

УДК 004.89

А.С. Нечипоренко¹, Г.А. Зацеркляний²¹ХНУРЕ, м. Харків, Україна, alina.nechyporenko@nure.ua²ХНУРЕ, м. Харків, Україна, george.zatserklyany@gmail.com

КОМП'ЮТЕРНЕ ПЛАНУВАННЯ ОПЕРАТИВНИХ ВТРУЧАНЬ НА ОСНОВІ CFD-АНАЛІЗУ

Стаття присвячена розробці інформаційної технології планування оперативних втручань на основі CFD-аналізу, що дозволяє враховувати аеродинамічні властивості повітряного потоку крізь канал нерегулярної форми, а також просторові характеристики об'ємних моделей індивідуальних анатомічних конфігурацій. На основі розробленої інформаційної технології створено підсистему планування оперативних втручань, яка входить до складу ринологічної інформаційної системи. Використання запропонованого підходу дає змогу уникнути непотрібних втручань, а також зменшити фінансові витрати в умовах страхової медицини.

CFD-АНАЛІЗ, ТУРБУЛЕНТНИЙ РЕЖИМ ТЕЧІЇ, РИНОЛОГІЧНА ІНФОРМАЦІЙНА СИСТЕМА, КОМП'ЮТЕРНЕ ПЛАНУВАННЯ, ОПЕРАТИВНЕ ВТРУЧАННЯ, ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ

Вступ

Порушення носового дихання — найбільш болючий симптом, який впливає на якість життя людини. Часто даний симптом пов'язаний з наявністю викривлення носової перетинки. За даними літературних джерел [1, 2] 25 % оперативних втручань від загальної кількості випадків, що проводяться згідно з існуючими протоколами, не є ефективними. Головними чинниками цього є наявність помилок прийняття рішення про втручання та відсутність єдиного системного підходу до комп'ютерного планування оперативних втручань. З одного боку існуючі системи хірургічної навігації та засоби інтраопераційної візуалізації дозволяють в режимі реального часу отримувати інформацію про анатомічні особливості пацієнта, розташування інструментів, стані патології і місце операційного втручання. З іншого боку — системи комп'ютерного планування ринохірургічних операцій, що базуються на модулях побудови та реконфігурації об'ємних моделей каналів нерегулярної форми. Однак сучасні системи не дозволяють досліджувати функціональні характеристики об'єкту втручання, які дуже важливі на етапі планування перебігу операції та є визначальними для результату втручання. Рішення про операцію приймається у відповідності до протоколу діагностичних процедур, який у більшості країн містить методи томографії (КТ і МРТ), дослідження носового повітряного потоку (риноманометрія, ринорезистометрія та ін.), акустична ринометрія [3]. Проте не усі викривлення потребують проведення септопластики. За даними останніх досліджень [4] оперативне втручання показане лише у випадках, коли має місце порушення аеродинаміки носової порожнини та у залежності від локалізації цього порушення.

Для визначення аеродинамічних характеристик доцільно проводити CFD (Computational Fluid Dynamics) моделювання руху повітря в носовій

порожнині. Математичний апарат, що застосовується для дослідження поточкових процесів у таких системах базується на рівняннях математичної фізики. Це дає змогу візуалізувати повітряний потік у носовій порожнині, яка є каналом нерегулярної форми, а також проаналізувати параметри потоку як нестационарного квазіперіодичного процесу. Таким чином, CFD — аналіз дозволяє проводити планування оперативних втручань з урахуванням аеродинамічних характеристик різноманітних конфігурацій каналів нерегулярної форми.

Сьогодні застосування CFD-аналізу має локальний, несистемний характер, що потребує формування відповідних вимог до проведення моделювання.

Таким чином, метою даної роботи є розробка єдиного системного підходу для дослідження поточкових процесів у каналах нерегулярної форми, що є основою стандартизації та відповідного інформаційно-технологічного забезпечення комп'ютерного планування оперативних втручань у ринології.

