

УДК 615.47

Я.В. НОСОВА, О.Г. АВРУНІН, Н.О. ШУШЛЯПИНА,  
ІБРАГІМ ЮНУСС АБДЕЛХАМІД, АЛОФІ БАНДЕР АЛІ САЄД

## ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ МАТЕМАТИЧНИХ ТА НАТУРНИХ МОДЕЛЕЙ ПРИ ВИЗНАЧЕННІ КОЕФІЦІЄНТУ АЕРОДИНАМІЧНОГО НОСОВОГО ОПОРУ

*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, Саудовська Аравія*

**Анотація.** В роботі виконано порівняльний аналіз математичних та натурних моделей при визначенні коефіцієнту аеродинамічного носового опору. Метою роботи є оцінювання адекватності математичних та натурних моделей при визначенні коефіцієнту аеродинамічного носового опору для оцінки можливостей розробки підходу комп'ютерного планування ринохірургічних втручань на основі дослідження геометричних та функціональних характеристик реальних персоналізованих моделей внутрішньої структури верхніх дихальних шляхів за діагностичними даними комп'ютерної томографії. За результатами експериментальних випробувань натурної моделі, яка отримувється методом 3D друку можливо розрахувати значення коефіцієнта аеродинамічного носового опору за рахунок отримання значень перепаду тиску – сумарних втрат при відповідних заданих показниках витрати повітря. Розбіжність значень коефіцієнтів аеродинамічного носового опору при цьому не перевищувала 15% та пояснюється методичними помилками, що пов'язані з підходами при розрахунках аеродинамічної моделі носової порожнини, зокрема неможливістю урахування всіх локальних порушень та їх взаємовпливу, та властивостями пластикової поверхні повітряних каналів натурної моделі при експериментальних випробуваннях.

**Ключові слова:** дихання носове, аеродинаміка вдиху, витрата повітря, перепад тиску, модель натурна, риноманометрія

**Аннотация.** В работе выполнен сравнительный анализ математических и натуральных моделей при определении аэродинамического коэффициента носового сопротивления. Целью работы является оценка адекватности математических и натуральных моделей при определении коэффициента аэродинамического носового сопротивления для оценки возможностей разработки подхода компьютерного планирования ринохирургических вмешательств на основе исследования геометрических и функциональных характеристик реальных персонализированных моделей внутренней структуры верхних дыхательных путей по диагностическим данным компьютерной томографии. По результатам экспериментальных испытаний натурной модели, получаемой методом 3D печати, можно рассчитать значение коэффициента аэродинамического носового сопротивления за счет получения значений перепада давления – суммарных потерь при соответствующих заданных показателях расхода воздуха. Расхождение значений коэффициентов аэродинамического носового сопротивления при этом не превышало 15% и объясняется методическими ошибками, связанными с подходами при расчетах аэродинамической модели носовой полости, в частности невозможностью учета всех локальных нарушений и их взаимовлияния, и свойствами пластиковой поверхности воздушных каналов натурной модели при экспериментальных испытаниях.

**Ключевые слова:** дыхание носовое, аэродинамика вдоха, расход воздуха, перепад давления, модель натурная, риноманометрия

**Abstract.** The paper presents a comparative analysis of mathematical and full-scale models in determining the aerodynamic nose drag coefficient. The aim of the work is to assess the adequacy of mathematical and natural models in determining the aerodynamic nose drag coefficient to assess the possibilities of developing an approach for computer planning of rhinosurgical interventions based on the study of the geometric and functional characteristics of real personalized models of the internal structure of the upper respiratory tract according to the diagnostic data of computed tomography. According to the results of experimental tests of a full-scale model obtained by 3D printing, it is possible to calculate the value of the aerodynamic nose drag coefficient by obtaining the pressure drop values - total losses for the corresponding given air flow rates. The discrepancy between the values of the aerodynamic nose drag coefficients in this case did not exceed 15% and is explained by methodological errors associated with the approaches in calculating the aerodynamic model of the nasal cavity, in particular, the impossibility of taking into account all local disturbances and their mutual influence, and the properties of the plastic surface of the air channels of the full-scale model during experimental tests.

**Key words:** nasal breathing, inhalation aerodynamics, air flow, pressure drop, full-scale model, rhinomanometry

**DOI:**10.31649/1681-7893-2021-42-2-33-43

### ВСТУП

Технології швидкого прототипування дозволяють забезпечити важливий та новий якісний результат у більшості медичних галузей, особливо в імплантології та при плануванні хірургічних втручань. Порівняно короткочасний і досить точний процес виготовлення натурних моделей медичного призначення дозволяють сучасні походи швидкого прототипування та, в першу чергу, методи екструзійного 3D-друку, що набуло найбільшого поширення в останні роки [1, 2].

Історично технології високоточного планування хірургічних втручань, наприклад, у стереотаксичній нейрохірургії, розвивалися завдяки використанню спеціалізованих фантомів – спрощених моделей голови пацієнта, на яких передопераційно відпрацьовувалися оперативні прийоми прецизійного наведення хірургічного інструменту на потрібну область усередині мозку [3,4]. Сучасні засоби інтроскопії і 3D друку дозволяють персоналізувати процес виготовлення таких фантомів з урахуванням індивідуальної варіабельності за даними комп'ютерної томографії [5, 6]. Такі підходи також є актуальними при моделюванні закриття черепних дефектів для виготовлення натурального прототипу кісткового імплантату [7]. У задачах конфігураційного планування функціональних ринохірургічних операцій також доцільним є натурна візуалізація та моделювання динамічної зміни геометричних характеристик анатомічних структур операційної області [8, 9]. Крім того, натурні моделі можуть використовуватись для прогнозування функціонального результату операції та передопераційної перевірки прийнятих рішень за допомогою випробувань на спеціальних аеродинамічних стендах.

