

УДК [681.7.01+66.088+615.478.6]

ІБРАГІМ ЮНУСС АБДЕЛХАМІД, Я.В. НОСОВА,
О.Г. АВРУНІН, О.Ю. ПРІСИЧ, АЛОФІ БАНДЕР АЛІ САЛЕХ

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ КОЕФІЦІЄНТІВ АЕРОДИНАМІЧНОГО НОСОВОГО ОПОРУ ЗА ДАНИМИ ПЕРЕДНЬОЇ ТА ЗАДНЬОЇ АКТИВНОЇ РИНОМАНОМЕТРІЇ

*Харківський національний університет радіоелектроніки
Проспект Науки, 14, м. Харків, 61166, Україна
Тел. (057) 51-32-56, e-mail: oleh.avrunin@nure.ua
Харківський національний медичний університет
Університет Умм-аль-кура, м.Мека, Саудівська Аравія*

Анотація. В роботі розглядається порівняльний аналіз коефіцієнтів аеродинамічного носового опору за даними передньої та задньої активної риноманометрії. Функціональні порушення носового дихання в подальшому ведуть до подальших ускладнень системи верхніх та нижніх дихальних шляхів, зменшують якість життя та приводять до інших патологічних станів. Діагностика таких порушень ускладнюється низькою розповсюдженістю засобів тестування носового дихання (риноманометрів) у медичній практиці й особливостей функціональних методів дослідження, які зокрема пов'язані з низькою повторюваністю результатів та відсутністю чіткої кореляції між діагностичними даними та об'єктивними відчуттями пацієнта. Отримані дані щодо сумарних коефіцієнтів аеродинамічного носового опору, які визначені за допомогою методами в передньої та задньої активної риноманометрії, достатньо чітко кореспондуються між собою в межах 12%. Значення сумарних коефіцієнтів носового опору, що отримані методом задньої риноманометрії, у всіх характерних випадках відрізняються у меншу сторону. Перспективою роботи є набір статистичних даних для визначення особливостей тестування носового дихання для отримання точних персоналізованих значень коефіцієнтів носового опору при різних режимах дихання з урахуванням індивідуальної варіабельності.

Ключові слова: дихання носове, риноманометрія, витрата повітря, перепад тиску, ринологія
Abstract. The paper deals with a comparative analysis of aerodynamic nose drag coefficients based on the data of front and rear active rhinomanometry. Functional disorders of nasal breathing in the future lead to further complications of the upper and lower respiratory system, reduce the quality of life and lead to other pathological conditions. The diagnosis of such disorders is complicated by the low prevalence of nasal breathing testing tools (rhinomanometers) in medical practice and the peculiarities of functional research methods, which are particularly related to the low repeatability of results and the lack of a clear correlation between diagnostic data and the patient's objective feelings. The obtained data on the total coefficients of aerodynamic nasal resistance, which are determined using the methods of front and rear active rhinomanometry, correspond quite clearly to each other within 12%. The values of the total coefficients of nasal resistance, obtained by the method of posterior rhinomanometry, in all typical cases differ to a lesser extent. The perspective of the work is to gather statistical data to determine the features of nasal breathing testing to obtain accurate personalized values of nasal resistance coefficients in different breathing modes, taking into account individual variability.

Key words: nasal breathing, rhinomanometry, air flow, pressure drop, rhinology

DOI: 10.31649/1681-7893-2022-43-1-53-64

ВСТУП

Актуальність тематики досліджень. Носова порожнина – це структура, яка має складну анатомічну будову та відповідну комплексну функціональність. Серед основних її функцій є дихальна – для транспортування кисню, що потрібен для забезпечення життєдіяльності тканин організму [1, 2]. Від вірної дихальної функції відповідно залежать інші – зволожувальна, нюхова, фільтрувальна, захисна, резонаторна та інші [3, 4].

Функціональні порушення носового дихання в подальшому ведуть до подальших ускладнень системи верхніх та нижніх дихальних шляхів, зменшують якість життя та приводять до інших патологічних станів. Діагностика таких порушень ускладнюється низькою розповсюдженістю засобів тестування носового дихання (риноанометрів) у медичній практиці й особливостей функціональних методів дослідження, які зокрема пов'язані з низькою повторюваністю результатів та відсутністю чіткої кореляції між діагностичними даними та об'єктивними відчуттями пацієнта [5, 6].

Просте підвищення точності вимірювань при цьому теж не дозволяє вирішити урахування цих особливостей. Тому, на сучасному етапі найбільш поширеним діагностичним методом, який дозволяє досліджувати архітектуру – анатомічну конфігурацію носової порожнини, є рентгенівська комп'ютерна томографія та її різні модифікації – спіральна та конусно-променева томографії [7, 8]. Ці методи забезпечують візуалізацію внутрішніх кістково-хрящових структур, м'яких тканин та різноманітних новоутворень носової порожнини. Слід відмітити, що метод магнітно-резонансної томографії не часто використовується для інтроскопії носової порожнини, так як має деякі обмеження щодо візуалізації кісткових структур і дуже часто призводить до станів гіпердіагностики, які потребують верифікації. Але, комп'ютерно-томографічні методи надають лише візуальну інтроскопічну інформацію щодо анатомічних особливостей носової порожнини і безпосередньо не дозволяють отримати дані щодо змін функції носового дихання відповідно до певної архітектури та теж не завжди корелюють з індивідуальними відчуттями пацієнтів. Тому, зараз актуальним завданням є надання можливості за анатомічними томографічними даними отримувати функціональні дані щодо фізіологічних характеристик носового дихання а також використовувати для цього функціональні риноанометричні методи з урахуванням особливостей методик тестування та режимів дихання, що дозволить добитись більшої повторюваності результатів таких досліджень. Виходячи з цього, метою роботи є порівняльний аналіз коефіцієнтів аеродинамічного носового опору за даними передньої та задньої активної риноанометрії.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДжЕРЕЛ

Дослідженням в області аеродинаміки верхніх дихальних шляхів присвячені роботи відомих спеціалістів в області ринології [9, 10]. Останніми даними стали вивчення характеристик носової порожнини методами CFD і верифікація результатів моделювання з клінічними ознаками, а також прогнозування функціональних результатів в ринохірургії [11, 12]. Удосконалюються підходи планування функціональних оперативних ринохірургічних втручань [13, 14]. Досліджується вплив анатомічної структури та зміни архітектури носа на назальну аеродинаміку [15, 16, 17], зокрема, при одонтогенних синуситах [18], при синдромі сонного апное [19, 20]. Проводиться моделювання носової порожнини та відповідне вивчення характеристик повітряного потоку при диханні [21, 22].

Методам функціонального дослідження носового дихання присвячено багато робіт [23-28], зокрема методам передньої та задньої активної риноанометрії та ринорезистометрії, які дозволяють отримувати дані щодо коефіцієнта аеродинамічного носового опору при різних режимах дихання. Розглядаються принципи побудови риноанометричної апаратури та особливостей її використання, зокрема похибок при вимірюванні показників дихання [27, 28]. Ці підходи дозволяють тестувати персоніфіковану функціональну спроможність верхніх дихальних шляхів пропускати повітря при певних режимах дихання а також проводити аналіз адекватності терапії [23-28]. Також розглядаються питання акустичної ринометрії при неінвазивному визначенні конфігурації носової порожнини [29, 30].

