінауральний, диференціальний стетоскоп або отоскоп. На додачу його трубка здатна була служити кровоспинним турнікетом, шлунковим зондом, катетером або душовим шлангом, а голівка – перкусійним молотком та лійкою [3, 5]!

Останнім суттєвим удосконаленням конструкції стетоскопа стала запропонована 1961 року Девідом Літтманном (David Littmann) Y-подібна гумова звуковідна трубка [17], яка виявилась більш зручною, ніж два повністю розділені звуководи чи гнучкі звуководи, з'єднані за допомогою металевого перехідника. З того часу переважна більшість стетоскопів набула стандартного вигляду, який став одним із загальноприйнятих візуальних символів професії лікаря (Рис. 3).



Рис. 3. Педіатричний стетоскоп Littmann Classic II Infant

2.3. У пошуках ідеального частотного відгуку

Як уже зазначалося, в основу роботи стетоскопа покладено ефект каналізованої передачі звуку через хвилевід. Завдяки своїм резонансним властивостям, безпосередньо пов'язаним з геометричними параметрами, така система спотворюватиме частотне наповнення вихідного сигналу, що неодмінно вплине на його чутність і розбірливість. Саме ці міркування стали одним з основних аргументів недоброзичливців Лаеннека, які стверджували, що внесені ним акустичні артефакти практично унеможливають якісне вислуховування звуків з поверхні тіла пацієнта. Дійсно, в діагностично значущому

діапазоні від 20 Гц до 2 кГц формується нерівномірна амплітудно-частотна передаткова функція слухової трубки з характерними провалами, обумовленими резонансами повітряного стовпа в ній [19].

Слід очікувати, що зазначений функціональний недолік буде притаманним і сучасним бінауральним стетоскопам. Дійсно, усі їхні конструктивні елементи характеризуються вибірковістю пропускання в різних частотних смугах, тобто працюють як акустичні фільтри. Так, звукоприймальні голівки стетоскопів фактично є закритими акустичними камерами й мають яскраво виражені резонансні властивості, залежно від розмірів і конфігурації. Окрім варіативності, їхні амплітудно-частотні характеристики відзначаються суттєвою нерегулярністю з «ножицями» між мінімальними й максимальними значеннями понад 40 дБ [20].

Ще складнішу, порізану форму має передаткова функція стетоскопа в цілому, від контакту з поверхнею тіла до вушних олив [14, 20–22]. Численні експериментальні дослідження показали, що інструменти від різних виробників мають істотно відмінні акустичні характеристики, які залежать і від геометрії складових стетоскопа, і від фізичних властивостей матеріалів, з яких вони виготовлені [20, 23, 24]. Це не лише призводить до спотвореного сприйняття сигналу, але й суттєво утруднює можливість порівняння результатів прослуховування за допомогою різних стетоскопів. Тому зазвичай лікарі ще замолоду раз і назавжди звикають користуватись інструментом одної, улюбленої, моделі [25, 26].

Загалом частотні характеристики стетоскопів демонструють тенденцію до зменшення ефективності передачі звуку зі зростанням частоти [14, 20, 25]. Вона може проявлятися, починаючи з 200, 500 або, навіть, з 1000 Гц. У дослідженні [27] на основі аналізу особливостей слуху людини при аускультації [8] зроблено висновок про неможливість якісного розрізнення високочастотні складових сигналу вже порядку 1000 Гц – вони маскуються низькочастотним оточенням. На додаток виявлено, що стетоскопи з діафрагмою (фонендоскопи) приблизно на 12 дБ гірше проводять низькочастотні компоненти в смузі між 37.5 Гц та 112.5 Гц у порівнянні зі стетоскопами без діафрагми [20, 23]. Але й традиційні стетоскопи кардіологічного призначення виявились не позбавленими суттєвих недоліків. Так, одна з ключових проблем полягає в їхній неспроможності забезпечити достатній рівень відгуку для якісного вислуховування звуків серця, особливо, патологічних третього й четвертого тонів [28]. Також при традиційній аускультації погано розпізнаються серцеві клапанні шуми. Особливо гостро ця проблема постає під час навчання студентів-медиків [29].

У публікації [17] Літманн сформулював загальні вимоги до «ідеального» (оптимального з функціональної точки зору) механічного стетоскопа. Зауважимо, що нині стетоскопи засновані ним фірми Littmann за своєю зручністю й ефективністю вислуховування дійсно вважаються одними з еталонних інструментів для аускультації. Однак цієї переваги було досягнуто не завдяки принциповому розв'язанню фундаментальної проблеми, а коштом ряду інженерно-конструкторських компромісів на основі багаторічного емпіричного досвіду.

Іноді раціональне використання фільтраційних властивостей акусто-механічних систем відіграло позитивну роль, сприяючи прогресу у вивченні особливостей звуків життєдіяльності людського організму. У цьому контексті варто згадати про модель стетоскопа, поєднаного з так званим рефрактоскопом. Головними компонентами останньо-

го стали циліндрична трубка змінної довжини, яку можна налаштовувати в резонанс зі звуками різної висоти, й система акустичних лінз для фокусування звукового поля [10]. Виходячи з ефективності досліджень, виконаних за допомогою рефрактоскопа, було запропоновано концепцію парціального стетоскопа, голівка якого містить кілька порожнин різного об'єму – підібраних спеціальним чином резонаторів Гельмгольца [10]. За допомогою таких пристроїв уперше було локалізовано специфічні зони акустичної тіні на поверхні грудної клітки, в яких не прослуховуються кардіологічні чи респіраторні звуки. Окрім того, так було підтверджено існування третього серцевого тону й зафіксовано його часову варіацію. Принагідно зазначимо, що моделі стетоскопів з двома різнокаліберними апертурами голівок типу «дзвін», які підсилюють звуки в різних частотних смугах, випускаються й дотепер.

Ще одним таким прикладом може служити так званий кардіологічний «мета-стетоскоп» [30]. Цей пристрій виконано у вигляді жорсткостінної слухової трубки, розділеної на кілька послідовних камер поперечними перегородками з невеликими асиметрично розташованими отворами. Така структура, названа авторами лабіринтоподібною, дозволила суттєво збільшити акустичну приєднану масу повітряного стовпа всередині трубки й змістити перший максимум передаткової функції пристрою в низькочастотний діапазон між 100 Гц і 200 Гц.

Детальний аналіз фізичних причин формування амплітудно-частотних характеристик традиційних стетоскопів далеко виходить за межі цієї статті. Зацікавленому читачеві можна рекомендувати дослідження [26, 31], в яких було зроблено спроби розвинути строгий аналітичний метод для оцінювання акустичних властивостей стетоскопів з урахуванням конкретних особливостей проходження акустичних хвиль від звукоприймальної голівки до вушних олив. Важливою перевагою теоретичної моделі [31] став розгляд поверхні тіла пацієнта як повноцінної складової каналу проходження звуку. Зауважимо, що аналогічний підхід до моделювання проблеми реєстрації звуків життєдіяльності сповідувався в роботах [32, 33].

3. АКУСТОЕЛЕКТРОНІКА НА СЛУЖБІ МЕДИЦИНИ

3.1. Довгий світанок нової ери

Словосполучення «електронна аускультация» незрідка помилково сприймається як синонім сучасності, однак це далеко не так. Розвиток електроакустики та акустоелектроніки ще наприкінці XIX століття стимулював спроби побороти притаманні механічним стетоскопам генетичні вади. Насамперед вигоди від перетворення сигналу в електричну форму ввижалась у можливості його підсилення. Неабиякою перевагою новонароджених електронних засобів аускультатії стала й зручність формування бажаної амплітудно-частотної характеристики коштом використання електронних фільтрів.

Піонерські досліді щодо вислуховування звуків життєдіяльності з використанням телефонних мікрофона й підсилювача було здійснено всього через два роки після того, як Олександр Белл запатентував перший телефонний апарат. Ідея полягала в забезпеченні віддаленого діагностування стану пацієнта без виклику лікаря до нього додому [2]. Таким чином, прообраз «електричного стетоскопа» відразу ж продемонстрував свій потенціал для застосування в телемедицині. За повідомленням авторитетного журналу «The Lancet», 1878 року у Великій Британії відбувся перший запис звуків дихання

за допомогою комбінації телефону й фонографа [2]. Близько 1881 року аналогічний дослід було проведено у Франції [18]. Зрозуміло, що тогочасне обладнання відзначалося громіздкістю, а якість запису була не дуже високою. Проте для нас важливо, що тут було вперше реалізовано процедуру фіксації первинних аускультативних даних у формі, придатній для тривалого зберігання й повторного відтворення.