**Метою роботи** є оцінювання адекватності математичних та натурних моделей при визначенні коефіцієнту аеродинамічного носового опору для оцінки можливостей розробки підходу комп'ютерного планування ринохірургічних втручань на основі дослідження геометричних та функціональних характеристик реальних персоніфікованих моделей внутрішньої структури верхніх дихальних шляхів за діагностичними даними комп'ютерної томографії.

### МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Вихідними даними для проведених досліджень були набори зображень томографічних зрізів, отриманих за допомогою спірального рентгенівського томографа SOMATOM + фірми SIEMENS (Німеччина). Обстеження пацієнтів проводилися в діагностичному центрі Харківської обласної клінічної лікарні (ХОКБ). Спочатку зображення зберігаються в форматі DICOM [11], перетворюються за допомогою стандартної утиліти DICOM\_IMAGE в растровий формат BMP (Windows bitmap) з розміром  $512 \times 512$  (x × y) і 8-ми бітових поданням рівнів інтенсивності. Попередню обробку томографічних зображень робили методом медіанної фільтрації [12, 13] для усунення можливих завад у вигляді імпульсного шуму. Також для контролю проводилися риноманометричні дослідження пацієнтів за допомогою пристрою для тестування носового дихання на основі сертифікованого блоку перепадно-витратних характеристик ТНДА-ПВХ [14] із застосуванням вимірювань по типу задньої активної риноманометрії при форсованому режимі дихання.

**РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ АЕРОДИНАМІКИ НОСОВОЇ ПОРОЖНИНИ**

Визначення коефіцієнту аеродинамічного носового опору засновувалась на математичній моделі одномірної течії повітря в носовій порожнині. Вихідні дані – набори томографічних зрізів (див. рисунок 1) сегментувалися для отримання повітряних шляхів пороговим методом за рівнем інтенсивності, що відповідає повітрю в одиницях  $Hu$  за шкалою Хаунсфілда при виборі м'якотканинного вікна візуалізації [12, 13]. Далі проводилося визначення контурів отриманої анатомічної конфігурації з їх послідуною скелитизацією границь для усунення зайвих елементів, які можуть невірно враховуватись при геометричних розрахунках. Приклад сегментованої моделі носової порожнини наведено на рисунку 2.

Визначення теоретичного коефіцієнту аеродинамічного опору носової порожнини засновано на припущеннях, що повітряні шляхи носа розглядаються як два паралельних канали. Загальна витрата повітря при цьому представляє суму витрат через лівий  $Q_L$  і правий  $Q_R$  носові канали, відповідно

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

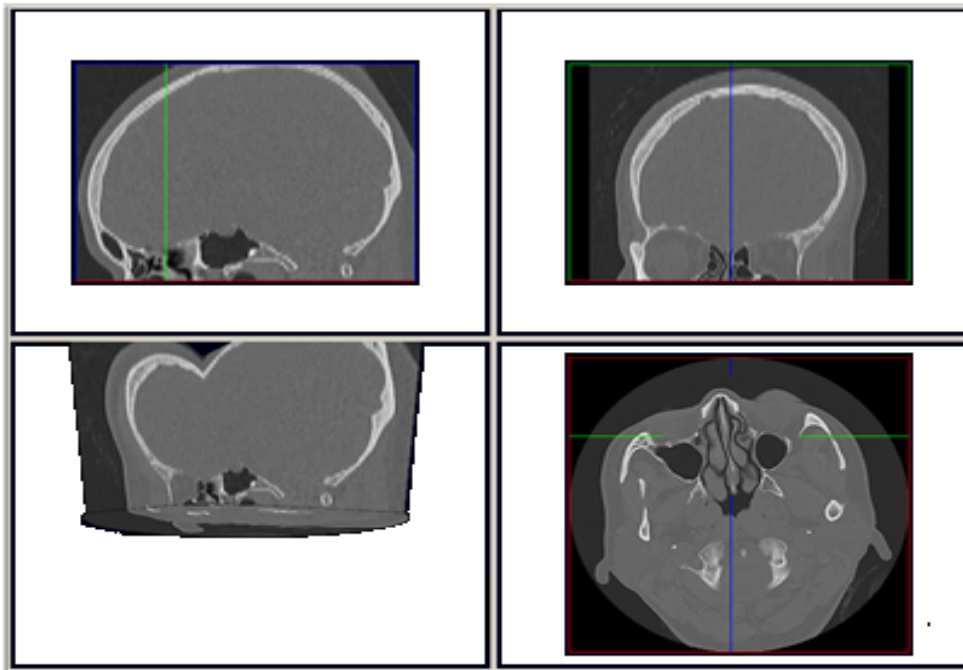


Рисунок1 – Ілюстрація підготовки даних до спіральної комп'ютерної томографії для сегментації структур носової порожнини в різних проекціях візуалізації.

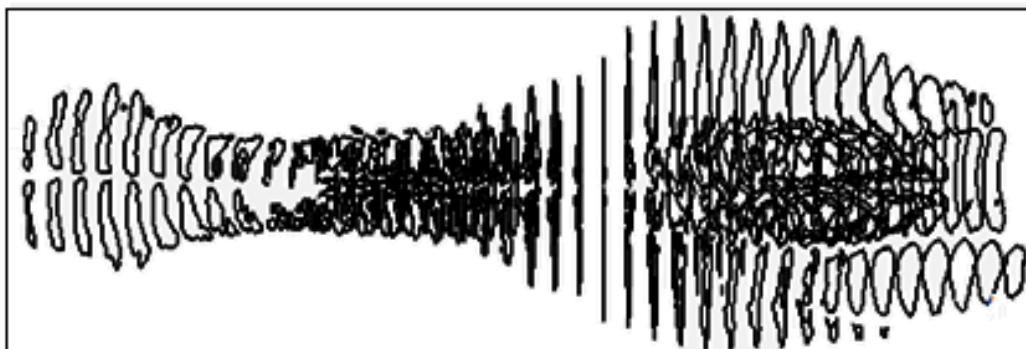


Рисунок 2 – Сегментована модель носової порожнини

## БІОМЕДИЧНІ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ ТА ПРИБЛАДИ

а перепади тисків і для лівого  $\Delta p_L$  і правого  $\Delta p_R$  носових каналів однакові