Більшість методів дослідження верхніх дихальних шляхів, майже окрім задньої активної риноанометрії [1, 3, 4, 28], розглядають окремо показники лівої та правої частин носової порожнини – лівого то правого повітряних проходів та навіть дозволяють лише їх окреме дослідження. Але, тип дихання через обидві половини носової порожнини є найбільш фізіологічним. Тому, доцільним є розглянути можливість отримання даних щодо загального коефіцієнта аеродинамічного носового опору при різних режимах дихання незалежно від методики тестування.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ

В роботі для проведення досліджень аеродинамічних характеристик носової порожнини використовувався розроблений на кафедрі біомедичної інженерії Харківського національного університету радіоелектроніки та запатентований комп'ютерний риноанометр КРМ (див. рисунок 1) для тестування носового дихання ТНДА з блоком перепадно-витратних характеристик ПВХ (свідоцтво про державну метрологічну атестацію в Україні, № 05-0102 від 01.04.2010 г.) [27, 28]. До складу пристрою входить вимірювальний блок, що містить перетворювачі тиску і витрати повітря, сигнали з яких передаються на блок перетворення, в якому здійснюється оцифровування вихідних вимірювальних сигналів за допомогою аналого-цифрового перетворювача і передавання їх через інтерфейс USB 2.0 до

БІОМЕДИЧНІ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ ТА ПРИЛАДИ

персонального комп'ютера, де за допомогою програмного забезпечення здійснюється послідовна високорівнева обробка сигналів, візуалізація, аналіз і протоколювання результатів дослідження.

Даний пристрій дозволяє використовувати методики як передньої, так і задньої активної риноманометрії (див. рис. 2). При риноманометрії проводиться безпосередній вимір двох основних показників носового дихання – перепаду тиску Δp між показниками у точках виміру тиску p_1 та p_2 у носоглотці та під масковим простором, відповідно, та об'ємної витрати повітря Q при диханні.



Рисунок 1 – Зовнішній вигляд комп'ютерного риноманометра ТНДА-ПВХ

При передній активній риноманометрії (ПАРМ) виконуються почергові дослідження витрати повітря при носовому диханні через кожну половину носової порожнини відповідно до рисунку 2, а з обтюрацією протилежного до активного при диханні носового проходу для виміру тиску у носоглотці. При задній активній риноманометрії (ЗАРМ) дихання виконується через обидва носових проходи, а тиск у носоглотці вимірюється за допомогою трубки, що розташовується у ротовій порожнині (див. рисунок 2, б). Не зважаючи на те, що другий підхід є більш фізіологічним, найбільш розповсюдженим є перший підхід, що пов'язано з особливостями проведення вимірювань. Для отримання даних о конфігурації носової порожнини використовувались томографічні дослідження на базі спірального рентгенівського томографа SOMATOM + фірми SIEMENS (Німеччина). Обстеження пацієнтів проводилися в діагностичному центрі Харківської обласної клінічної лікарні (ХОКБ).

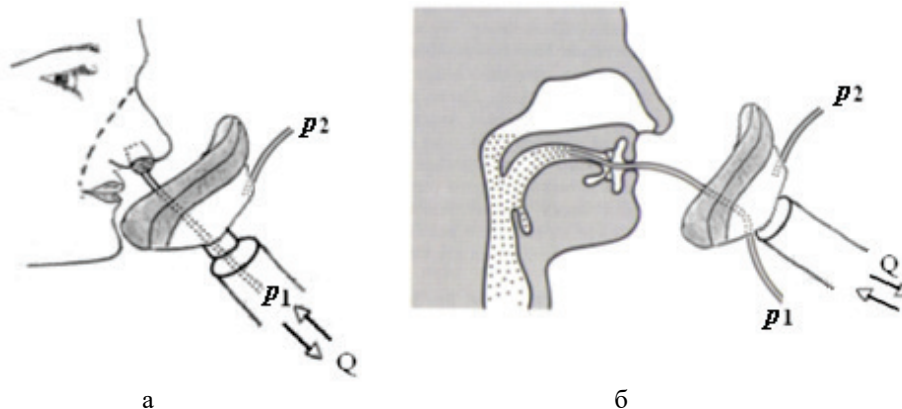


Рисунок 2 – Схеми розміщення перетворювачів тиску p_1 та p_2 при передній (а) і задній (б) активній риноманометрії (Q – витрата повітря)

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ.

Визначення коефіцієнту аеродинамічного опору носової порожнини при риноманометричних дослідженнях засновано на припущенні, що повітряні шляхи носа розглядаються як два паралельних носових проходи. Загальна витрата повітря при цьому представляє суму витрат через правий Q_R та лівий Q_L носові канали, відповідно з виразом

$$Q_{\Sigma} = Q_L + Q_R, \quad (1)$$

а перепади тисків і для правого Δp_R і лівого Δp_L носових каналів однакові

$$\Delta p = \Delta p_L = \Delta p_R. \quad (2)$$

Коефіцієнт аеродинамічного носового опору в ламінарному режимі течії повітря (при спокійному диханні) розраховується за формулою [28]

$$A = \frac{\Delta p}{Q}. \quad (3)$$

Коефіцієнт аеродинамічного носового опору в турбулентному режимі течії повітря (при форсованому диханні) розраховується за формулою [28]

$$A = \frac{\Delta p}{Q^2}. \quad (4)$$

Для розрахунку цих коефіцієнтів можливо використовувати дані перепаду тиску та витрати повітря для лівого та правого носових проходів та, відповідно, їх інтегральні показники.

При отриманні коефіцієнту аеродинамічного носового опору за даними передньої активної риноманометрії при диханні через обидва носових проходи в ламінарному режимі течії повітря з урахуванням лінійної залежності перепаду тиску Δp від витрати повітря Q використовується формула для паралельного повітряного опору двох каналів

$$A = \frac{A_R \cdot A_L}{A_R + A_L}, \quad (5)$$

де A_R та A_L - коефіцієнту аеродинамічного носового опору для правого та лівого носових проходів, які розраховуються за формулою (3) підстановкою відповідних значень перепаді тиску Δp_R та Δp_L і витрат повітря Q_R та Q_L .

З урахуванням квадратичної залежності перепаду тиску Δp від витрати повітря Q в турбулентному режимі течії повітря при форсованому диханні згідно з формулою (4) при отриманні коефіцієнту аеродинамічного носового опору за даними передньої активної риноманометрії при диханні через обидва носових проходи, в ламінарному режимі розраховується за формулою

$$A = \left(\frac{\sqrt{A_L} \cdot \sqrt{A_R}}{\sqrt{A_L} + \sqrt{A_R}} \right)^2. \quad (6)$$

Розрахунки за формулами (5) та (6) виконувались відповідно для отримання значень коефіцієнтів $A_{\Sigma}^{(L)}$, $A_{\Sigma}^{(T)}$ інтегрального аеродинамічного носового опору в ламінарному та турбулентному режимах течії повітря з відповідною підстановкою значень коефіцієнтів аеродинамічного носового опору $A_R^{(T)}$, $A_L^{(T)}$, $A_R^{(L)}$, $A_L^{(L)}$ для лівого та правого носових проходів в ламінарному та турбулентному режимах течії

БІОМЕДИЧНІ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ ТА ПРИЛАДИ

повітря. Для спрощення інтерпретації даних максимальний перепад тиску був обмежений у всіх випадках та складав 4 кПа.