За деякими повідомленнями, перший телефонний фонокардіограф було сконструйовано ще 1893 року [18], а в США систематичне прослуховування звуків серця за допомогою телефонних апаратів проводились принаймні з 1911 року [34]. У публікації [35] описано проведене 1921 року дослідження, в ході якого звуки дихання й серця знімалися за допомогою вкритого гумою телефонного капсуля, приєднаного через аудіопідсилювач до телеграфона (telegraphone) – тогочасного прообразу магнітофона, в якому звук записувався не на плівку, а на сталевий дріт. Зареєстровані фонограми ретранслювались через гучномовець. Протягом 1920–1940-их років набула поширення практика використання так званих паралельних електроакустичних стетоскопів з можливістю одночасного вислуховування пацієнта кількома особами й відтворення звуків за допомогою динаміків [34, 36]. Такі системи призначалися для навчання студентів-медиків і публічної демонстрації матеріалів медичного характеру.

Важливим кроком у розвитку електронних засобів аускультатії став майже одночасний винахід двох спеціалізованих електроакустичних стетоскопів, які отримали назви «стетофон» (США) [21] і «магноскоп» (Японія) [37, 38]. Поза сумнівом, їх поява значною мірою сприяла відпрацюванню методик реєстрації звукових сигналів з поверхні тіла та переведення в зручну для запису й аналізу електричну форму. В обох інструментах використовувались електромагнітні акустoeлектричні перетворювачі, а також електронно-лампові підсилювачі сигналу. «Стетофон» допускав підключення кількох високоомних виходів і виведення осцилограми сигналу на стрічку самописця [21]. Для «магноскопа» було передбачено візуалізацію часової розгортки сигналу за допомогою осцилографа [38]. Перші модифікації «магноскопа» були стаціонарними й вимагали для себе окремого приміщення. Згодом пристрій було суттєво вдосконалено, а вже 1930 року сконструйовано його портативну версію [39]. Це дозволило провести багаторічний цикл клінічних досліджень, за результатами яких було встановлено ряд важливих фактів щодо кількісних характеристик нормальних і патологічних звуків дихання й серця людини [39–44]. При аналізі й інтерпретації результатів широко використовувались оцінки рівня звуку (в дБ).

Починаючи з 1940-их років, електронні стетоскопи все частіше почали обладнувати сенсорами, виготовленими на основі п'єзокристала чи п'єзокераміки [8, 45]. Такі приймальні елементи відзначаються високою стабільністю й регулярними амплітудно-частотними характеристиками без піків і провалів у широкому діапазоні. Завдяки своїм невеликим масі та розмірам, п'єзоприймачі можуть використовуватись навіть у таких нестандартних інструментах як внутрішньосерцеві стетоскопи-зонди [46].

Після Другої світової війни неодноразово пропонувались конструкції електронних стетоскопів з роздільним регулюванням вхідного рівня сигналу та робочої частотної смути [47, 48]. Нині такі налаштування стали стандартними й доступні в переважній більшості електронних засобів аускультатії. Як зазначали розробники, «клінічне застосування цих інструментів не має меж, до того ж вони ідеальні для навчання» [47]. На додачу наголошувалось на таких перевагах як висока шумозахищеність і можливість

з'єднання стетоскопа з портативним електрокардіографом. Цікаво, що одним з аргументів, які наводились на користь новинки, була її невисока ціна, у порівнянні з якісними механічними стетоскопами. Ця деталь є особливо знаменною, враховуючи те, що більшість сучасних електронних стетоскопів коштує дорожче, ніж традиційні аналоги.

Швидкий прогрес електронної аускультатії на початку ХХ століття породив очікування близького перевороту в серцево-судинній та легеневій діагностиці. Однак, попри наполегливі спроби клінічного впровадження модернізованої методики, протягом багатьох десятиліть область її застосування обмежувалось переважно стінами дослідницьких лабораторій. Очевидно, що причина цього статус кво полягала не в технологічній недосконалості інструментарію, а радше в неспівмірності потенційних вигод від інновації з незручностями, спричиненими необхідністю перевчати медичний персонал на нові рейки [49, 50]. Наприклад, при збереженні усталеного протоколу вислуховування використання електронного стетоскопа не призводить до підвищення селективності діагностичних ознак в кардіології [51]. Схожа тенденція спостерігається при аускультатії респіраторного тракту. Дійсно, традиційно при обстеженні лікар документує не об'єктивні акустичні параметри звуків життєдіяльності, а лише результати їх суб'єктивного сприйняття й інтерпретації. Останні ж істотно залежать не лише від інструмента, але й від кваліфікації, досвіду та функціонального стану слухового апарату діагноста [27, 32, 52].

3.2. Від романтики до прагматики

Хай там як, практично через сто років після свого дебюту електронні стетоскопи поволі почали займати свою нішу в клінічній практиці. Протягом 1970-их років серійно вироблялись електронні стетоскопи Pentax ST-1A [3, 18] і Medetron-F [53] – уже на напівпровідниковій базі. Судячи з усього, вони стали першими комерційними моделями діагностичних інструментів такого типу. На жаль, докладна інформація про їхні технічні характеристики та про параметри тогочасних моделей-конкурентів наразі недоступна. Відомо лише, що в другій половині 1980-их років аналогічні технічні рішення відпрацьовувались для лабораторних експериментів [54].

Упевнений вихід електронних стетоскопів на ринок медичних товарів відбувся вже наприкінці 1990-их років. Цьому сприяло широке впровадження в техніку інтегральних мікросхем, використання яких значно поліпшили масогабаритні показники та стабільність параметрів промислових зразків. Серед найпопулярніших можна назвати моделі 3M Littmann 3200, HEACO JABES, Thinklabs ONE, Welch-Allyn Elite Analyzer, Cardionics тощо [55–57]. Перші дві з них доступні українським споживачам.

Для того, щоб підкреслити здатність електронних стетоскопів до підсилення сигналу, в англomовній термінології їх часто так і називають – підсиленими (amplified). Виробники деяких моделей декларують наявність у них спеціальних конструктивних рішень для захисту від проникнення сторонніх шумів. Дійсно, чутливість і шумозахищеність електронних стетоскопів суттєво перевищують відповідні параметри механічних аналогів [58]. Показовими є результати досліджень, в яких доведено переваги електронних стетоскопів над традиційними в умовах ускладненої шумової обстановки при перебуванні пацієнтів у літаку [59, 60], підводному човні [61], переповненій лікарняній палаті [62].

Наразі вже склався консенсус відносно робочих діапазонів частот, необхідних для

комфортного вислуховування специфічних акустичних явищ, породжених диханням, роботою серця та інших внутрішніх органів. Наприклад, серцеві тони лежать у межах від 20 Гц до 200 Гц [63], а верхні частоти клапанних шумів серця можуть перевищувати 600 Гц [28]. Енергію ж респіраторних сигналів зосереджено переважно між 200 Гц і 600 Гц, хоча для деяких патологічних звуків цей діапазон може розширюватись – від 20 Гц до 1500 Гц і вище [1, 64, 65].

Ще до середини 1990-их років точилися дискусії про те, який електроакустичний перетворювач буде оптимальним для якісної реєстрації звуків дихання та серця [66]. Інженерна практика показала, що при сучасному рівні розвитку звукотехніки цей вибір не є критичним. Нині багато електронних стетоскопів мають п'єзоелектричні чутливі елементи, хоча в деяких моделях реалізовано конструкцію з електромагнітною діафрагмою чи конденсаторним мікрофоном у повітряній камері [56]. Їхні амплітудно-частотні характеристики здебільшого мають плавний хід у всьому робочому діапазоні, проте вони не обов'язково ідеально плоскі [50, 67]. Пропонуються також численні промислові й аматорські модифікації на базі механічних стетоскопів з адаптованим вставним мікрофонним модулем [68, 69], але їхні частотні відгуки відзначаються помітно вищою нерівномірністю.

На відміну від вузькоспеціалізованих традиційних стетоскопів, стетоскопи електронні здебільшого є універсальними пристроями, в яких вибір типу вислуховування забезпечується перемиканням вбудованих електронних фільтрів. При цьому для різних моделей кількість робочих режимів і типи передавальних функцій можуть суттєво відрізнятися. Наприклад, вітчизняний електронний стетоскоп ЕФОН-08 розробки Інституту гідромеханіки НАН України дозволяє вибрати лише два діапазони – серцевий (від 20 Гц до 400 Гц) і легеневий (від 100 Гц до 2000 Гц) [50]. Аналогічним чином влаштовані фільтри стетоскопа фірми Welch-Allyn, у якого серцевий режим покриває смугу від 20 Гц до 420 Гц, а пульмонологічний – від 315 Гц до 1900 Гц [56]. Іншу крайність демонструє модель Stethographics – восьмидіапазонне налаштування [55]. Для забезпечення високої селективності при вислуховуванні різних типів звуків життєдіяльності інструмент Thinklabs ONE у діапазоні від 20 Гц до 2000 Гц має п'ять робочих смуг із рівномірними частотними відгуками.