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

При цьому, носова порожнина розділяється на перетини, які перпендикулярні течії повітря, а сумарні втрати тиску за довжиною (*l-length*)  $\sum \Delta p_{l_L}$  і  $\sum \Delta p_{l_R}$  і на місцевих (*r-regional*)  $\sum \Delta p_{r_L}$  і  $\sum \Delta p_{r_R}$  є сумами цих опорів в кожному перетині. Тому, у відповідність з виразом (1) перепади тиску через кожний носовий прохід будуть визначатися за наступними формулами [15, 16]

$$\Delta p_L = \sum \Delta p_{l_L} + \sum \Delta p_{r_L} = \sum \lambda_L \cdot \rho \frac{L_L}{d_{h_L}} \frac{Q_L^2}{2S_L^2} + \sum \xi_L \cdot \rho \frac{Q_L^2}{2S_L^2} = Q_L^2 A_L, \quad (3)$$

$$\Delta p_R = \sum \Delta p_{l_R} + \sum \Delta p_{r_R} = \sum \lambda_R \cdot \rho \frac{L_R}{d_{h_R}} \frac{Q_R^2}{2S_R^2} + \sum \xi_R \cdot \rho \frac{Q_R^2}{2S_R^2} = Q_R^2 A_R, \quad (4)$$

де  $\lambda_L, \lambda_R$  – коефіцієнти Дарсі (втрат тиску за довжиною) для лівого і правого носових проходів, відповідно;

$\xi_L, \xi_R$  – коефіцієнти місцевих опорів для лівого і правого носових проходів, відповідно;

$L_L, L_R$  – довжини лівого і правого носових проходів, відповідно;

$Q_L, Q_R$  – витрати повітря через лівий і правий носові проходи, відповідно;

$\rho$  – густина повітря;

$d_{h_L}, d_{h_R}$  – гідравлічні (еквівалентні) діаметри лівого і правого носових проходів, відповідно, які виражаються для кожного перетину лівого та правого носового каналу з площинами  $S_L, S_R$  та  $P_L, P_R$  периметрами, відповідно, згідно з формулами

$$d_{h_L} = \frac{4S_L}{P_L}; \quad d_{h_R} = \frac{4S_R}{P_R}; \quad (5)$$

$A_L, A_R$  – коефіцієнти аеродинамічного носового опору для лівого і правого носових каналів, які із формул (3), (4) та (5) визначаються як

$$A_L = \sum \lambda_L \cdot \rho \frac{L_L}{d_{h_L} \cdot 2S_L^2} + \sum \xi_L \cdot \rho \frac{1}{2S_L^2}; \quad (6)$$

$$A_R = \sum \lambda_R \cdot \rho \frac{L_R}{d_{h_R} \cdot 2S_R^2} + \sum \xi_R \cdot \rho \frac{1}{2S_R^2}. \quad (7)$$

Виходячи з того, що в запропонованій моделі не можливо врахувати взаємний вплив локальних опорів визначається лише найбільший з них [15].

З урахуванням квадратичної залежності перепаду тиску  $\Delta p$  від витрати повітря  $Q$  в турбулентному режимі течії при форсованому диханні

$$\Delta p = Q^2 \cdot A, \quad (8)$$

то при використанні рівнянь (6) і (7) загальний коефіцієнт аеродинамічного опору паралельних каналів буде визначатись з формули (8) як

$$A = \left( \frac{\sqrt{A_L} \cdot \sqrt{A_R}}{\sqrt{A_L} + \sqrt{A_R}} \right)^2. \quad (9)$$

Перетини носової порожнини вибирались за даними мультипланарних реконструкцій у фронтальній площині з інтервалом 2 мм.

### ПОБУДОВА НАТУРНОЇ МОДЕЛІ ВЕРХНІХ ДИХАЛЬНИХ ШЛЯХІВ

Розробка натурної моделі верхніх дихальних шляхів заснована на подальшому перетворюванні сегментованої геометричної моделі в форматі stl за допомогою спеціальних програм слайсерів, наприклад Cura 3D (див. рисунок 3, а) у G-код з урахуванням характеристик пристрою 3D-друку та параметрів прототипування для послідуочого виготовлення. Зовнішній вигляд готової натурної моделі носової порожнини, яка виготовлена методом екструзійного термодруку на 3D принтері Wanhao Duplicator M1 із PLA-пластику наведено на рисунку 3, б.