Залежність перепаду тиску від витрати повітря при диханні в нормі наведена на рисунку 3. Їй відповідає анатомічна конфігурація носової порожнини, що наведена на рисунку 4 з відповідними характерними аксіальним томографічним зрізом (див. рисунок 4, а) та фронтальною реконструкцією (див. рисунок 4, б). З нього можна бачити, що за характером залежності перехід з ламінарного у турбулентний режим течії настає приблизно біля значення перепаду тиску 1 кПа. Максимальні витрати повітря при диханні через окремі половини носу при проведенні ПАРМ склали 2,3 та 2,7 л/с. Розрахункова витрата повітря при ПАРМ склала 5 л/с. Сумарна витрата повітря при безпосередньому вимірі по методу ЗАРМ склала 4,6 л/с, що складає відносну похибку в 12%.

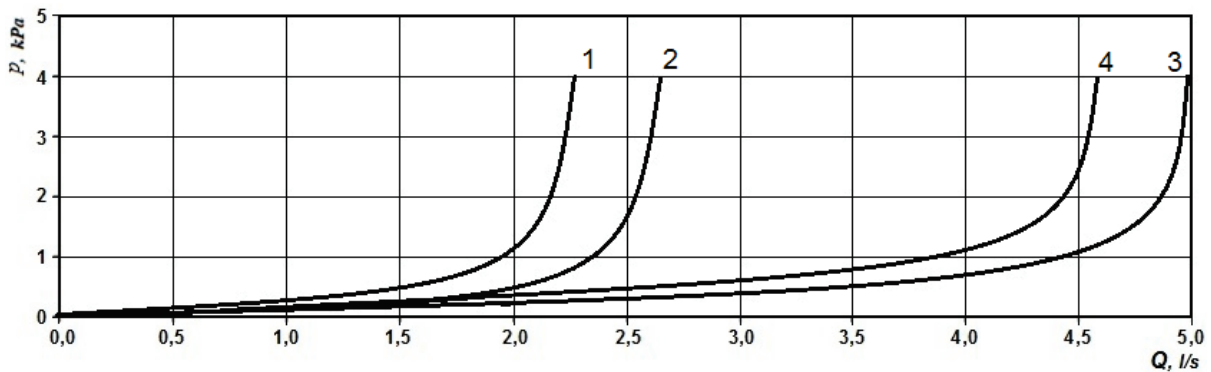
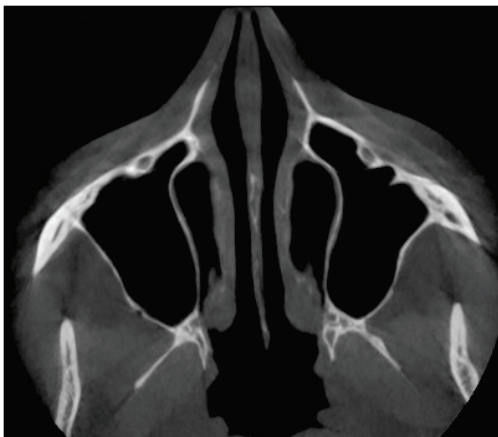
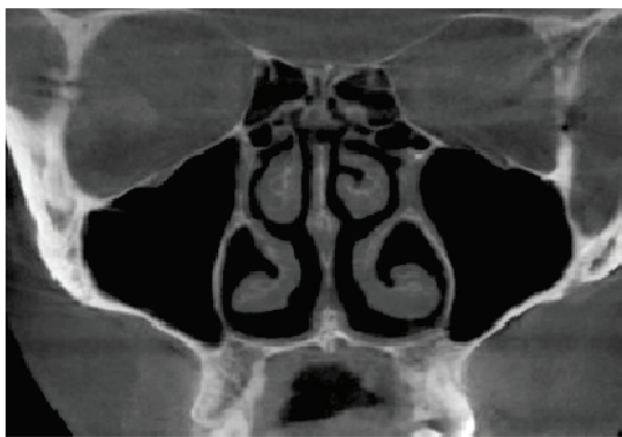


Рисунок 3 – Графіки залежності перепаду тиску від витрати повітря при диханні в нормі (1 – при диханні через правий носовий прохід за даними ПАРМ, 2 – при диханні через лівий носовий прохід за даними ПАРМ, 3 – теоретичні дані при диханні через обидва носових проходи за даними ПАРМ, 4 – при диханні через обидва носових проходи за даними ЗАРМ)



а



б

Рисунок 4 – Результати комп'ютерно-томографічного дослідження верхніх дихальних шляхів при умовній нормі (без порушення носового дихання): а – аксіальний томографічний зріз, б – мультипланарна реконструкція у фронтальній проекції

Залежність перепаду тиску від витрати повітря при правосторонньому порушенні носового дихання наведена на рисунку 5. Порушенню відповідає анатомічна конфігурація носової порожнини, що наведена на рисунку 6 з відповідними характерними аксіальним томографічним зрізом (див. рисунок 6, а) та фронтальною реконструкцією (див. рисунок 6, б). З рисунку 5 можна бачити, що за характером залежності перехід з ламінарного у турбулентний режим течії настає приблизно біля значення перепаду тиску 0,5 кПа. Максимальні витрати повітря при диханні через окремі половини носу при проведенні ПАРМ склали 0,5 та 3,5 л/с, що говорить про суттєву асиметричність потоків. Розрахункова витрата повітря при ПАРМ склала 4,5 л/с. Сумарна витрата повітря при безпосередньому вимірі по методу ЗАРМ склала 3,7 л/с, що відповідає відносній похибці 7%.