Однак більшість електронних стетоскопів розраховано на роботу в трьох піддіапазонах – кардіологічному, пульмонологічному й розширеному (абдомінальному). Зокрема, компанія-виробник моделі HEACO JABES декларує його працездатність у кардіологічному діапазоні – від 20 Гц до 200 Гц, пульмонологічному – від 200 Гц до 500 Гц й розширеному – від 50 Гц до 1000 Гц. Проведені стендові тести в цілому підтвердили ці параметри, хоча оцінка верхньої частоти для вислуховування в кардіологічному режимі виявилась ближчою до 100 Гц [50]. Це ставить під сумнів ефективність застосування даного пристрою для діагностування стану серця. Приблизно такі ж межі робочих діапазонів має електронний стетоскоп 3M Littmann 3200, але реальна верхня межа кардіологічного режиму для нього наближається до 300 Гц. Профілі його передавальних функцій у всіх трьох режимах, всупереч очікуванням, виявились суттєво не плоскими, з провалами в околі 700 Гц [67].

3.3. Вибір конструктивної схеми: плюси та мінуси

Здавалось би, акустoeлектричне перетворення сигналу, при якому зникає жорстке підпорядкування форми й розмірів усіх частин стетоскопа вимогам формування ефективного каналу передачі звуку від поверхні тіла до вуха діагноста, дає розробникові досить багато ступенів вільності у виборі дизайну інструмента аускультатії. Тож не дивно, що «екстер'єри» електронних стетоскопів подеколи сильно відрізняються між собою. Утім, якими б не були привабливими технічні параметри новомодних пристроїв, вони мають шанс укорінитися в медичній практиці лише при ергономічності, масі та габаритних, співмірних з характеристиками традиційних стетоскопів. Тому вже на етапі проектування важливо обрати таку конструктивну схему, яка б забезпечила пересічному лікарю максимальну зручність користування при наближенні процедури вислуховування до звичної.

Деякі популярні моделі електронних стетоскопів розраховані на використання зовнішніх навушників або телефонних гарнітур. Це значно здешевлює та спрощує сам пристрій, а його частотну характеристику робить незалежною від фільтраційних властивостей звукопроводів оголів'я. На додачу, кожен користувач може підібрати собі більш комфортний для вислуховування тип навушників, які легко замінити в разі потреби. До цього розряду можна віднести, наприклад, стетоскопи серії ЕФОН, корпус яких дозволяє тримати інструмент одною рукою, а панель керування дозволяє перемикаєти режими гучності й частотних фільтрів. Модель Thinklabs ONE за рахунок мініатюризації й компактного розміщення електронної частини й елементів керування фактично вписано форм-фактор звукоприймальної голівки стетоскопа. Однак усі такі електронні стетоскопи мають спільний експлуатаційний недолік: між вислуховуваннями пацієнтів інструмент просто немає куди покласти. Ця, здавалось би, маленька незручність стає особливо дошкульною під час лікарняних обходів, коли лікар мусить оперативно переходити від палати до палати.

Зважаючи на це, компонування моделей 3M Littmann 3200, HEACO JABES, Welch Allyn Elite Stethoscope виконано за аналогією з сучасним бінауральним механічним стетоскопом. Їхня конструкція більш складна – з традиційним оголів'ям, куди звук транслюється через мініатюрний динамік, розміщений в Y-подібному з'єднанні. У такому стетоскопі відбувається подвійне перетворення сигналу, що має негативно впливати на якість звуку, сприйнятого вухом, а канал його проходження звуководами оголів'я хвибує тими ж вадами, що й у традиційному стетоскопі. Водночас такий інструмент зручно тримається на шиї, звільняючи руки діагноста у паузах між вислуховуваннями пацієнтів. Як правило, елементи індикації та керування розміщуються на приймальній голівці або в її околі.

Підбиваючи підсумки, слід визнати, що донині не існує моделі, яка б відповідала критеріям «ідеального» електронного стетоскопа, в якому оптимальним чином сполучались би високі технічні параметри, зручність використання та прийнятну для масового користувача ціну.

3.4. Цифровий вимір аускультатії

Досі розглядалися лише особливості функціонування електронних стетоскопів у автономному режимі. Однак головним їхнім козирем є можливість дротової чи бездрото-

вої передачі аудіоданих на зовнішній пристрій [55], який би забезпечував їх подальшу обробку. Прорив у цьому напрямку відбувся наприкінці 1990-их років, ознаменований справжнім бумом у царині методик цифрового запису й комп'ютерного аналізу звуку з візуальним поданням результатів обробки [66, 70]. З цього часу почався відлік ери вже не просто електронної, а цифрової аускультатії.

Заради справедливості відзначимо, що дослідження цього періоду стали розвитком ідей визначного науковця й клініциста Віктора МакКьюсіка (Victor A. McKusick). Він іще в середині 1950-их років аналоговими засобами здійснив спектрографічну обробку звуків дихання й серця, що дозволило укласти перший каталог акустичних портретів різних типів нормальних і патологічних шумів, породжених роботою цих органів [71, 72]. Впровадження цифрових технологій зробило цю процедуру доступною широкому колу користувачів, оснащених персональними комп'ютерами, які на зламі XX і XXI століть стали неодмінним атрибутом медичних закладів. Зауважимо, що, незважаючи на значний прогрес у галузі обробки сигналів аускультатії [73, 74], спектрограма й досі залишається одним із базових візуальних образів звуків життєдіяльності. Зокрема, нині вона активно використовується при створенні сучасних методологій машинного діагностування таких небезпечних патологій як туберкульоз і COVID-19 [75].

У результаті поєднання електронного стетоскопа з персональним комп'ютером своє друге дихання отримала фонокардіографія, сформувався новий напрямок медичного дослідження бронхо-легеневої системи – фонореспірографія [76]. Певний час у цих галузях панувала тенденція до створення стаціонарних багатоканальних діагностичних комплексів, підживлювана очікуваннями того, що синхронна реєстрація й кореляційний аналіз звуків дихання в кількох точках грудної клітки дозволить підняти точність локалізації ураженої ділянки респіраторного тракту [70, 77]. Однак із часом одноканальна цифрова аускультатія також почала набирати популярності. Нині електронні стетоскопи разом зі спеціалізованим програмним забезпеченням для запису, каталогізації, відтворення та обробки фонограм на персональному комп'ютері помітно потіснили на ринку медичних товарів механічні засоби аускультатії. Це особливо відчутно на найбільш динамічних ринках країн Північної Америки та Південно-Східної Азії. Наприклад, 2023 року в Канаді продажі електронних і цифрових інструментів для аускультатії становили близько 25% від усіх стетоскопів медичного призначення [78]. Деякі з цих інструменти навіть поєднують у собі можливості електронного стетоскопа та одноканального електрокардіографа – Welch-Allyn Elite Stethoscope, Eko Duo ECG тощо [56, 79]. Існують також моделі з додатковими функціями – автоматичним визначенням серцевого ритму чи показника сатурації SpO₂.

3.5. Стетоскопи з позначкою «смарт»

Результатом прогресу у сфері телекомунікаційних і мережевих технологій стало утвердження смартфона як універсального комунікаційного пристрою, який активно проникає в усі сфери повсякденного життя. Наразі констатуємо процес активного формування нового інформатизованого напрямку медичної техніки – смартфон-орієнтованих діагностичних методик [80]. Виходячи з цього, протягом останніх років зроблено ряд важливих кроків для забезпечення зручного й надійного спряження електронних стетоскопів зі смартфонами [55, 56, 81], див. Рис. 4. На нашу думку, такий



Рис. 4. Сучасні електронні стетоскопи при роботі зі смартфоном:
 а — ЕФОН-08 (використовуються зовнішні навушники);
 б — HEASCO JABES (спряжений через портативний мікрофонний інтерфейс)

симбіоз здатний кардинально змінити практику використання електронних стетоскопів. Дійсно, сучасний рівень розвитку процесорних потужностей портативних пристроїв зв'язку здатний забезпечити не лише ефективну реєстрацію й передачу даних аускультатції, але й функції обробки та візуалізації отриманих акустичних сигналів за допомогою спеціалізованого застосунку. Наведемо приклади вдалої реалізації цієї концепції – апаратно-програмні комплекси, створені на базі моделей Thinklabs ONE, Eko Duo ECG, ЕФОН-08 [56, 79, 81].

Поза сумнівом, майбутнє належить застосункам, які, природним чином поєднують технології телемедицини й цифрового здоров'я, включаючи обмін інформацією через Інтернет з розміщеними на хмарних сервісах віддаленими базами даних аускультатції та засобами спеціалізованого аналізу на базі штучного інтелекту. Це відкриває шлях до створення апаратно-програмних комплексів, придатних для проведення віддалених обстежень, професійного моніторингу й самостійного оцінювання життєвих показників пацієнта в режимі реального часу [82]. Ще один з можливих шляхів розвитку аускультативних методик полягає в розробці розподілених телемедичних діагностичних систем, в яких інформація від великої кількості користувачьких стетоскопів різних типів буде надсилатись на центральний сервер, оснащений потужними алгоритмами для її обробки й прийняття рішень [55, 81]. При цьому неодмінно має забезпечуватись інтеграція персоналізованих результатів аускультатції з іншими типами даних, які входять до електронної медичної картки пацієнта.