Визначення характеристик течії повітря на моделі проводилося на пневматичному стенді (див. рисунок 4), при чому задавалася за допомогою компресора витрата повітря  $Q$ , яка відповідала фізіологічним значенням – від 1 до 4 л/с, а в точках виміру тиску на вході та виході носового каналу отримувались відповідні значення на перетворювачах  $p_1$  та  $p_2$  (на рисунку 4 встановлені на витратомірі типа сопло Вентурі) для отримання перепаду тиску

$$\Delta p = p_2 - p_1. \quad (10)$$

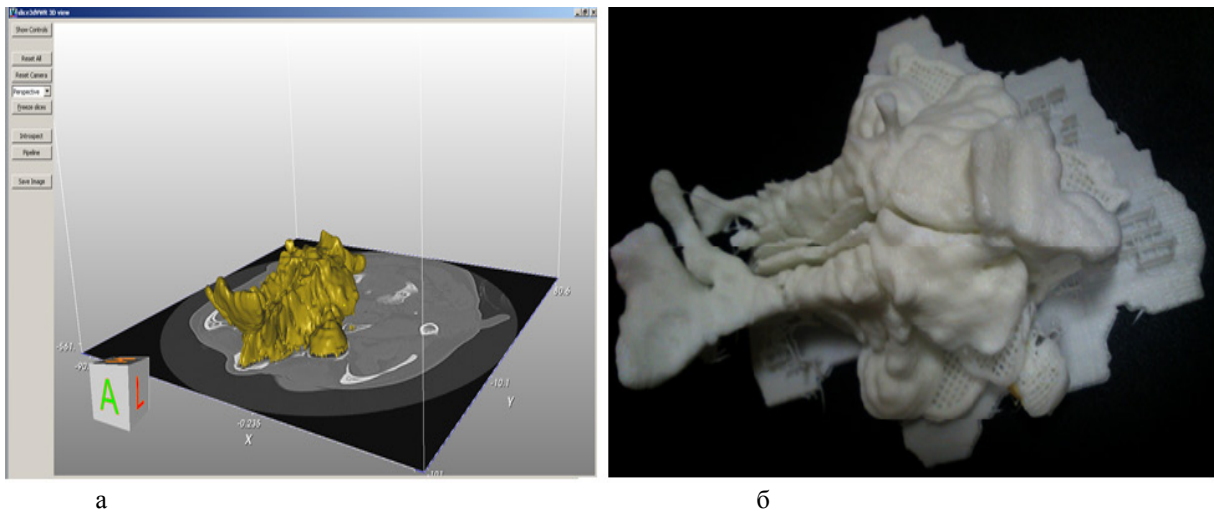


Рисунок 3 – Персонафікована модель носової порожнини за даними спіральної комп'ютерної томографії:  
а) віртуальна модель; б) натурна модель

При чому, у відповідності до формули (8) коефіцієнт аеродинамічного носового опору визначався як

$$A = \frac{\Delta p}{Q^2}. \quad (11)$$

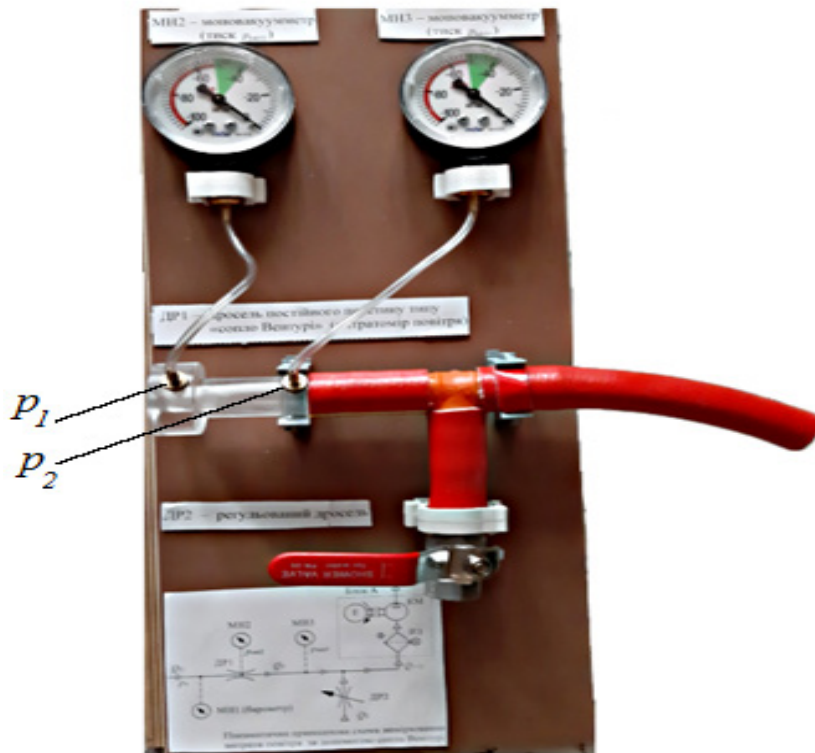


Рисунок 4 – Пневматичний стенд для проведення аеродинамічних випробувань

Оцінка адекватності моделей проводилася за допомогою задньої активної риноманометрії [14, 17, 18, 19] (див. рисунок 5) з визначенням перепаду тиску та витрати повітря у пацієнтів в нормі та при порушеннях носового дихання в форсованому режимі. Структурна схема проведених досліджень наведена на рисунку 6. Вона складається з отримання даних щодо геометричної конфігурації носової порожнини за даними комп'ютерної томографії, сегментації і побудови 3D моделі носової порожнини, на основі якої проводиться побудова математичної та натурної моделей носової порожнини, випробування останньої на аеродинамічному стенді, аналізі кореспондування отриманих даних та оцінки їх адекватності (результатів теоретичного та натурального моделювання) при порівнянні з даними риноманометрії.