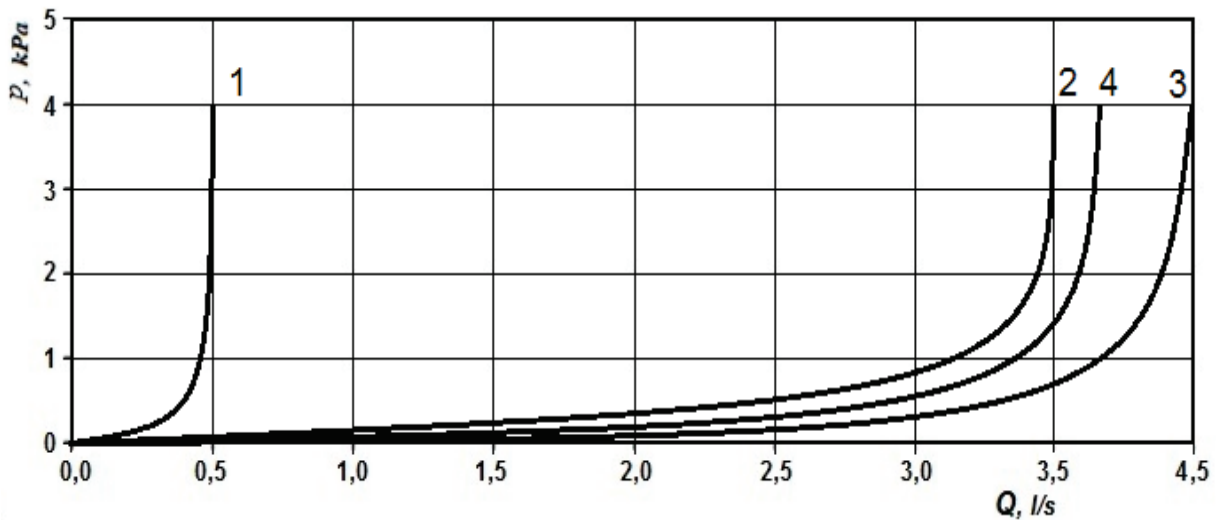


Рисунок 5 – Графіки залежності перепаду тиску від витрати повітря при односторонньому порушенні дихання (1 – при диханні через правий носовий прохід за даними ПАРМ, 2 – при диханні через лівий носовий прохід за даними ПАРМ, 3 – теоретичні дані при диханні через обидва носових проходи за даними ПАРМ, 4 – при диханні через обидва носових проходи за даними ЗАРМ)

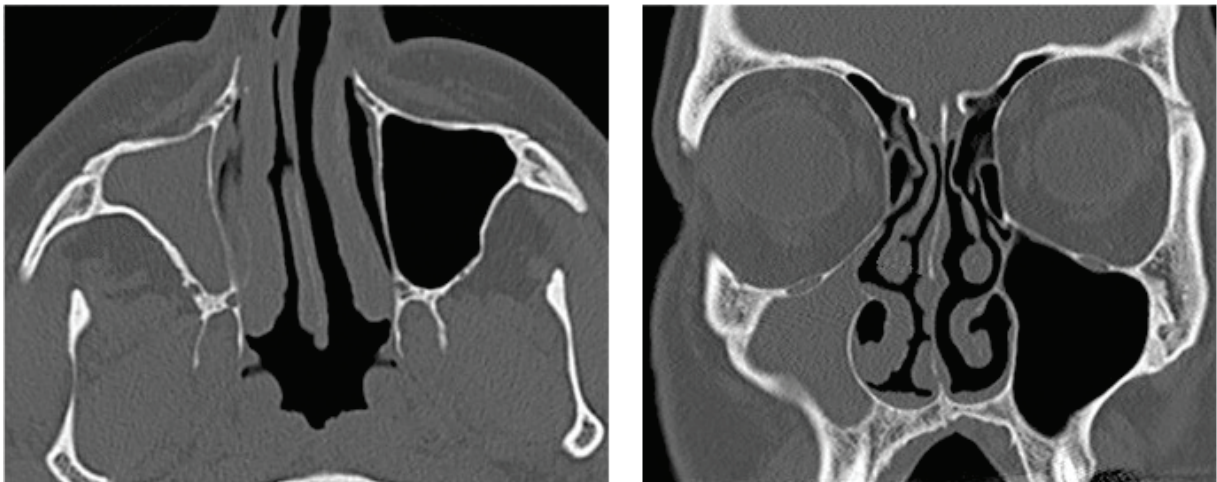


Рисунок 6 – Результати комп'ютерно-томографічного дослідження верхніх дихальних шляхів при правосторонньому порушенні носового дихання: а – аксіальний томографічний зріз, б – мультипланарна реконструкція у фронтальній проекції

Залежність перепаду тиску від витрати повітря при двосторонньому порушенні носового дихання наведена на рисунку 7. Порушенню відповідає анатомічна конфігурація носової порожнини, що наведена на рисунку 8 з відповідними характерними аксіальним томографічним зрізом (див. рисунок 8, а) та фронтальною реконструкцією (див. рис. 8, б). З рисунку 7 можна бачити, що за характером залежності перехід з ламінарного у турбулентний режим течії настає приблизно біля значення перепаду тиску 0,2 кПа. Максимальні витрати повітря при диханні через окремі половини носу при проведенні ПАРМ склали 0,12 та 0,43 л/с, що говорить про загальну недостатність повітряної провідності з суттєвою асиметричністю потоків. Розрахункова витрата повітря при ПАРМ складала 0,55 л/с. Сумарна витрата повітря при безпосередньому вимірі по методу ЗАРМ складала 0,51 л/с, що відповідає відносній похибці у 8%.

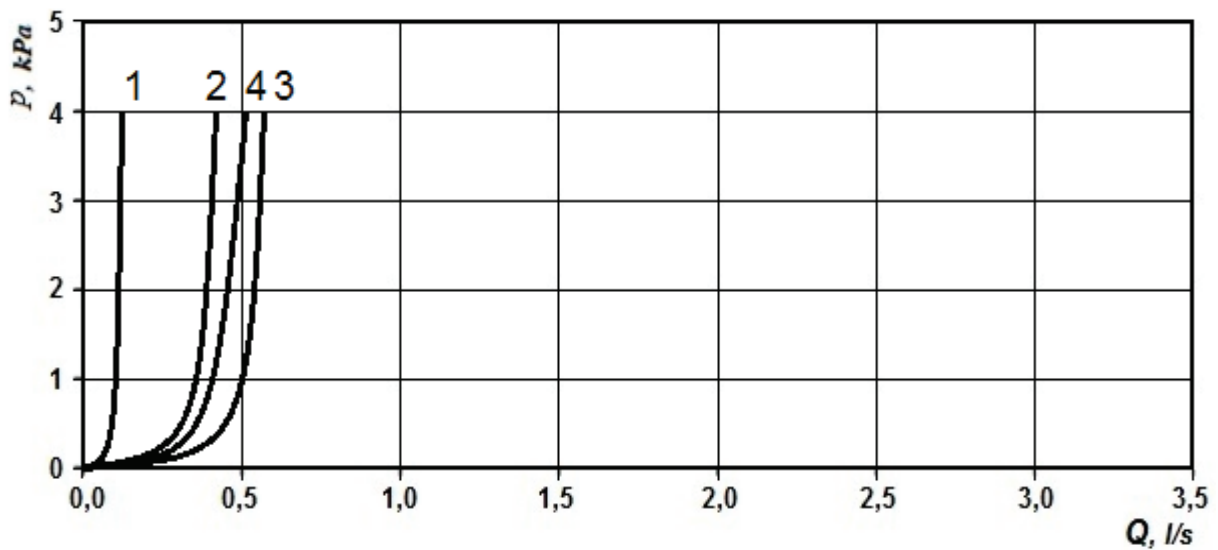


Рисунок 7 – Графіки залежності перепаду тиску від витрати повітря при двосторонньому порушенні дихання (1 – при диханні через правий носовий прохід за даними ПАРМ, 2 – при диханні через лівий носовий прохід за даними ПАРМ, 3 – теоретичні дані при диханні через обидва носових проходи за даними ПАРМ, 4 – при диханні через обидва носових проходи за даними ЗАРМ)