Світовий досвід останніх років, пов'язаний з пандемією COVID-19, значно підвищив інтерес до технічних рішень такого класу [75, 83], водночас виявивши супутні трудно-

пці. Один з важливих факторів, які стримують їхній розвиток, – взаємна несумісність пристроїв від різних виробників. Виходячи з цього, слід орієнтуватись на розробку розгалужених мережевих систем для цифрової аускультатії з гнучкою архітектурою. Тут має бути закладено можливість одночасної інтеграції кінцевих користувачів з електронними стетоскопами різних моделей, спряжених зі смартфонами-реєстраторами, устаткованими спеціалізованим програмним забезпеченням для реєстрації, документування та обміну даними аускультатії. В Інституті гідромеханіки НАН України накопичено унікальний досвід щодо адаптації до смартфона електронних стетоскопів, які спершу не призначалися до цього. Це було досягнуто за рахунок використання портативних мікрофонних інтерфейсів для узгодження рівнів сигналу між виходом стетоскопа та входом смартфона [50], див. Рис. 46. Водночас цифровий стетоскоп 3М Littmann 3200, який транслює дані аускультатії бездротовим каналом Bluetooth у зашифрованому вигляді, виявився практично непридатним для інтеграції в системи, побудовані поза сервісами компанії-розробника [67].

4. ВИСНОВКИ

Винахід Рене Лаеннеком механічного стетоскопа для вислуховування серця й легень кардинально змінив практику первинної діагностики багатьох поширених захворювань. Однак, попри двохсотлітні еволюційні трансформації конструктивної схеми стетоскопів, їхні частотні характеристики залишились суттєво нерівномірними, а методологія діагностування – суб'єктивною.

Успіхи акустoeлектроніки призвели до появи електронних стетоскопів як самостійної гілки інструментів для аускультатії. Серед їхніх переваг слід відзначити регулярність передавальної функції, можливість бажаного налаштування частотних фільтрів і підсилення прийнятого сигналу. Всупереч усталеним явленням, перші спроби електронної реєстрації звуків життєдіяльності було зроблено ще наприкінці XIX століття. При цьому ідея реалізації повного циклу реєстрації, запису й аналізу об'єктивних акустичних характеристик звуків аускультатії втілювалась кілька разів на різних щаблях розвитку тогочасної техніки.

Вхід електронних стетоскопів на ринок медичних товарів відбувся на межі третьої чверті XX століття. Їхній комерційний успіх корелює з часом широкого розповсюдження персональних комп'ютерів і впровадженням алгоритмів цифрової обробки медико-біологічних сигналів. Це сприяло відпрацюванню апаратно-програмних технічних рішень, які забезпечили розвиток клінічних систем для комп'ютерної аускультатії.

Електронні стетоскопи мають великий потенціал як елемент телемедицини та для оперативного самоконтролю пацієнта. Нині ключова умова для їх успішного впровадження в дослідницьку та клінічну практику – зручне спряження з пристроями цифрового зв'язку класу смартфонів. При цьому мають підтримуватись функції локального документування, організації, первинного алгоритмічного аналізу та візуалізації даних аускультатії разом з інтеграцією в глобальну мережу Інтернет. У перспективі необхідно забезпечити гнучкий доступ користувача до розподілених мережевих баз медичних даних і діагностичних серверів з використанням можливостей штучного інтелекту.

REFERENCES

- [1] I. V. Vovk, V. T. Grinchenko, S. L. Dahnov, V. V. Krizhanovskii, and V. N. Oliynik, “Human respiratory noise: objectivization of auscultatory tags,” *Acoustic Bulletin*, vol. 2, pp. 11–32, 1999.
- [2] J. A. Greene, *The doctor who wasn't there: technology, history, and the limits of telehealth*. Chicago ; London: The University of Chicago Press, 2022.
- [3] P. J. Bishop, “Evolution of the stethoscope,” *Journal of the Royal Society of Medicine*, vol. 73, pp. 448–456, 1980. DOI: <https://doi.org/10.1177/014107688007300611>
- [4] A. Sakula, “R. T. H. Laennec 1781–1826 his life and work: a bicentenary appreciation,” *Thorax*, vol. 36, pp. 81–90, 1981. DOI: <https://doi.org/10.1136/thx.36.2.81>
- [5] K. Mangion, “The stethoscope,” *Malta Medical Journal*, vol. 19, pp. 41–44, 2007.
- [6] M. R. Montinari and S. Minelli, “The first 200 years of cardiac auscultation and future perspectives,” *Journal of Multidisciplinary Healthcare*, vol. 12, pp. 183–189, 2019. DOI: <https://doi.org/10.2147/jmdh.s193904>
- [7] K. K. Vasyliiev, “To the 200-th anniversary of the publication of R. Laennec’s book ‘On mediate auscultation or recognition of lung and heart diseases, based mainly on the new research method’,” *East European Journal of Internal and Family Medicine*, vol. 2019, no. 2, pp. 117–122, 2019. DOI: <https://doi.org/10.15407/internalmed2019.02.117>
- [8] M. B. Rappaport and H. B. Sprague, “Physiologic and physical laws that govern auscultation, and their clinical application,” *American Heart Journal*, vol. 21, pp. 257–318, 1941. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0002-8703\(41\)90904-3](https://doi.org/10.1016/s0002-8703(41)90904-3)
- [9] R. T. H. Laënnec, *De l’auscultation médiate ou traité du diagnostic des maladies des poumons et du coeur*. Paris: Brosson & Chaudé, 1819.
- [10] F. D. Parker, “New thoracic murmurs, with two new instruments, the refractoscope and the partial stethoscope,” *The Journal of Experimental Medicine*, vol. 28, pp. 607–621, 1918. DOI: <https://doi.org/10.1084/jem.28.5.607>
- [11] L. A. Geddes, “Birth of the stethoscope,” *IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine*, vol. 24, pp. 84–86, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1109/memb.2005.1384105>
- [12] J. Sterne, “Mediate auscultation, the stethoscope, and the “autopsy of the living”: medicine’s acoustic culture,” *Journal of Medical Humanities*, vol. 22, no. 2, pp. 115–136, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1023/a:1009067628620>
- [13] C. Renner, “Évolution du stéthoscope biauriculaire,” *Histoire des Sciences Médicales*, vol. 47, pp. 243–250, 2013.
- [14] P. D. Welsby, G. Parry, and D. Smith, “The stethoscope: some preliminary investigations,” *Postgraduate Medical Journal*, vol. 79, pp. 695–698, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1093/postgradmedj/79.938.695>

- [15] H. B. Sprague, “A new combined stethoscope chest piece,” *JAMA: The Journal of the American Medical Association*, vol. 86, p. 1909, 1926. DOI: <https://doi.org/10.1001/jama.1926.26720510005013c>
- [16] E. F. Bland, “Howard B. Sprague, M. D. (1895–1970),” *Clinical Cardiology*, vol. 13, no. 12, pp. 888–889, 1990. DOI: <https://doi.org/10.1002/clc.4960131214>
- [17] D. Littmann, “An approach to the ideal stethoscope,” *JAMA: The Journal of the American Medical Association*, vol. 178, pp. 504–505, 1961. DOI: <https://doi.org/10.1001/jama.1961.73040440018014>
- [18] P. Huard and P. M. Niaussat, “L’évolution du stéthoscope de Laennec à nos jours; son influence dans certains domaines des transmissions acoustiques,” *Histoire des Sciences Médicales*, vol. 15, pp. 173–187, 1981.
- [19] J. Zhu, C.-Y. Jiang, B. Huang, J.-M. Hu, S.-Z. Fang, K. Huang, Y.-H. Gao, and J. Yu, “Cylindrical tube stethoscopes: the value of practical equipment in the management of patients with infectious diseases,” *Infection and Drug Resistance*, vol. Volume 15, pp. 3611–3618, 2022. DOI: <https://doi.org/10.2147/idr.s369305>
- [20] P. Y. Ertel, M. Lawrence, R. K. Brown, and A. M. Stern, “Stethoscope acoustics. II. Transmission and filtration patterns,” *Circulation*, vol. 34, pp. 899–909, 1966. DOI: <https://doi.org/10.1161/01.cir.34.5.899>
- [21] H. A. Frederick and H. F. Dodge, “The “stethophone”, an electrical stethoscope,” *The Bell System Technical Journal*, vol. 3, pp. 531–549, 1924.
- [22] F. D. Johnston and E. M. Kline, “An acoustical study of the stethoscope,” *Archives of Internal Medicine*, vol. 65, pp. 328–339, 1940. DOI: <https://doi.org/10.1001/archinte.1940.00190080110007>
- [23] M. Abella, J. Formolo, and D. G. Penney, “Comparison of the acoustic properties of six popular stethoscopes,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 91, pp. 2224–2228, 1992. DOI: <https://doi.org/10.1121/1.403655>
- [24] K. A. J. Riederer and J. Backman, “Frequency response of stethoscopes,” in *Proceedings of the Nordic Acoustical Meeting NAM’98*, Stockholm, Sweden, 1998, pp. 185–189.
- [25] P. Y. Ertel, M. Lawrence, R. K. Brown, and A. M. Stern, “Stethoscope acoustics. I. The doctor and his stethoscope,” *Circulation*, vol. 34, pp. 889–898, 1966. DOI: <https://doi.org/10.1161/01.cir.34.5.889>
- [26] I. V. Vovk and I. Y. Goncharova, “Analytical method for estimation of audio properties of stethoscopes,” *Acoustic Bulletin*, vol. 3, pp. 10–16, 2000.
- [27] P. D. Welsby, “Some high pitched thoughts on chest examination,” *Postgraduate Medical Journal*, vol. 77, pp. 617–620, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1136/pmj.77.912.617>