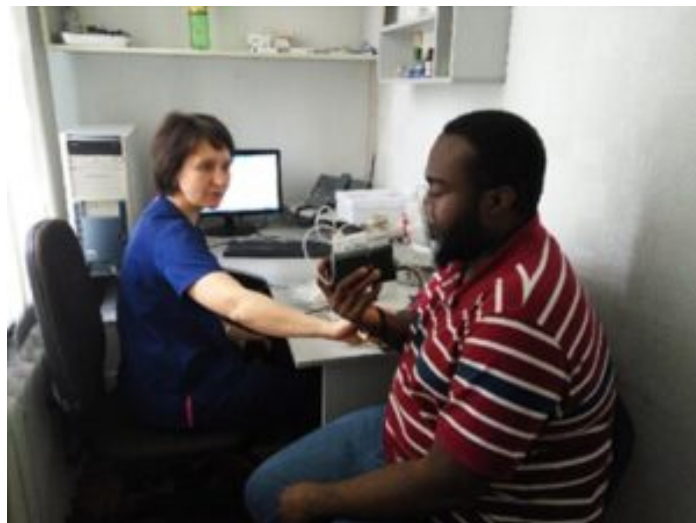


Рисунок 5 – Проведення риноманометричного дослідження

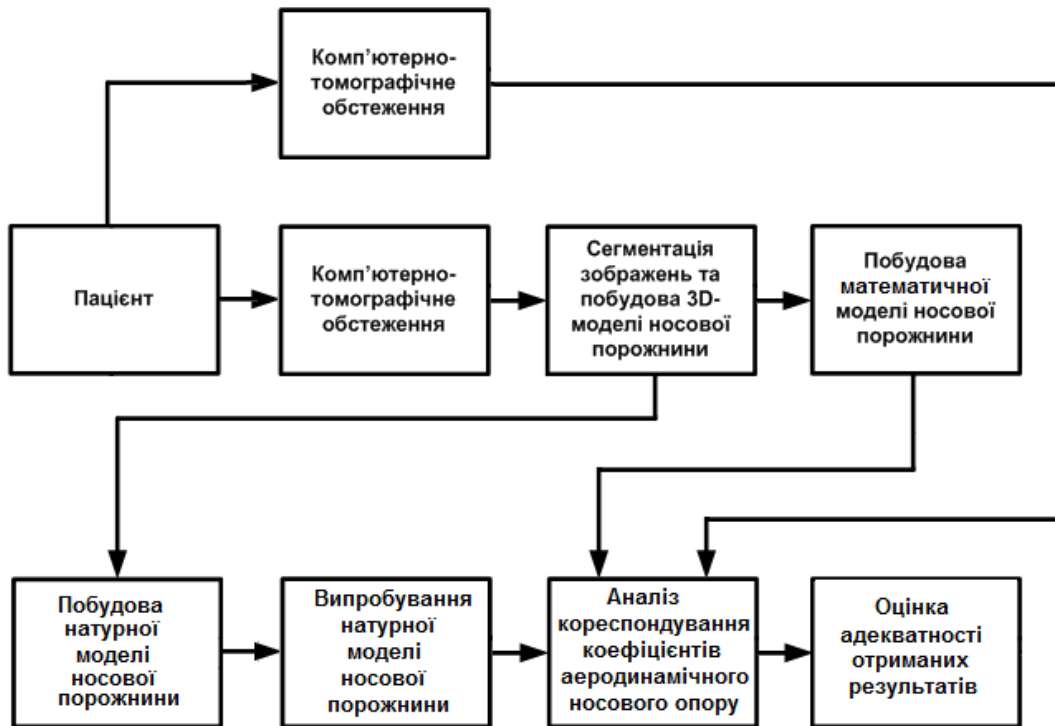


Рисунок 6 – Структурна схема визначення коефіцієнтів аеродинамічного носового опору за даними математичної і натурної моделей та оцінки адекватності за результатами риноманометрії

### РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Згідно з наведеною на рисунку 6 схемою досліджень на рисунку 7 отримуємо теоретичні ( $T$ ) – за даними математичного моделювання значення коефіцієнтів аеродинамічних носових опорів за формулами (6), (7), (9), натурні ( $N$ ) – експериментальні значення, які отримуються шляхом аеродинамічних випробувань друкованої моделі носової порожнини з отриманням значень за формулами (10), (11) та риноманометричні ( $R$ ) – реальні дані, які отримуються при дослідженні конкретних пацієнтів з розрахунками за формулою (11). Вибірались персоналізовані дані трьох пацієнтів з умовною нормою (1) (без порушень носового дихання згідно з томограмою на рисунку 8, а) та з типовими порушеннями носового дихання при викривленні носової перетинки (2) (з явно вираженим локальним опором згідно з томограмою на рисунку 8, б) та хронічному синуситі (3) – (із звуженням носової порожнини на більшості ділянок носової порожнини згідно з томограмою на рисунку 8, в). За даними рисунку 7 видно, що в нормі (випадок (1) на рисунку 7) коефіцієнти аеродинамічного носового опору достатньо низькі і складають близько 0,3 кПа·с/л, при чому дані натурального моделювання ( $N$ ), які отримуються за натурною моделлю, та теоретичні ( $T$ ) – нижче, ніж риноманометричні ( $R$ ), що зумовлено властивостями пластикової поверхні натурної моделі та недостатнім урахуванням незначних локальних опорів в математичній моделі ( $T$ ).

При викривленні носової перетинки (випадок (2) на рисунку 7) коефіцієнти аеродинамічного носового опору найбільші (близько 2 кПа·с/л) ніж в інших випадках, при чому теоретичні ( $T$ ) та дані натурального моделювання ( $N$ ) суттєво нижче риноманометричних, що показує неможливість більш адекватного врахування турбулентності у математичній моделі ( $T$ ) та генералізованим меншим впливом втрат на тертя при дослідженні натурної моделі ( $N$ ). достатньо низькі і складають близько 0,3 кПа·с/л, при чому експериментальні дані, які отримуються за натурною моделлю нижче, ніж риноманометричні та теоретичні, що зумовлено властивостями поверхні натурної моделі та не достатнім урахуванням незначних локальних опорів в математичній моделі.