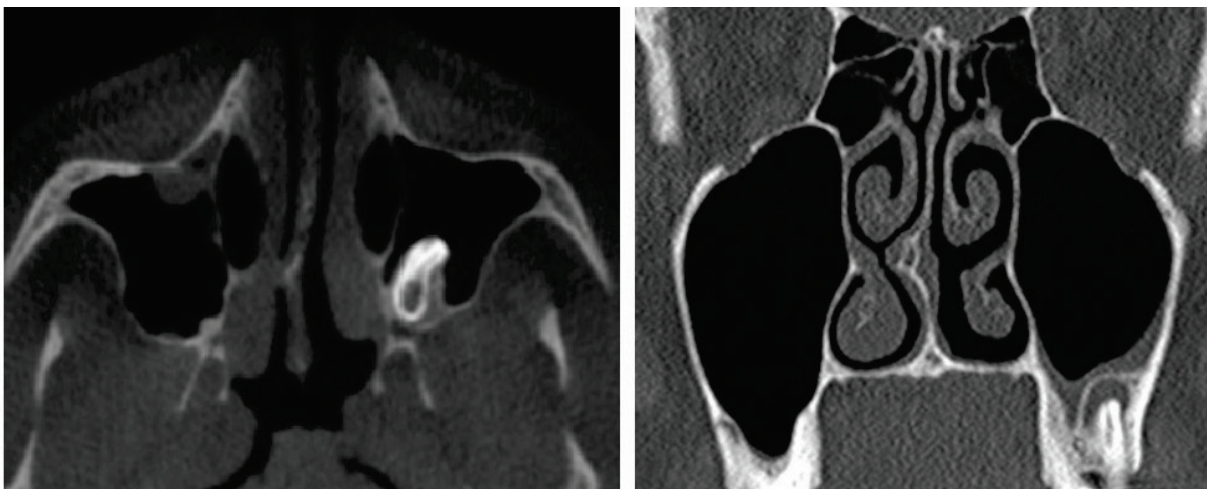


Рисунок 8 – Результати комп'ютерно-томографічного дослідження верхніх дихальних шляхів при двосторонньому порушенні носового дихання: а – аксіальний томографічний зріз, б – мультипланарна реконструкція у фронтальній проекції

Розрахункові значення максимальних коефіцієнтів аеродинамічного носового опору в ламінарному та турбулентному режимах течії повітря при відповідних перепадах тиску та витратах повітря за даними ПАРМ наведені у таблиці 1. Для спрощення інтерпретації розрахунків максимальний перепад тиску був обмежений у всіх випадках та складав 4 кПа. Значення коефіцієнтів аеродинамічних носових опорів в ламінарному $A_R^{(L)}$, $A_L^{(L)}$, $A_\Sigma^{(L)}$ та турбулентному $A_R^{(T)}$, $A_L^{(T)}$, $A_\Sigma^{(T)}$ режимах можуть суттєво відрізняються за величинами і порівнювати їх між собою для кожного носового проходу не можливо за рахунок різних механізмів виникнення втрат тиску та різних одиниць виміру, відповідно. Їх значення можуть свідчити лише про зміни назального опору повітряному потоку у відповідних режимах.

БІОМЕДИЧНІ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ ТА ПРИЛАДИ

Таблиця 1

Розрахункові значення коефіцієнтів аеродинамічного носового опору в ламінарному та турбулентному режимах течії повітря при відповідних перепадах тиску та витратах повітря за даними ПАРМ

N	Δp , кПа	Q_R , л/с	Q_L , л/с	Q_{Σ} , л/с	$A_R^{(L)}$, кПа·с/л	$A_L^{(L)}$, кПа·с/л	$A_{\Sigma}^{(L)}$, кПа·с/л	$A_R^{(T)}$, кПа·с ² /л ²	$A_L^{(T)}$, кПа·с ² /л ²	$A_{\Sigma}^{(T)}$, кПа·с ² /л ²
1	4,0	2,3	2,7	5,0	1,7	1,48	0,8	0,75	0,55	0,16
2	4,0	0,5	3,5	4,0	8,0	1,14	1,0	0,32	16	0,25
3	4,0	0,12	0,43	0,55	33,3	9,3	7,3	277	22,2	13,47

ВИСНОВКИ

Порівняльні дані щодо сумарних коефіцієнтів аеродинамічного носового опору, які отримані методами передньої та задньої активної риноманометрії, достатньо чітко кореспондуються між собою в межах 12%. Значення сумарних коефіцієнтів носового опору, що отримані методом задньої риноманометрії, у всіх характерних випадках відрізняються у меншу сторону. Такі похибки при форсованому диханні можливо пояснити компенсаторними змінами внутрішньої конфігурації носової порожнини, що дозволяє пропустити на короткий час більшу витрату повітря через одну половину носу при штучно перекритій іншій. Метод передньої активної риноманометрії дозволяє безпосередньо оцінити асиметрію повітряної провідності кожного носового проходу. Схожі результати можливо отримати при задній активній риноманометрії з почерговою штучною обтюрацією кожної половини носу. Додаткову похибку та невідповідність результатів при цьому можуть вносити структури епіфарингсу та наявність аденоїдних вегетацій, що потребує окремих досліджень. Отримані дані також можуть бути корисними для непрямого методу визначення коефіцієнту аеродинамічного носового опору за томографічними даними та оцінки його особливостей при різних режимах дихання.

Перспективою роботи є набір статистичних даних для визначення особливостей тестування носового дихання для отримання точних персоналізованих значень коефіцієнтів носового опору при різних режимах дихання з урахуванням індивідуальної варіабельності.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Сучасні методи діагностики респіраторно-ольфакторної функції: монографія / О.Г. Аврунін, Я.В. Носова, В.В. Семенець, В.О. Філатов, Н. О. Шушляпіна. Харків : ХНУРЕ, 2021. 150 с.
2. Аврунін О.Г., Бодяньський Є.В., Калашник М.В., Семенець В.В., Філатов В.О. Сучасні інтелектуальні технології функціональної медичної діагностики – Харків: ХНУРЕ, 2018. – 248 с. doi: 10.30837/978-966-659-234-0.
3. Avrunin, O. G., Nosova, Y. V., Paliy, V. G., Shushlyapina, N. O., Kalimoldayev, M., Komada, P., & Sagymbekova, A. Study of the air flow mode in the nasal cavity during a forced breath. In *Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments 2017* (Vol. 10445, p. 104453H). International Society for Optics and Photonics. (2017).
4. Avrunin, O., Shushlyapina, N., Nosova, Y., Bogdan, O. (2016), "Olfactometry diagnostic at the modern stage", *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies, NTU "KhPI", Kharkiv*, No. 12 (1184), pp. 95-100, DOI: 10.20998/2413- 4295.2016.12.13
5. Аврунін О.Г., Бодяньський Є.В., Семенець В.В., Філатов В.О., Шушляпіна Н. О. Інформаційні технології підтримки прийняття рішень при визначенні порушень носового дихання. Харків: ХНУРЕ, 2018. 132 с. URL: <https://doi.org/10.30837/978-966-659-235-7>.
6. Аврунін О. Г. Методы и средства функциональной диагностики внешнего дыхания / О.Г. Аврунін, Р. С. Томашевский, Х. И. Фарук. – Харьков: ХНАДУ, 2015. – 208 с.
7. Аврунін О. Г. Определение степени инвазивности хирургического доступа при компьютерном планировании оперативных вмешательств / О. Г. Аврунін, М. Ю. Тымкович., Х. Фарук. *Бионика интеллекта*. 2013. № 2 (81). С. 101–104.
8. Ismail H.F., Osman E., AL-Omari A.K., Avrunin O.G. The Role of Paranasal Sinuses in the Aerodynamics of the Nasal Cavities. *International Journal of Life Science and Medical Research*, 2012, 2, 3, 52-55, doi:10.5963/LSMR0203004