- [28] A. Alanazi, S. Atcherson, C. Franklin, and M. Bryan, “Frequency responses of conventional and amplified stethoscopes for measuring heart sounds,” *Saudi Journal of Medicine and Medical Sciences*, vol. 8, no. 2, pp. 112–117, 2020. DOI: https://doi.org/10.4103/sjmms.sjmms_118_19
- [29] M. J. Barrett, C. S. Lacey, A. E. Sekara, E. A. Linden, and E. J. Gracely, “Mastering cardiac murmurs,” *Chest*, vol. 126, pp. 470–475, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1378/chest.126.2.470>
- [30] R. Dai, Z. Chen, J. Liu, J. Yang, B. Liang, and J.-C. Cheng, “Acoustic meta-stethoscope for cardiac auscultation,” *APL Materials*, vol. 12, no. 3, pp. 031 109 (1–8), 2024. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0189552>
- [31] M. Nussbaumer and A. Agarwal, “Stethoscope acoustics,” *Journal of Sound and Vibration*, vol. 539, pp. 117 194 (1–18), 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2022.117194>
- [32] I. V. Vovk, V. T. Grinchenko, and V. N. Oleinik, “Modeling the acoustic properties of the chest and measuring breath sounds,” *Akusticheskii Zhurnal*, vol. 41, pp. 758–768, 1995.
- [33] V. N. Oliynik, “Rational design of piezoaccelerometers for measurements on compliant surfaces,” *Acoustic Bulletin*, vol. 1, pp. 54–65, 1998.
- [34] R. C. Cabot, “A multiple electrical stethoscope for teaching purposes,” *Journal of the American Medical Association*, vol. 81, pp. 298–299, 1923. DOI: <https://doi.org/10.1001/jama.1923.26510040001015>
- [35] F. L. Hunt and M. J. Myres, “Experiments on the recording and reproduction of cardiac and respiratory sounds,” *Science*, vol. 54, pp. 359–359, 1921. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.54.1398.359>
- [36] M. Van Drie and A. Harris, “The stethoscope goes digital: learning through attention, distraction and distortion,” *Gesnerus*, vol. 77, no. 1, pp. 123–148, 2020. DOI: <https://doi.org/10.24894/gesn-en.2020.77005>
- [37] A. Sato and H. Nukiyama, “Magnoscope, an electrical stethoscope,” *American Journal of Diseases of Children*, vol. 29, pp. 618–620, 1925. DOI: <https://doi.org/10.1001/archpedi.1925.04120290039006>
- [38] —, “The magnoscope, an electrical stethoscope,” *Proceedings of Imperial Academy*, vol. 3, pp. 149–152, 1927.
- [39] —, ““micro râles”, and “latent bronchial breathing” and “latent bronchophonia”. further “microfrictio”. magnoscopic investigation 1st report,” *The Tohoku Journal of Experimental Medicine*, vol. 38, pp. 45–52, 1940. DOI: <https://doi.org/10.1620/tjem.38.45>
- [40] A. Sato and Y. Moriwaki, “Difference of intensity of heart sounds expressed numerically. preliminary report. magnoscopic investigation 2nd report,” *The Tohoku Journal of Experimental Medicine*, vol. 38, pp. 53–54, 1940. DOI: <https://doi.org/10.1620/tjem.38.53>

- [41] A. Sato, Y. Moriwaki, and T. Minagawa, “Quantitative estimation of normal heart sounds in healthy children. preliminary report. magnoscopic investigation 3rd report,” *The Tohoku Journal of Experimental Medicine*, vol. 38, pp. 55–57, 1940. DOI: <https://doi.org/10.1620/tjem.38.55>
- [42] T. Minagawa, M. Ishii, and K. Yoshino, “Quantitative estimation of intensity of heart murmurs in children with valvular diseases,” *The Tohoku Journal of Experimental Medicine*, vol. 38, pp. 58–60, 1940. DOI: <https://doi.org/10.1620/tjem.38.58>
- [43] A. Sato and S. Takai, “Magnoscopic investigation (5th report): the magnoscopically detected slight difference of intensity of breathing between two sides of chest and the radiographic findings,” *The Tohoku Journal of Experimental Medicine*, vol. 38, pp. 61–77, 1940. DOI: <https://doi.org/10.1620/tjem.38.61>
- [44] Y. Moriwaki, “Quantitative estimation of intensity of breath sounds. magnoscopic investigation — 6th report,” *The Tohoku Journal of Experimental Medicine*, vol. 46, pp. 52–56, 1943. DOI: <https://doi.org/10.1620/tjem.46.52>
- [45] “Model 66D piezoelectric stethophone. data sheet No. 162,” Chicago, IL, Tech. Rep., 1940.
- [46] G. A. Feruglio, “A simple method for intracardiac acoustic auscultation and phonocardiography,” *Circulation*, vol. 27, no. 4, pp. 578–588, 1963. DOI: <https://doi.org/10.1161/01.cir.27.4.578>
- [47] S. Taylor and L. Fothergill, “An electronic stethoscope,” *The Lancet*, vol. 267, no. 6931, p. 1050, 1956. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(56\)90808-x](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(56)90808-x)
- [48] A. B. Kinnier Wilson, L. Fothergill, and S. Taylor, “Some applications of a new electronic stethoscope,” *The Lancet*, vol. 268, pp. 1027–1028, 1956. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(56\)90272-0](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(56)90272-0)
- [49] L. J. Nowak and K. M. Nowak, “Sound differences between electronic and acoustic stethoscopes,” *BioMedical Engineering OnLine*, vol. 17, no. 104, pp. 1–11, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12938-018-0540-2>
- [50] V. N. Oliynik, “On adaptation of certified models of electronic stethoscopes to a smartphone-based system for digital auscultation,” *Journal of Electrical and Electronics Engineering*, vol. 15, no. 2, pp. 64–69, 2022.
- [51] E. Kalinauskienė, H. Razvadauskas, D. J. Morse, G. E. Maxey, and A. Naudžiūnas, “A comparison of electronic and traditional stethoscopes in the heart auscultation of obese patients,” *Medicina*, vol. 55, no. 94, pp. 1–11, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/medicina55040094>
- [52] A. A. Ishmail, S. Wing, J. Ferguson, T. A. Hutchinson, S. Magder, and K. M. Flegel, “Interobserver agreement by auscultation in the presence of a third heart sound in patients with congestive heart failure,” *Chest*, vol. 91, pp. 870–873, 1987. DOI: <https://doi.org/10.1378/chest.91.6.870>