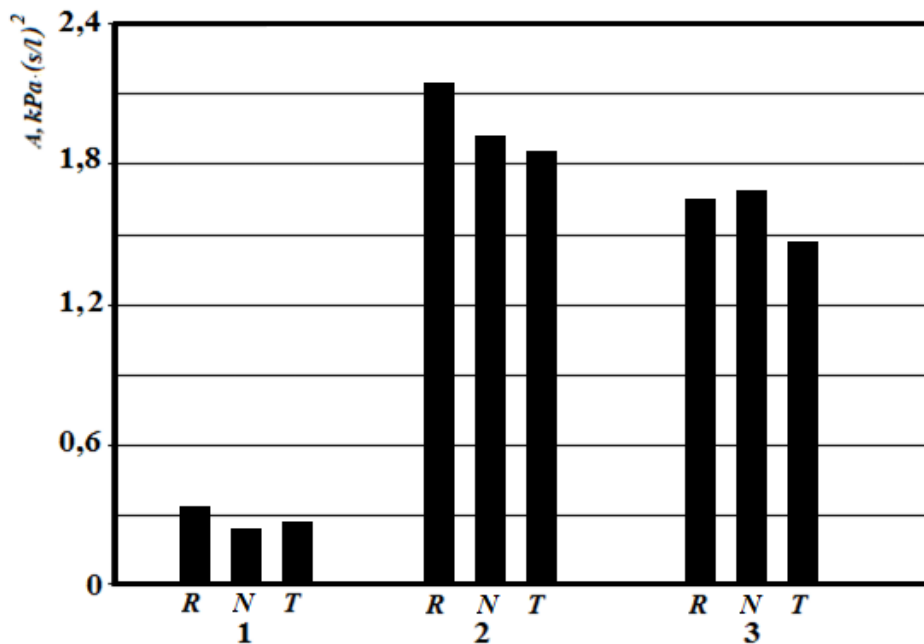


Рисунок 7 – Результати визначення коефіцієнтів аеродинамічного носового опору при умовній нормі (1), викривленні носової перетинки вліво (2), хронічному риносинуситі (3): (R) – риноманометричні, (N) – натурні, (T) – теоретичні дані

При хронічному риносинуситі (випадок (3) на рисунку 7) коефіцієнти аеродинамічного носового опору теж достатньо високі (близько 1,6 кПа·с/л), дані натурального моделювання (N) при цьому відносно найбільші, що зумовлено можливим впливом носового циклу при проведенні риноманометрії (R), а також відсутністю впливу локальних опорів в моделі при теоретичних розрахунках (T). Таким чином, за отриманими даними коефіцієнтів аеродинамічного носового опору в розглянутих прикладах типових патологій та умовної норми можна зробити висновок, що теоретична модель має систематичну похибку в бік зменшення, яку можливо дещо усунути. Але, це потребує подальших досліджень з наборами статистичних даних.

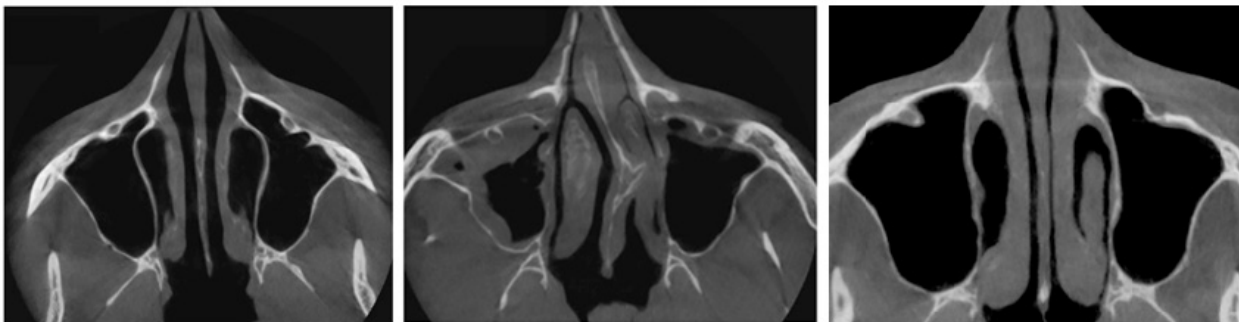


Рисунок 8 – Аксиальні комп'ютерні томограми пацієнтів при: а) умовній нормі; б) викривленні носової перетинки вліво; в) хронічному риносинуситі

### ВИСНОВКИ

В роботі розглянуто три метода отримання даних щодо коефіцієнта аеродинамічного носового опору та проведено їх порівняльний аналіз. Так, за даними моделі одномірної течії повітря можливо отримати теоретичні результати щодо цього коефіцієнта із урахуванням локальних опорів та витрат на тертя о стінки носової порожнини. За результатами експериментальних випробувань натурної моделі, яка отримується методом 3D друку можливо розрахувати значення коефіцієнта аеродинамічного носового



опору за рахунок отримання значень перепаду тиску – сумарних втрат при відповідних заданих показниках витрати повітря. Вихідними даними для обох моделей є сегментовані томографічні зрізи конфігурації носові порожнини. Верифікацію отриманих даних можливо здійснити шляхом проведення риноманометричних досліджень безпосередньо у реальних пацієнтів.