9. Wang De Yun. Impacts of Fluid Dynamics Simulation in Study of Nasal Airflow Physiology and Pathophysiology in Realistic Human Three-Dimensional Nose Models/ De Yun Wang, Heow Peuh Lee, Bruce R. Gordon// *Clinical and Experimental Otorhinolaryngology*.– 2012.– Vol. 5, № 4.– P. 181-187.
10. Correlation of nasal morphology and respiratory function / G. Mlynski, S. Grutzenmacher, S. Plontke et al.// *Rhinology*.– 2001. *Rhinology*. – № 39(4). *Rhinology*. – 197-201.
11. Dynamic Analysis of Airflow Features in a 3D Real-Anatomical Geometry of the Human Nasal Cavity / H. Tang, J. Y. Tu, H. F. Li et al. // 15th Australasian Fluid Mechanics conference the University of Sydney, Australia.– 2004.– P. 80-83.
12. Morphological Variation and Airflow Dynamics in the Human Nose / S. E. Churchill, L. L. Shackelford, J. N. Black, M. T. Black // *Am. J. OfHum. Biol.*– 2004. – № 16. – P. 625-638.
13. Radulesco, T., Meister, L., Bouchet, G., Varoquaux, A., Giordano, J., Mancini, J., Michel, J. (2019). Correlations between computational fluid dynamics and clinical evaluation of nasal airway obstruction due to septal deviation: An observational study. *Clinical Otolaryngology*, 44(4), 603-611. doi:10.1111/coa.13344
14. Paul, M. A., Kamali, P., Chen, A. D., Ibrahim, A. M. S., Wu, W., Becherer, B. E., Lin, S. J. (2018). Assessment of functional rhinoplasty with spreader grafting using acoustic rhinomanometry and validated outcome measurements. *Plastic and Reconstructive Surgery - Global Open*, 6(3) doi:10.1097/GOX.0000000000001615
15. Brüning, J., Hildebrandt, T., Heppt, W., Schmidt, N., Lamecker, H., Szengel, A., Goubergrits, L. (2020). Characterization of the airflow within an average geometry of the healthy human nasal cavity. *ScientificReports*, 10(1) doi:10.1038/s41598-020-60755-3
16. Naughton, J. P., Lee, A. Y., Ramos, E., Wootton, D., & Stupak, H. D. (2018). Effect of nasal valve shape on downstream volume, airflow, and pressure drop: Importance of the nasal valve revisited. *Annals of Otolaryngology and Laryngology*, 127(11), 745-753. doi:10.1177/0003489418791597
17. Tymkovich M. et al. (2021) Application of SOFA Framework for Physics-Based Simulation of Deformable Human Anatomy of Nasal Cavity. In: Jarm T., Cvetkoska A., Mahnič, Kalamiza S., Miklavcic D. (eds) 8th European Medical and Biological Engineering Conference. EMBEC 2020. IFMBE Proceedings, Vol 80. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-64610-3_14
18. Avrunin, O. G., Nosova, Y. V., Abdelhamid, I. Y., Pavlov, S. V., Shushliapina, N. O., Wójcik, W., Kalizhanova, A. (2021). Possibilities of automated diagnostics of odontogenic sinusitis according to the computer tomography data. *Sensors (Switzerland)*, 21(4), 1-22. doi:10.3390/s21041198
19. Avrunin, O., Mustetsova, O., Tymchik, S., Khudaieva, S., Homolinskyi, V. O., Omiotek, Z., & Syzdykpayeva, A. (2019). Possibility of determining the cause of the snore by instrumental methods. Paper presented at the Proceedings of SPIE - the International Society for Optical Engineering, , 11176 doi:10.1117/12.2536418
20. Hsu, Y., Liu, S. Y., Lan, M., Huang, Y., Tzeng, I., & Lan, M. (2020). Role of rhinomanometry in the prediction of therapeutic positive airway pressure for obstructive sleep apnea. *Respiratory Research*, 21(1) doi:10.1186/s12931-020-01382-4
21. Valtonen, O., Ormiskangas, J., Kivekäs, I., Rantanen, V., Dean, M., Poe, D., Rautiainen, M. (2020). Three-dimensional printing of the nasal cavities for clinical experiments. *ScientificReports*, 10(1) doi:10.1038/s41598-020-57537-2
22. Avrunin, O. G., Tymkovich, M. Y., Saed, H. F. I., Loburets, A. V., Krivoruchko, I. A., Smolarz, A., & Kalimoldayeva, S. (2019). Application of 3D printing technologies in building patient-specific training systems for computing planning in rhinology. Paper presented at the Information Technology in Medical Diagnostics II - Proceedings of the International Scientific Internet Conference on Computer Graphics and Image Processing and 48th International Scientific and Practical Conference on Application of Lasers in Medicine and Biology, 2018, 1-8. doi:10.1201/9780429057618-1
23. Clement, P. A. Standardisation Committee on Objective Assessment of the Nasal Airway. Consensus report on 2005. – № 43. – P. 169–179.
24. Cole P. Contemporary rhinomanometry / P. Cole, R. Fenton // *J Otolaryngol.*– 2006. – № 35(2). – P. – 83-87.
25. Cilluffo, G., Zicari, A. M., Ferrante, G., Malizia, V., Fasola, S., Duse, M., La Grutta, S. (2020). Assessing repeatability and reproducibility of anterior active rhinomanometry (AAR) in children. *BMC Medical Research Methodology*, 20(1) doi:10.1186/s12874-020-00969-1
26. Vogt, K. 4-Phase-Rhinomanometry Basics and Practice / K. Vogt, A. A. Jalowayski // *Rhinology*. – 2010. – № 21. – P. 1–50.
27. Аврунин О.Г. Обоснование основных медико-технических требований для проектирования многофункционального риноманометра / О.Г. Аврунин, А.И. Бых, В.В. Семенец // *Функциональная компонентная база микро-, опто и наноэлектроники: сб. науч. тр. III Междунар. науч. конф., 28 сент. – 2 окт. 2010 г. – Х.; Кацивели: ХНУРЭ, 2010. – С. 280–281.*