- [53] Medetron-F electronic stethoscope. Museum of Health Care at Kingston. [Online]. Available: <https://mhc.andornot.com/en/permalink/artifact8046>
- [54] L. A. Dowell, G. E. Fant, and D. W. Watkins, “Technical note: design and construction of an electronic stethoscope,” *Journal of Clinical Engineering*, vol. 13, pp. 355–358, 1988. DOI: <https://doi.org/10.1097/00004669-198809000-00009>
- [55] E. Andrès, A. Hajjam, and C. Brandt, “Advances and innovations in the field of auscultation, with a special focus on the development of new intelligent communicating stethoscope systems,” *Health and Technology*, vol. 2, pp. 5–16, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12553-012-0017-4>
- [56] S. Leng, R. S. Tan, K. T. C. Chai, C. Wang, D. Ghista, and L. Zhong, “The electronic stethoscope,” *BioMedical Engineering OnLine*, vol. 14, no. 1, pp. 66 (1–37), 2015. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12938-015-0056-y>
- [57] Y. Kim, Y. Hyon, S. Lee, S.-D. Woo, T. Ha, and C. Chung, “The coming era of a new auscultation system for analyzing respiratory sounds,” *BMC Pulmonary Medicine*, vol. 22, no. 1, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12890-022-01896-1>
- [58] D. Weiss, C. Erie, J. Butera III, R. Copt, G. Yeaw, M. Harpster, J. Hughes, and D. Salem, “An in vitro acoustic analysis and comparison of popular stethoscopes,” *Medical Devices: Evidence and Research*, vol. Volume 12, pp. 41–52, 2019. DOI: <https://doi.org/10.2147/mdcr.s186076>
- [59] S. B. Patel, T. F. Callahan, M. G. Callahan, J. T. Jones, G. P. Graber, K. S. Foster, K. Glifort, and G. R. Wodicka, “An adaptive noise reduction stethoscope for auscultation in high noise environments,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 103, pp. 2483–2491, 1998. DOI: <https://doi.org/10.1121/1.422769>
- [60] J. Tourtier, S. Coste, E. Fontaine, N. Libert, M. Viaggi, E. Forsans, and M. Borne, “Auscultation in flight: comparison of amplified and traditional stethoscopes,” *Critical Care*, vol. 14, Suppl. 1, pp. S92–S93, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1186/cc8504>
- [61] J. S. Russotti, R. P. Jackman, T. P. Santoro, and D. D. White, “Noise reduction stethoscope for United States Navy application,” 2000.
- [62] D. Emmanouilidou, E. D. McCollum, D. E. Park, and M. Elhilali, “Adaptive noise suppression of pediatric lung auscultations with real applications to noisy clinical settings in developing countries,” *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 62, pp. 2279–2288, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1109/tbme.2015.2422698>
- [63] D. S. M. El Amine, “Analysis of the four heart sounds statistical study and spectro-temporal characteristics,” *Clinical Case Reports Journal*, vol. 1, no. 5, pp. 1–13, 2020.
- [64] A. R. A. Sovijärvi, L. P. Malmberg, G. Charbonneau, J. Vanderschoot, F. Dalmaso, C. Sacco, M. Rossi, and J. Earis, “Characteristics of breath sounds and adventitious respiratory sounds,” *European Respiratory Review*, vol. 10(77), pp. 591–596, 2000.

- [65] A. Marques and A. Oliveira, *Normal versus adventitious respiratory sounds*. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2018, pp. 181–206. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-71824-8_10
- [66] H. Pasterkamp, S. S. Kraman, and G. R. Wodicka, “Respiratory sounds. advances beyond the stethoscope,” *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, vol. 156, pp. 974–987, 1997. DOI: <https://doi.org/10.1164/ajrccm.156.3.9701115>
- [67] V. Oliynik, “On potential effectiveness of integration of 3M Littmann 3200 electronic stethoscopes into the third-party diagnostic systems with auscultation signal processing,” in *2015 IEEE 35th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*. IEEE, 2015, pp. 417–421. DOI: <https://doi.org/10.1109/elnano.2015.7146923>
- [68] Eko CORE digital attachment — stethoscope amplifier. Eko Devices Inc. [Online]. Available: <https://www.ekohealth.com/product/eko-core-digital-attachment>
- [69] H. M. Aumann and N. W. Emanetoglu, “Stethoscope with digital frequency translation for improved audibility,” *Healthcare Technology Letters*, vol. 6, no. 5, pp. 143–146, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1049/htl.2019.0011>
- [70] I. V. Vovk, S. L. Dahnov, V. V. Krizhanovskii, and V. N. Oliynik, “Potentialities and prospects of diagnostics of lung pathologies by computer recording and processing of respiratory sounds,” *Acoustic Bulletin*, vol. 1, pp. 21–33, 1998.
- [71] V. A. McKusick, J. T. Jenkins, and G. N. Webb, “The acoustic basis of the chest examination: studies by means of sound spectrography,” *American Review of Tuberculosis*, vol. 72, pp. 12–34, 1955. DOI: <https://doi.org/10.1164/artpd.1955.72.1.12>
- [72] V. A. McKusick, *Cardiovascular sound in health and disease*. Baltimore: Williams & Wilkins, 1958.
- [73] L. J. Hadjileontiadis, *Lung sounds: an advanced signal processing perspective*, ser. Synthesis Lectures on Biomedical Engineering. Morgan & Claypool Publishers, 2009, vol. 9. DOI: <https://doi.org/10.2200/S00127ED1V01Y200811BME009>
- [74] A. K. Abbas and R. Bassam, *Phonocardiography signal processing*, 2009, vol. 4. DOI: <https://doi.org/10.2200/S00187ED1V01Y200904BME031>
- [75] M. Lenharo, “Google AI could soon use a person’s cough to diagnose disease,” *Nature*, vol. 628, no. 8006, pp. 19–20, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1038/d41586-024-00869-0>
- [76] V. Maidannyk, E. Emchinskaya, A. Makarenkova, and A. Makarenkov, “Diagnosis of clinico-roentgenologic forms community acquired pneumonia in children by use phonospirography,” *International Journal of Pediatrics, Obstetrics and Gynecology*, vol. 3, pp. 49–56, 2013.
- [77] M. Kompis, H. Pasterkamp, and G. R. Wodicka, “Acoustic imaging of the human chest,” *Chest*, vol. 120, pp. 1309–1321, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1378/chest.120.4.1309>

- [78] *Stethoscope market size, share & trends analysis report by technology type (electronic/digital stethoscope, smart stethoscope), by sales channel, by end-use, by region, and segment forecasts, 2024–2030.* San Francisco, CA: Grand View Research, 2022, no. GVR-2-68038-050-7.
- [79] C. Koning and A. Lock, “A systematic review and utilization study of digital stethoscopes for cardiopulmonary assessments,” *Journal of Medical Research and Innovation*, vol. 5, no. 2, pp. 4–14, 2022. DOI: https://doi.org/10.25259/jmri_2_2021
- [80] J.-Y. Yoon, Ed., *Smartphone based medical diagnostics.* London, United Kingdom: Academic Press, 2020.
- [81] V. Grinchenko, A. Artemiev, A. Makarenkov, A. Makarenkova, V. Oliynik, R. Nabiev, O. Gurenko, V. Gnateiko, and A. Glazova, “Mobile end-user solution for system of monitoring of respiratory and cardiac sounds,” in *2014 IEEE 34th International Scientific Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO).* IEEE, 2014, pp. 299–302. DOI: <https://doi.org/10.1109/elnano.2014.6873900>
- [82] A. Giorgio, “The last generation of electronic stethoscopes: The internet tele-stethoscope,” *International Journal of Bioinformatics Research*, vol. 4, pp. 249–253, 2012. DOI: <https://doi.org/10.9735/0975-3087.4.1.249-253>
- [83] C. Brown, J. Chauhan, A. Grammenos, J. Han, A. Hasthanasombat, D. Spathis, T. Xia, P. Cicuta, and C. Mascolo, “Exploring automatic diagnosis of COVID-19 from crowdsourced respiratory sound data,” in *Proceedings of the 26th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining.* ACM, 2020, pp. 3474–3484. DOI: <https://doi.org/10.1145/3394486.3412865>

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Шумы дыхания человека: объективизация аускультативных признаков / Вовк И. В., Гринченко В. Т., Дахнов С. Л., Крижановский В. В. и Олийнык В. Н. // *Акустичний вісник.* — 1999. — Т. 2. — С. 11–32.
- [2] Greene J. A. The doctor who wasn't there: technology, history, and the limits of telehealth. — Chicago ; London : The University of Chicago Press, 2022. — 328 p.
- [3] Bishop P. J. Evolution of the stethoscope // *Journal of the Royal Society of Medicine.* — 1980. — Vol. 73. — P. 448–456.
- [4] Sakula A. R. T. H. Laennec 1781–1826 his life and work: a bicentenary appreciation // *Thorax.* — 1981. — Vol. 36. — P. 81–90.
- [5] Mangion K. The stethoscope // *Malta Medical Journal.* — 2007. — Vol. 19. — P. 41–44.
- [6] Montinari M. R., Minelli S. The first 200 years of cardiac auscultation and future perspectives // *Journal of Multidisciplinary Healthcare.* — 2019. — Vol. 12. — P. 183–189.