Адекватність моделей визначається порівнянням значень коефіцієнта аеродинамічного носового опору, які отримані за модельними даними з результатами риноманометрії. Розбіжність значень коефіцієнтів аеродинамічного носового опору при цьому не перевищувала 15% та пояснюється методичними помилками, що пов'язані з підходами при розрахунках аеродинамічної моделі носової порожнини, зокрема не можливістю урахування всіх локальних порушень та їх взаємовпливу, та властивостями пластикової поверхні повітряних каналів натурної моделі при експериментальних випробуваннях. Тем не менш, отримані дані можуть бути корисними для планування хірургічних втручань при віртуальному та натурному моделюванні змін конфігурації носової порожнини та відповідному прогнозуванні змін коефіцієнтів аеродинамічного носового опору. Перспективою роботи є статистична обробка наборів даних для визначення достовірності отриманих результатів та удосконалення модельних уявлень носової порожнини за рахунок розвитку математичного апарату та матеріалів прототипування.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Аврунін О.Г., Бодянський 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>
2. 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. ISBN 978-966-659-300-2.
3. Комп'ютерне планування малоінвазивних втручань в офтальмології та нейрохірургії / О. Г. Аврунін, Д. В. Кухаренко, В. О. П'ятикоп, В. В. Семенець, М. Ю. Тимкович, В. О. Філатов. – Харків: ХНУРЕ, 2020. – 160 с.
4. П'ятикоп, В. О. Сучасні технології фантомного моделювання в нейрохірургії як різновид симуляційного навчання лікарів-нейрохірургів / В.О. П'ятикоп, О.Г. Аврунін, М.Ю. Тимкович, І.О. Кутувий, І.О. Полях //Матеріали навчально-методичної конференціїСимуляційне навчання в системі підготовки медичних кадрів, Харків, ХНМУ.– 2016.–С.136-138.
5. The surgical navigation system with optical position determination technology and sources of errors // O.G. Avrunin, M. Alkhorayef, H.F.I. Saied, M.Y. Tymkovych // Journal of Medical Imaging and Health Informatics. – 2015. –Vol. 5. – P. 689–696.
6. Matula C. Intra-operative CT andimage-guidedsurgery: anintroduction / C. Matula // Medicamundi.– 1998.– Vol. 42.– № 1.– P. 2-5.
7. Avrunin, O., Tymkovych, M., Drauil, J. Automatized technique for three- dimensional reconstruction of cranial implant based on symmetry (2015) Information Technologies in Innovation Business Conference, ITIB 2015 –Proceedings, pp.39-42.
8. Mlynski G. Nasal Physiology and Pathophysiology of Nasal Disorders. InNasal Physiology and Pathophysiology of Nasal Disorders / Ed. T. Metin Цнерци.– Springer, 2013. – pp 257-272.
9. Gritzenmacher S, Mlynski R, Lang C, Scholz S, Saadi R, Mlynski G, The Nasal Airflow in Noses with Septal Perforation: A Model Study// ORL. Rhinology. – 2005. Rhinology. – № 67. Rhinology. – P. 142-147.
10. Tymkovych, M.Y., Avrunin, O.G. Farouk, H.I. Reconstruction method of the intact surface of surgical accesses. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2014, 9(70), 37- 41.
11. Аврунін О. Г., Аверьянова Л. А., Бых А. И., Головенко В. М., Скляр О. И. Методика создания виртуальных средств имитации работы рентгеновского компьютерного томографа. Техническая электродинамика. Тем. Вып. Киев, 2007. Т. 5, С. 105–110.
12. Avrunin O.G. Using a priori data for segmentation anatomical structures of the brain / O.G. Avrunin, M.Y. Tymkovych, S.P. Moskovko, et. al. Przegląd Elektrotechniczny: doi:10.15199/48.2017.05.20. V. 93-5. 2017. P. 102-105.
13. Аврунін О.Г. Опыт разработки программного обеспечения для визуализации томографических данных. Вісник НТ «ХП». 2006. № 23. С. 3-8.

14. 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. – X. ; Кацивели : ХНУРЕ, 2010. – С. 280-281.
15. Avrunin, O.G.; Nosova, Y.V.; Pavlov, S.V.; and etc. Possibilities of Automated Diagnostics of Odontogenic Sinusitis According to the Computer Tomography Data. *Sensors* 2021, 21, 1198. <https://doi.org/10.3390/s21041198> (Q2).
16. Avrunin, O.G.; Nosova, Y.V.; Pavlov, S.V.; Shushliapina, N.O.; and etc. Research Active Posterior Rhinomanometry Tomography Method for Nasal Breathing Determining Violations. *Sensors* 2021, 21, 8508. doi: 10.3390/s21248508, <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/24/8508>
17. Correlation of nasal morphology and respiratory function / G.Mlynski, S. Grutzenmacher, S. Plontke et al.// *Rhinology*.– 2001. *Rhinology*.– № 39(4). *Rhinology*. – 197-201.
18. Wójcik W., Pavlov S., Kalimoldayev M. *Information Technology in Medical Diagnostics II*. London: (2019). Taylor & Francis Group, CRC Press, Balkema book. – 336 Pages.
19. Vogt, K. *4-Phase-Rhinomanometry Basics and Practice* / K. Vogt, A. A. Jalowayski // *Rhinology*. – 2010. – № 21. – P. 1–50.