28. Avrunin, O.G.; Nosova, Y.V.; Abdelhamid, I.Y.; Pavlov, S.V.; Shushlyapina, N.O.; Bouhlal, N.A.; Ormanbekova, A.; Iskakova, A.; Harasim, D. Research Active Posterior Rhinomanometry Tomography Method for Nasal Breathing Determining Violations. *Sensors* 2021, 21, 8508. <https://doi.org/10.3390/s21248508>.
29. Paul, M. A., Kamali, P., Chen, A. D., Ibrahim, A. M. S., Wu, W., Becherer, B. E., Lin, S. J. (2018). Assessment of functional rhinoplasty with spreader grafting using acoustic rhinomanometry and validated outcome measurements. *Plastic and Reconstructive Surgery - Global Open*, 6(3) doi:10.1097/GOX.0000000000001615.
30. Cankurtaran M. Acoustic rhinometry in healthy humans: accuracy of area estimates and ability to quantify certain anatomic structures in the nasal cavity / M. Cankurtaran, H. Celik, M. Coekun et al. // *Ann Otol. Rhinol. Laryngol.* – 2007. – № 116 (12). – P. 906-916.
31. Wójcik, W., Smolarz, A., “Information Technology in Medical Diagnostics,” London, Taylor & Francis Group CRC Press Reference, p. 210 (2017).
32. Vassilenko, V., Valtchev, S., Teixeira, J.P., Pavlov, S., “Energy harvesting: an interesting topic for education programs in engineering specialities,” *Internet Education Science IES*, 149-156 (2016).
33. Pavlov, S.V., Kozhemiako, V.P., Kolesnik, P.F., “Physical principles of biomedical optics,” monograph, Vinnytsya: VNTU, p.152 (2010).
34. Pavlov, S.V., Kozhemiako, V.P., Petruk, V.G., Kolesnik, P.F., “Photoplethysmographic technologies of the cardiovascular control,” *Vinnitsa: Universum-Vinnitsa*, p. 254 (2007).
35. Wójcik, W., Pavlov, S., Kalimoldayev, M., “Information Technology in Medical Diagnostics II,” London: Taylor & Francis Group, CRC Press, Balkema book, p. 336 (2019).
36. Pavlov, S.V., Kozhukhar, A. T., “Electro-optical system for the automated selection of dental implants according to their colour matching,” *Przegląd elektrotechniczny*, R. 93 NR 3, 121-124 (2017).

REFERENCES

1. Suchasni metody diahnozyky respiratorno-ol'faktornoji funktsiyi: monohrafiya / O.G. Avrunin, YA.V. Nosova, V.V. Semenets, V.O. Filatov, N. O. Shushlyapina. Kharkiv :KHNURE, 2021. 150 c.
2. Avrunin O.H., Bodyanskyi E.V., Kalashnyk M.V., Semenets V.V., Filatov V.O. Modern intellectual technologies of functional medical diagnostics - Kharkiv: KhNURE, 2018. – 248 c. doi: 10.30837/978-966-659-234-0.
3. Avrunin, O. G., Nosova, Y. V., Paliy, V. G., Shushlyapina, N. O., Kalimoldayev, M., Komada, P., & Sagymbekova, A. Study of the air flow mode in the nasal cavity during a forced breath. In *Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments 2017* (Vol. 10445, p. 104453H). International Society for Optics and Photonics. (2017).
4. Avrunin, O., Shushlyapina, N., Nosova, Y., Bogdan, O. (2016), "Olfactometry diagnostic at the modern stage", *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*, NTU "KhPI", Kharkiv, No. 12 (1184), pp. 95-100, DOI: 10.20998/2413- 4295.2016.12.13
5. Avrunin O.H., Bodyans'kyy YE.V., Semenets' V.V., Filatov V.O., Shushlyapina N. O. Informatsiyi tekhnolohiy i pidtrymky pryynyattya rishen' pry vyznachenni porushen' nosovoho dykhannya. Kharkiv: KHNURE, 2018. 132 c. URL: <https://doi.org/10.30837/978-966-659-235-7>
6. Avrunin O. G. Metody I sredstva funktsional'noy diagnostiki vneshnego dykhaniya / O.G. Avrunin, R. S. Tomashevskiy, KH. I. Faruk. – Khar'kov: KHNADU, 2015. – 208 c.
7. Avrunin O. G. Opredeleniye stepeni invazivnosti khirurgicheskogo dostupa pri komp'yuternom planirovaniy operativnykh vmeshatel'stv / O. G. Avrunin, M. YU. Tymkovich., KH. Faruk. *Bionikaintellekta*. 2013. № 2 (81). C. 101–104.
8. Ismail H.F., Osman E., AL-Omari A.K., Avrunin O.G. The Role of Paranasal Sinuses in the Aerodynamics of the Nasal Cavities. *International Journal of Life Science and Medical Research*, 2012, 2, 3, 52--55, doi:10.5963/LSMR0203004
9. Wang De Yun. Impacts of Fluid Dynamics Simulation in Study of Nasal Airflow Physiology and Pathophysiology in Realistic Human Three-Dimensional Nose Models/ De Yun Wang, HeowPeuhLee, Bruce R. Gordon// *Clinical and Experimental Otorhinolaryngology*.– 2012.– Vol. 5, № 4.– P. 181-187.
10. Correlation of nasal morphology and respiratory function / G.Mlynski, S. Grutzenmacher, S. Plontke et al.// *Rhinology*.– 2001. *Rhinology*.– № 39(4). *Rhinology*. – 197-201.
11. Dynamic Analysis of Airflow Features in a 3D Real-Anatomical Geometry of the Human Nasal Cavity / H. Tang, J. Y. Tu, H. F. Li et al. // 15th Australasian Fluid Mechanics conference the University of Sydney, Australia.– 2004.– P. 80-83.