- [7] Васильев К. К. К 200-летию выхода в свет книги Р. Лаэннека «О посредственной аускультации или распознавании болезней легких и сердца, основанном главным образом на этом новом методе исследования» // Східноєвропейський журнал внутрішньої та сімейної медицини. — 2019. — Т. 2019, № 2. — С. 117–122.
- [8] Rappaport M. B., Sprague H. B. Physiologic and physical laws that govern auscultation, and their clinical application // American Heart Journal. — 1941. — Vol. 21. — P. 257–318.
- [9] Laënnec R. T. H. De l'auscultation médiate ou traité du diagnostic des maladies des poumons et du coeur. — Paris : Brosson & Chaudé, 1819.
- [10] Parker F. D. New thoracic murmurs, with two new instruments, the refractoscope and the partial stethoscope // The Journal of Experimental Medicine. — 1918. — Vol. 28. — P. 607–621.
- [11] Geddes L. A. Birth of the stethoscope // IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine. — 2005. — Vol. 24. — P. 84–86.
- [12] Sterne J. Mediate auscultation, the stethoscope, and the “autopsy of the living”: medicine’s acoustic culture // Journal of Medical Humanities. — 2001. — Vol. 22, no. 2. — P. 115–136.
- [13] Renner C. Évolution du stéthoscope biauriculaire // Histoire des Sciences Médicales. — 2013. — Vol. 47. — P. 243–250.
- [14] Welsby P. D., Parry G., Smith D. The stethoscope: some preliminary investigations // Postgraduate Medical Journal. — 2003. — Vol. 79. — P. 695–698.
- [15] Sprague H. B. A new combined stethoscope chest piece // JAMA: The Journal of the American Medical Association. — 1926. — Vol. 86. — P. 1909.
- [16] Bland E. F. Howard B. Sprague, M. D. (1895–1970) // Clinical Cardiology. — 1990. — Vol. 13, no. 12. — P. 888–889.
- [17] Littmann D. An approach to the ideal stethoscope // JAMA: The Journal of the American Medical Association. — 1961. — Vol. 178. — P. 504–505.
- [18] Huard P., Niaussat P. M. L'évolution du stéthoscope de Laennec à nos jours; son influence dans certains domaines des transmissions acoustiques // Histoire des Sciences Médicales. — 1981. — Vol. 15. — P. 173–187.
- [19] Cylindrical tube stethoscopes: the value of practical equipment in the management of patients with infectious diseases / Zhu J., Jiang C.-Y., Huang B., Hu J.-M., Fang S.-Z., Huang K., Gao Y.-H., and Yu J. // Infection and Drug Resistance. — 2022. — Vol. Volume 15. — P. 3611–3618.
- [20] Stethoscope acoustics. II. Transmission and filtration patterns / Ertel P. Y., Lawrence M., Brown R. K., and Stern A. M. // Circulation. — 1966. — Vol. 34. — P. 899–909.

- [21] Frederick H. A., Dodge H. F. The “stethophone”, an electrical stethoscope // The Bell System Technical Journal. — 1924. — Vol. 3. — P. 531–549.
- [22] Johnston F. D., Kline E. M. An acoustical study of the stethoscope // Archives of Internal Medicine. — 1940. — Vol. 65. — P. 328–339.
- [23] Abella M., Formolo J., Penney D. G. Comparison of the acoustic properties of six popular stethoscopes // The Journal of the Acoustical Society of America. — 1992. — Vol. 91. — P. 2224–2228.
- [24] Riederer K. A. J., Backman J. Frequency response of stethoscopes // Proceedings of the Nordic Acoustical Meeting NAM’98. — Stockholm, Sweden, 1998. — P. 185–189.
- [25] Stethoscope acoustics. I. The doctor and his stethoscope / Ertel P. Y., Lawrence M., Brown R. K., and Stern A. M. // Circulation. — 1966. — Vol. 34. — P. 889–898.
- [26] Вовк І. В., Гончарова І. Ю. Аналітичний метод для оцінки акустических свойств стетоскопов // Акустичний вісник. — 2000. — Т. 3. — С. 10–16.
- [27] Welsby P. D. Some high pitched thoughts on chest examination // Postgraduate Medical Journal. — 2001. — Vol. 77. — P. 617–620.
- [28] Frequency responses of conventional and amplified stethoscopes for measuring heart sounds / Alanazi A., Atcherson S., Franklin C., and Bryan M. // Saudi Journal of Medicine and Medical Sciences. — 2020. — Vol. 8, no. 2. — P. 112–117.
- [29] Mastering cardiac murmurs / Barrett M. J., Lacey C. S., Sekara A. E., Linden E. A., and Gracely E. J. // Chest. — 2004. — Vol. 126. — P. 470–475.
- [30] Acoustic meta-stethoscope for cardiac auscultation / Dai R., Chen Z., Liu J., Yang J., Liang B., and Cheng J.-C. // APL Materials. — 2024. — Vol. 12, no. 3. — P. 031109 (1–8).
- [31] Nussbaumer M., Agarwal A. Stethoscope acoustics // Journal of Sound and Vibration. — 2022. — Vol. 539. — P. 117194 (1–18).
- [32] Вовк І. В., Гринченко В. Т., Олейник В. Н. Проблемы моделирования акустических свойств грудной клетки и измерения шумов дыхания // Акустический журнал. — 1995. — Т. 41. — С. 758–768.
- [33] Олійник В. Н. Раціональне проектування п’єзоакселерометрів для вимірювань на піддатливих поверхнях // Акустичний вісник. — 1998. — Т. 1. — С. 54–65.
- [34] Cabot R. C. A multiple electrical stethoscope for teaching purposes // Journal of the American Medical Association. — 1923. — Vol. 81. — P. 298–299.
- [35] Hunt F. L., Myres M. J. Experiments on the recording and reproduction of cardiac and respiratory sounds // Science. — 1921. — Vol. 54. — P. 359–359.

- [36] Van Drie M., Harris A. The stethoscope goes digital: learning through attention, distraction and distortion // *Gesnerus*. — 2020. — Vol. 77, no. 1. — P. 123–148.
- [37] Sato A., Nukiyama H. Magnoscope, an electrical stethoscope // *American Journal of Diseases of Children*. — 1925. — Vol. 29. — P. 618–620.
- [38] Sato A., Nukiyama H. The magnoscope, an electrical stethoscope // *Proceedings of Imperial Academy*. — 1927. — Vol. 3. — P. 149–152.
- [39] Sato A., Nukiyama H. “micro râles”, and “latent bronchial breathing” and “latent bronchophonia”. Further “microfrictio”. Magnoscopic investigation 1st report // *The Tohoku Journal of Experimental Medicine*. — 1940. — Vol. 38. — P. 45–52.
- [40] Sato A., Moriwaki Y. Difference of Intensity of Heart Sounds Expressed Numerically. Preliminary Report. Magnoscopic Investigation 2nd Report // *The Tohoku Journal of Experimental Medicine*. — 1940. — Vol. 38. — P. 53–54.
- [41] Sato A., Moriwaki Y., Minagawa T. Quantitative estimation of normal heart sounds in healthy children. Preliminary report. Magnoscopic investigation 3rd report // *The Tohoku Journal of Experimental Medicine*. — 1940. — Vol. 38. — P. 55–57.
- [42] Minagawa T., Ishii M., Yoshino K. Quantitative estimation of intensity of heart murmurs in children with valvular diseases // *The Tohoku Journal of Experimental Medicine*. — 1940. — Vol. 38. — P. 58–60.
- [43] Sato A., Takai S. Magnoscopic investigation (5th report): the magnoscopically detected slight difference of intensity of breathing between two sides of chest and the radiographic findings // *The Tohoku Journal of Experimental Medicine*. — 1940. — Vol. 38. — P. 61–77.
- [44] Moriwaki Y. Quantitative estimation of intensity of breath sounds. Magnoscopic investigation — 6th report // *The Tohoku Journal of Experimental Medicine*. — 1943. — Vol. 46. — P. 52–56.
- [45] Model 66D piezoelectric stethophone. Data sheet No. 162 : Rep. — Chicago, IL : 1940.
- [46] Feruglio G. A. A simple method for intracardiac acoustic auscultation and phonocardiography // *Circulation*. — 1963. — Vol. 27, no. 4. — P. 578–588.
- [47] Taylor S., Fothergill L. An electronic stethoscope // *The Lancet*. — 1956. — Vol. 267, no. 6931. — P. 1050.
- [48] Kinnier Wilson A. B., Fothergill L., Taylor S. Some applications of a new electronic stethoscope // *The Lancet*. — 1956. — Vol. 268. — P. 1027–1028.
- [49] Nowak L. J., Nowak K. M. Sound differences between electronic and acoustic stethoscopes // *BioMedical Engineering OnLine*. — 2018. — Vol. 17, no. 104. — P. 1–11.