#### REFERENCES

1. Avrunin O.H., Bodyans'kyi YE.V., Semenets' V.V., Filatov V.O., Shushlyapina N. O. *Informatsiyni tekhnolohiyi pidtrymky pryynyattya rishen' pry vyznachenni porushen' nosovoho dykhannya*. Kharkiv : KHNURE, 2018. 132 s URL: <https://doi.org/10.30837/978-966-659-235-7>
2. *Suchasni metody diahnozyky respiratorno-ol'faktornoyi funktsiyi: monohrafiya* / O.H. Avrunin, YA.V. Nosova, V.V. Semenets', V.O. Filatov, N. O. Shushlyapina. Kharkiv : KHNURE, 2021. 150 s. ISBN 978-966-659-300-2
3. *Komp'yuterne planuvannya maloinvazyvnykh vtruchan' v oftal'molohiyi ta neyrokhirurhiyi* / O. H. Avrunin, D. V. Kukharenko, V. O. P'yatykop, V. V. Semenets', M. YU. Tymkovych, V. O. Filatov. – Kharkiv: KHNURE, 2020. – 160 s.
4. *P'yatykop, V. O. Suchasni tekhnolohiyi fantomnoho modelyuvannya v neyrokhirurhiyi yak riznovyd symulyatsiynoho navchannya likariv-neyrokhirurhiv* / V.O. P'yatykop, O.H. Avrunin, M.YU. Tymkovych, I.O. Kutovy, I.O. Polyakh // *Materialy navchal'no-metodychnoyi konferentsiyi Symulyatsiynе navchannya v systemi pidhotovky medychnykh kadriv*, Kharkiv, KHNMU.– 2016.–S.136-138.
5. *The surgical navigation system with optical position determination technology and sources of errors* // O.G. Avrunin, M. Alkhorayef, H.F.I. Saied, M.Y. Tymkovych // *Journal of Medical Imaging and Health Informatics*. – 2015. –Vol. 5. – P. 689–696.
6. *Matula C. Intra-operative CT and image-guided surgery: an introduction* / C. Matula // *Medicamundi*.– 1998.– Vol. 42.– № 1.– P. 2-5.
7. Avrunin, O., Tymkovych, M., Drauil, J. *Automatized technique for three-dimensional reconstruction of cranial implant based on symmetry* (2015) *Information Technologies in Innovation Business Conference, ITIB 2015 –Proceedings*, pp.39-42.
8. Mlynski G. *Nasal Physiology and Pathophysiology of Nasal Disorders*. In *Nasal Physiology and Pathophysiology of Nasal Disorders* / Ed. T. Metin İnerci.– Springer, 2013. – pp 257-272.
9. Gritzenmacher S, Mlynski R, Lang C, Scholz S, Saadi R, Mlynski G, *The Nasal Airflow in Noses with Septal Perforation: A Model Study*// *ORL. Rhinology*. – 2005. *Rhinology*. – № 67. *Rhinology*. – P. 142-147.
10. Tymkovych, M.Y., Avrunin, O.G. Farouk, H.I. *Reconstruction method of the intact surface of surgical accesses*. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2014, 9(70), 37- 41.
11. Avrunin O. G., Aver'yanova L. A., Bykh A. I., Golovenko V. M., Sklyar O. I. *Metodika stozdaniya virtual'nykh sredstv imitatsii raboty rentgenovskogo komp'yuternogo tomografa*. *Tekhnicheskaya elektrodinamika*. Tem. Vyp. Kiyev, 2007. T. 5, S. 105–110.
12. Avrunin O.G. *Using a priori data for segmentation anatomical structures of the brain* / O.G. Avrunin, M.Y. Tymkovych, S.P. Moskovko, et. al. *Przegląd Elektrotechniczny*: doi:10.15199/48.2017.05.20. V. 93-5. 2017. P. 102-105.
13. Avrunin O.G. *Opyt razrabotki programnoho obespecheniya dlya vizualizatsii tomograficheskikh danykh*. *Visnik NT «KHPÍ»*. 2006. № 23. S. 3-8.

---

---

## БІОМЕДИЧНІ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ ТА ПРИЛАДИ

---

---

14. Avrunin O. G. Obosnovaniye osnovnykh mediko-tekhnicheskikh trebovaniy dlya proyektirovaniya mnogofunktsional'nogo rinomanometra / O. G. Avrunin, A. I. Bykh, V. V. Semenets // Funktsional'naya komponentnaya baza mikro-, opto- i nanoelektroniki : sb. nauch. tr. III Mezhdunar. nauch. konf., 28 sent. – 2 okt. 2010 g. – KH. ; Katsiveli : KHNUR·E, 2010. – S. 280-281
15. Avrunin, O.G.; Nosova, Y.V.; Pavlov, S.V.; and etc. Possibilities of Automated Diagnostics of Odontogenic Sinusitis According to the Computer Tomography Data. Sensors 2021, 21, 1198. <https://doi.org/10.3390/s21041198> (Q2).
16. Avrunin, O.G.; Nosova, Y.V.; Pavlov, S.V.; Shushliapina, N.O.; and etc. Research Active Posterior Rhinomanometry Tomography Method for Nasal Breathing Determining Violations. Sensors 2021, 21, 8508. doi: 10.3390/s21248508, <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/24/8508>
17. Correlation of nasal morphology and respiratory function / G.Mlynski, S. Grutzenmacher, S. Plontke et al.// Rhinology.– 2001. Rhinology.– № 39(4). Rhinology. – 197-201.
18. Wójcik W., Pavlov S., Kalimoldayev M. Information Technology in Medical Diagnostics II. London: (2019). Taylor & Francis Group, CRC Press, Balkema book. – 336 Pages.
19. Vogt, K. 4-Phase-Rhinomanometry Basics and Practice / K. Vogt, A. A. Jalowayski // Rhinology. – 2010. – № 21. – P. 1–50.

**НОСОВА ЯНА ВІТАЛІВНА** – к.т.н., старший викладач кафедри біомедичної інженерії Харківського національного університету радіоелектроніки, Харків, Україна, **[e-mail: tatyana.nosova@nure.ua](mailto: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](mailto:oleh.avrunin@nure.ua)**

**ШУШЛЯПИНА НАТАЛЯ ОЛЕГІВНА** – к.м.н., доцент кафедри оториноларингології Харківського національного медичного університету, **[e-mail: schusha75@ukr.net](mailto:schusha75@ukr.net)**

**ІБРАГІМ ЮНУСС АБДЕЛХАМІД** – аспірант кафедри біомедичної інженерії Харківського національного університету радіоелектроніки, Харків, Україна, **[e-mail: ibrahim.younouss.abdelhamid@nure.ua](mailto:ibrahim.younouss.abdelhamid@nure.ua)**, **[ORCID: 0000-0003-2611-2417](https://orcid.org/0000-0003-2611-2417)**

**АЛОФІ БАНДЕР АЛІ САЄД** - інженер-консультант, Університет Умм-Аль-Кура, Мекка, Саудівська Аравія