12. Morphological Variation and Airflow Dynamics in the Human Nose / S. E. Churchill, L. L. Shackelford, J. N. Black, M. T. Black // *Am. J. Of Hum. Biol.*– 2004. – № 16. – P. 625-638.
13. Radulesco, T., Meister, L., Bouchet, G., Varoquaux, A., Giordano, J., Mancini, J., Michel, J. (2019). Correlations between computational fluid dynamics and clinical evaluation of nasal airway obstruction due to septal deviation: An observational study. *Clinical Otolaryngology*, 44(4), 603-611. doi:10.1111/coa.13344
14. Paul, M. A., Kamali, P., Chen, A. D., Ibrahim, A. M. S., Wu, W., Becherer, B. E., Lin, S. J. (2018). Assessment of functional rhinoplasty with spreader grafting using acoustic rhinomanometry and validated outcome measurements. *Plastic and Reconstructive Surgery - Global Open*, 6(3) doi:10.1097/GOX.0000000000001615
15. Brüning, J., Hildebrandt, T., Heppt, W., Schmidt, N., Lamecker, H., Szengel, A., Goubergrits, L. (2020). Characterization of the airflow within an average geometry of the healthy human nasal cavity. *Scientific Reports*, 10(1) doi:10.1038/s41598-020-60755-3
16. Naughton, J. P., Lee, A. Y., Ramos, E., Wootton, D., & Stupak, H. D. (2018). Effect of nasal valve shape on downstream volume, airflow, and pressure drop: Importance of the nasal valve revisited. *Annals of Otolaryngology, Rhinology and Laryngology*, 127(11), 745-753. doi:10.1177/0003489418791597
17. Tymkovich M. et al. (2021) Application of SOFA Framework for Physics-Based Simulation of Deformable Human Anatomy of Nasal Cavity. In: Jarm T., Cvetkoska A., Mahnič Kalamiza S., Miklavcic D. (eds) 8th European Medical and Biological Engineering Conference. EMBEC 2020. IFMBE Proceedings, vol 80. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-64610-3_14
18. Avrunin, O. G., Nosova, Y. V., Abdelhamid, I. Y., Pavlov, S. V., Shushliapina, N. O., Wójcik, W., Kalizhanova, A. (2021). Possibilities of automated diagnostics of odontogenic sinusitis according to the computer tomography data. *Sensors (Switzerland)*, 21(4), 1-22. doi:10.3390/s21041198
19. Avrunin, O., Mustetsova, O., Tymchik, S., Khudaieva, S., Homolinskyi, V. O., Omiotek, Z., & Syzdykpayeva, A. (2019). Possibility of determining the cause of the snore by instrumental methods. Paper presented at the Proceedings of SPIE - the International Society for Optical Engineering, , 11176 doi:10.1117/12.2536418
20. Hsu, Y., Liu, S. Y., Lan, M., Huang, Y., Tzeng, I., & Lan, M. (2020). Role of rhinomanometry in the prediction of therapeutic positive airway pressure for obstructive sleep apnea. *Respiratory Research*, 21(1) doi:10.1186/s12931-020-01382-4
21. Valtonen, O., Ormiskangas, J., Kivekäs, I., Rantanen, V., Dean, M., Poe, D., Rautiainen, M. (2020). Three-dimensional printing of the nasal cavities for clinical experiments. *Scientific Reports*, 10(1) doi:10.1038/s41598-020-57537-2
22. Avrunin, O. G., Tymkovich, M. Y., Saed, H. F. I., Loburets, A. V., Krivoruchko, I. A., Smolarz, A., & Kalimoldayeva, S. (2019). Application of 3D printing technologies in building patient-specific training systems for computing planning in rhinology. Paper presented at the Information Technology in Medical Diagnostics II - Proceedings of the International Scientific Internet Conference on Computer Graphics and Image Processing and 48th International Scientific and Practical Conference on Application of Lasers in Medicine and Biology, 2018, 1-8. doi:10.1201/9780429057618-1
23. Clement, P. A. Standardisation Committee on Objective Assessment of the Nasal Airway. Consensus report on 2005. – № 43. – P. 169–179.
24. Cole P. Contemporary rhinomanometry / P. Cole, R. Fenton // *J Otolaryngol.*– 2006. – № 35(2). – P. – 83-87.
25. Cilluffo, G., Zicari, A. M., Ferrante, G., Malizia, V., Fasola, S., Duse, M., La Grutta, S. (2020). Assessing repeatability and reproducibility of anterior active rhinomanometry (AAR) in children. *BMC Medical Research Methodology*, 20(1) doi:10.1186/s12874-020-00969-1
26. Vogt, K. 4-Phase-Rhinomanometry Basics and Practice / K. Vogt, A. A. Jalowayski // *Rhinology.* – 2010. – № 21. – P. 1–50.
27. Avrunin O.G. Obosnovaniye osnovnykh mediko-tehnicheskikh trebovaniy dlya proyektirovaniya mnogofunktional'nogo rinomanometra / O.G. Avrunin, A.I. Bykh, V.V. Semenets. // *Funktional'naya komponentnaya baza mikro-, opto i nanoelektroniki: sb. nauch. tr. III Mezhdunar. nauch. konf.*, 28 sent. – 2 okt. 2010 g. – KH.;Katsiveli: KHNURE, 2010. – C. 280–281.
28. Avrunin, O.G.; Nosova, Y.V.; Abdelhamid, I.Y.; Pavlov, S.V.; Shushliapina, N.O.; Bouhlal, N.A.; Ormanbekova, A.; Iskakova, A.; Harasim, D. Research Active Posterior Rhinomanometry Tomography Method for Nasal Breathing Determining Violations. *Sensors* 2021, 21, 8508. <https://doi.org/10.3390/s21248508>.
29. Paul, M. A., Kamali, P., Chen, A. D., Ibrahim, A. M. S., Wu, W., Becherer, B. E., Lin, S. J. (2018). Assessment of functional rhinoplasty with spreader grafting using acoustic rhinomanometry and validated outcome measurements. *Plastic and Reconstructive Surgery - Global Open*, 6(3) doi:10.1097/GOX.0000000000001615.

30. Cankurtaran M. Acoustic rhinometry in healthy humans: accuracy of area estimates and ability to quantify certain anatomic structures in the nasal cavity / M. Cankurtaran, H. Celik, M. Coekun et al. // Ann Otol. Rhinol. Laryngol. – 2007. – № 116 (12). – P. 906-916.
31. Wójcik, W., Smolarz, A., “Information Technology in Medical Diagnostics,” London, Taylor & Francis Group CRC Press Reference, p. 210 (2017).
32. Vassilenko, V., Valtchev, S., Teixeira, J.P., Pavlov, S., “Energy harvesting: an interesting topic for education programs in engineering specialities,” Internet Education Science IES, 149-156 (2016).
33. Pavlov, S.V., Kozhemiako, V.P., Kolesnik, P.F., “Physical principles of biomedical optics,” monograph, Vinnytsya: VNTU, p.152 (2010).
34. Pavlov, S.V., Kozhemiako, V.P., Petruk, V.G., Kolesnik, P.F., “Photoplethysmographic technologies of the cardiovascular control,” Vinnitsa: Universum-Vinnitsa, p. 254 (2007).
35. Wójcik, W., Pavlov, S., Kalimoldayev, M., “Information Technology in Medical Diagnostics II,” London: Taylor & Francis Group, CRC Press, Balkema book, p. 336 (2019).
36. Pavlov, S.V., Kozhukhar, A. T., “Electro-optical system for the automated selection of dental implants according to their colour matching,” Przegląd elektrotechniczny, R. 93 NR 3, 121-124 (2017).

Надійшла до редакції 8.02.2022р.

ІБРАГІМ ЮНУСС АБДЕЛХАМІД – аспірант кафедри біомедичної інженерії Харківського національного університету радіоелектроніки, Харків, Україна,
e-mail: ibrahim.younouss.abdelhamid@nure.ua

НОСОВА ЯНА ВІТАЛІЇВНА – к.т.н., старший викладач кафедри біомедичної інженерії Харківського національного університету радіоелектроніки, Харків, Україна, ***e-mail: tatyana.nosova@nure.ua***

АВРУНІН ОЛЕГ ГРИГОРОВИЧ – д.т.н., професор, завідувач кафедри біомедичної інженерії Харківського національного університету радіоелектроніки, Харків, Україна,
e-mail: oleh.avrunin@nure.ua

ПРИСИЧ ОЛЕНА ЮРІЇВНА, аспірант кафедри мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв Харківського національного університету радіоелектроніки, Харків, Україна,
e-mail: olena.prisych@nure.ua

АЛЮФІ БАНДЕР АЛІ САЛЕХ – інженер-консультант, Університет Умм-Аль-Кура, Мекка, Саудівська Аравія, ***e-mail: Aqariyat11@yahoo.com***