- [50] Oliynik V. N. On adaptation of certified models of electronic stethoscopes to a smart-phone-based system for digital auscultation // Journal of Electrical and Electronics Engineering. — 2022. — Vol. 15, no. 2. — P. 64–69.
- [51] A comparison of electronic and traditional stethoscopes in the heart auscultation of obese patients / Kalinauskienė E., Razvadauskas H., Morse D. J., Maxey G. E., and Naudžiūnas A. // Medicina. — 2019. — Vol. 55, no. 94. — P. 1–11.
- [52] Interobserver agreement by auscultation in the presence of a third heart sound in patients with congestive heart failure / Ishmail A. A., Wing S., Ferguson J., Hutchinson T. A., Magder S., and Flegel K. M. // Chest. — 1987. — Vol. 91. — P. 870–873.
- [53] Medetron-F electronic stethoscope : Museum of Health Care at Kingston. — Access mode: <https://mhc.andornot.com/en/permalink/artifact8046>.
- [54] Dowell L. A., Fant G. E., Watkins D. W. Technical note: design and construction of an electronic stethoscope // Journal of Clinical Engineering. — 1988. — Vol. 13. — P. 355–358.
- [55] Andrès E., Hajjam A., Brandt C. Advances and innovations in the field of auscultation, with a special focus on the development of new intelligent communicating stethoscope systems // Health and Technology. — 2012. — Vol. 2. — P. 5–16.
- [56] The electronic stethoscope / Leng S., Tan R. S., Chai K. T. C., Wang C., Ghista D., and Zhong L. // BioMedical Engineering OnLine. — 2015. — Vol. 14, no. 1. — P. 66 (1–37).
- [57] The coming era of a new auscultation system for analyzing respiratory sounds / Kim Y., Hyon Y., Lee S., Woo S.-D., Ha T., and Chung C. // BMC Pulmonary Medicine. — 2022. — Vol. 22, no. 1.
- [58] An in vitro acoustic analysis and comparison of popular stethoscopes / Weiss D., Erie C., Butera III J., Copt R., Yeaw G., Harpster M., Hughes J., and Salem D. // Medical Devices: Evidence and Research. — 2019. — Vol. Volume 12. — P. 41–52.
- [59] An adaptive noise reduction stethoscope for auscultation in high noise environments / Patel S. B., Callahan T. F., Callahan M. G., Jones J. T., Graber G. P., Foster K. S., Glifort K., and Wodicka G. R. // The Journal of the Acoustical Society of America. — 1998. — Vol. 103. — P. 2483–2491.
- [60] Auscultation in flight: comparison of amplified and traditional stethoscopes / Tourtier J., Coste S., Fontaine E., Libert N., Viaggi M., Forsans E. and Borne M. // Critical Care. — 2010. — Vol. 14, Suppl. 1. — P. S92–S93.
- [61] Noise reduction stethoscope for United States Navy application : 1214 / Naval Submarine Medical Research Laboratory ; executor: Russotti J. S., Jackman R. P., Santoro T. P., White D. D. : 2000. — 61 p.

- [62] Adaptive noise suppression of pediatric lung auscultations with real applications to noisy clinical settings in developing countries / Emmanouilidou D., McCollum E. D., Park D. E., and Elhilali M. // IEEE Transactions on Biomedical Engineering. — 2015. — Vol. 62. — P. 2279–2288.
- [63] El Amine D. S. M. Analysis of the four heart sounds statistical study and spectro-temporal characteristics // Clinical Case Reports Journal. — 2020. — Vol. 1, no. 5. — P. 1–13.
- [64] Characteristics of breath sounds and adventitious respiratory sounds / Sovijärvi A. R. A., Malmberg L. P., Charbonneau G., Vanderschoot J., Dalmasso F., Sacco C., Rossi M., and Earis J. // European Respiratory Review. — 2000. — Vol. 10(77). — P. 591–596.
- [65] Marques A., Oliveira A. Normal versus adventitious respiratory sounds // Breath sounds. — Cham, Switzerland : Springer International Publishing, 2018. — P. 181–206.
- [66] Pasterkamp H., Kraman S. S., Wodicka G. R. Respiratory sounds. Advances beyond the stethoscope // American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine. — 1997. — Vol. 156. — P. 974–987.
- [67] Oliynik V. On potential effectiveness of integration of 3M Littmann 3200 electronic stethoscopes into the third-party diagnostic systems with auscultation signal processing // 2015 IEEE 35th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO). — IEEE. — 2015. — P. 417–421.
- [68] Eko CORE digital attachment — stethoscope amplifier : Eko Devices Inc. — Access mode: <https://www.ekohealth.com/product/eko-core-digital-attachment>.
- [69] Aumann H. M., Emanetoglu N. W. Stethoscope with digital frequency translation for improved audibility // Healthcare Technology Letters. — 2019. — Vol. 6, no. 5. — P. 143–146.
- [70] Возможности и перспективы диагностики легочных патологий с помощью компьютерной регистрации и обработки шумов дыхания / Вовк И. В., Дахнов С. Л., Крижановский В. В. и Олийнык В. Н. // Акустичний вісник. — 1998. — Т. 1. — С. 21–33.
- [71] McKusick V. A., Jenkins J. T., Webb G. N. The acoustic basis of the chest examination: studies by means of sound spectrography // American Review of Tuberculosis. — 1955. — Vol. 72. — P. 12–34.
- [72] McKusick V. A. Cardiovascular sound in health and disease. — Baltimore : Williams & Wilkins, 1958. — 570 p.
- [73] Hadjileontiadis L. J. Lung sounds: an advanced signal processing perspective. — Morgan & Claypool Publishers, 2009. — Vol. 9 of Synthesis Lectures on Biomedical Engineering. — 100 p.

- [74] Abbas A. K., Bassam R. Phonocardiography signal processing. — 2009. — Vol. 4. — 218 p.
- [75] Lenharo M. Google AI could soon use a person's cough to diagnose disease // Nature. — 2024. — Vol. 628, no. 8006. — P. 19–20.
- [76] Фоноспирографическая диагностика клинико-рентгенологических форм внебольничной пневмонии у детей / Майданник В. Г., Емчинская Е. А., Макаренкова А. А. и Макаренков А. П. // Международный журнал педиатрии, акушерства и гинекологии. — 2013. — Т. 3. — С. 49–56.
- [77] Kompis M., Pasterkamp H., Wodicka G. R. Acoustic imaging of the human chest // Chest. — 2001. — Vol. 120. — P. 1309–1321.
- [78] Stethoscope market size, share & trends analysis report by technology type (electronic/digital stethoscope, smart stethoscope), by sales channel, by end-use, by region, and segment forecasts, 2024–2030. No. GVR-2-68038-050-7. — San Francisco, CA : Grand View Research, 2022. — 300 p.
- [79] Koning C., Lock A. A systematic review and utilization study of digital stethoscopes for cardiopulmonary assessments // Journal of Medical Research and Innovation. — 2022. — Vol. 5, no. 2. — P. 4–14.
- [80] Smartphone based medical diagnostics / ed. by Yoon J.-Y. — London, United Kingdom : Academic Press, 2020. — 237 p.
- [81] Mobile end-user solution for system of monitoring of respiratory and cardiac sounds / Grinchenko V., Artemiev A., Makarenkov A., Makarenkova A., Oliynik V., Nabiev R., Gurenko O., Gnateiko V., and Glazova A. // 2014 IEEE 34th International Scientific Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO). — IEEE. — 2014. — P. 299–302.
- [82] Giorgio A. The last generation of electronic stethoscopes: The internet telestethoscope // International Journal of Bioinformatics Research. — 2012. — Vol. 4. — P. 249–253.
- [83] Exploring automatic diagnosis of COVID-19 from crowdsourced respiratory sound data / Brown C., Chauhan J., Grammenos A., Han J., Hasthanasombat A., Spathis D., Xia T., Cicuta P., and Mascolo C. // Proceedings of the 26th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery & Data Mining. — ACM. — 2020. — P. 3474–3484.

V. T. Grinchenko, V. N. Oliynik
The unfinished history of a stethoscope

Medical auscultation, listening by a physician to cardiac, respiratory, gastrointestinal sounds, etc., is considered one of the basic methodologies for primary diagnosing various diseases and pathologies of the human body. The paper details the history of the invention and the bicentennial evolution of the stethoscope as a tool for mediate auscultation. We trace the transformation of the stethoscope from Laennec's hearing tube to a well-recognized modern design. Special attention is paid to the introduction of electroacoustic and later electronic technologies into the practice of recording vital sounds. Contrary to established views, such attempts were initiated at the turn of the 19th and 20th centuries. The idea of the complete cycle of recording, storing, and analyzing the objective acoustic features of the auscultation sounds was embodied several times on different levels of contemporary development of technologies. This disproves the widespread myth that the methodology of electronic auscultation is the actual peer of the era of personal computers. In particular, electronic stethoscopes, which have emerged as an independent branch of portable instruments for auscultation, have continuously evolved since at least the 1920s. The design and operational features of several popular models of modern electronic stethoscopes are briefly analyzed. Electronic stethoscopes have a high potential as an element of telemedicine and for operational self-monitoring of the patient. Nowadays, the key condition for their successful implementation in research and clinical practice is a convenient pairing with digital communication devices of the smartphone class. In this context, the functions of local documentation, organization, primary algorithmic analysis, and visualization of auscultation data should be supported, along with the option of integration into the global Internet network. In the future, it is necessary to ensure flexible user access to distributed medical databases and diagnostic servers using the capabilities of artificial intelligence.

KEY WORDS: *stethoscope, auscultation, vital sounds, electronic recording, digital signal processing, telemedicine, smartphone*