1. CFD-аналіз у каналах нерегулярної форми

Моделювання руху повітряного потоку через носову порожнину, яка є каналом нерегулярної форми пов'язано зі складністю математичного опису турбулентного режиму течії. Математична модель повинна бути тривимірною і враховувати пульсації миттєвих значень швидкості потоку в довільному напрямку. Даний факт обмежує можливості прямого чисельного моделювання, що вимагає великих обчислювальних потужностей. В даний час для таких досліджень активно використовується CFD-аналіз. Даний метод заснований на розрахунку характеристик повітряного потоку за допомогою методів обчислювальної гідродинаміки.

Для проведення імітаційного моделювання на базі пакетів чисельного моделювання на першому етапі необхідно побудувати тривимірну модель

досліджуваного об'єкту. Формалізуємо цей процес на прикладі створення 3D моделі системи носового дихання. В зв'язку з цим виникає задача, яка полягає у виділенні носового каналу із наявної комп'ютерної томограми. По-перше було отримано томографічні зрізи, кожен 512x512 елементів зображення. Для роботи з такими даними доцільно використовувати додатки для масивно-паралельних обчислювальних пристроїв, де як вершинні буфери, що містять графічні примітиви, так і окремі фрагменти можуть оброблятися паралельно і незалежно один від одного. Це дозволяє оптимізувати обчислювальні і тимчасові витрати. На наступному етапі необхідно визначити метод розрахунку руху повітря у цьому каналі.

Для розв'язування першої задачі, тобто для виділення області носової порожнини використовувалося програмне середовище «3D Slicer». Програма є потужним інструментом відкритого доступу для аналізу комп'ютерних томограм, у даному випадку побудови 3D моделі каналу нерегулярної форми [5]. Інтерфейс користувача зображено на рис. 1.

З цією метою реалізується комплексна обробка вихідного набору томографічних зображень (СТ-сканів), яка включає в себе обробку зображення для згладжування імпульсного шуму за допомогою медіанного фільтру, формування сегментованого зображення за допомогою порогового фільтру, морфологічну фільтрацію для виділення контуру структур. Таким чином відбувається виділення областей повітряних структур. Для кожного осередку графічної матриці зрізу розраховується коефіцієнт абсорбції (коефіцієнт ослаблення, що виражається в одиницях Хаунсфілда, для повітря -1000 HU). Далі створюється 3D модель та будується мережа. Алгоритми тріангуляції реалізовані в таких професійних графічних пакетах 3D-моделювання, як «3D Studio MAX», «OpenGL Optimizer», «LightWave». Метод передбачає з'єднання між собою набору точок непересічними відрізками прямих ліній таким чином, щоб сформовані трикутники прагнули до

рівнокутності. Алгоритм працює шляхом постійного нарощування до поточної тріангуляції по одному трикутнику за крок. На кожній ітерації здійснюється пошук трикутника, який підключається до межі поточної тріангуляції. В результаті для побудови об'ємної моделі сегментовані елементи представляються у вигляді полігональної сітки, тобто всі зв'язкові компоненти повітряних структур на кожному томографічному зрізі послідовно з'єднуються між собою 3D Модель, отримана в результаті рендерингу зображено на рис. 2.

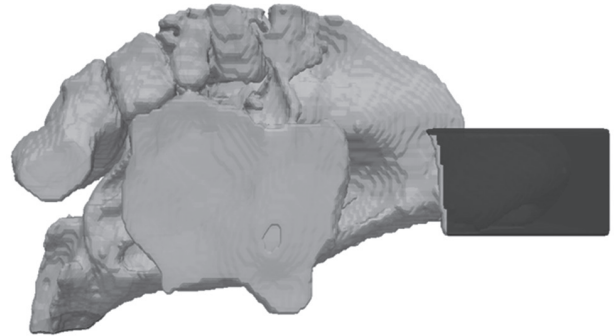


Рис. 2. 3D модель носової порожнини

Для проведення чисельного моделювання що базується на рішенні диференціальних рівнянь у частинних похідних застосовується метод скінченних об'ємів. Докладно реалізація цього методу описана в роботі [6]. Експериментальним шляхом визначено, що кількість елементів мережі моделі повинна бути у діапазоні $Q(10^7)$ — $Q(10^9)$ елементів, для забезпечення достатньої точності розрахунків. За допомогою програми «Blender» розділяються межі носового каналу: бокова поверхня, вхід і вихід, тобто ті межі, на яких потрібно при моделювання течії повітря задавати граничні умови.

На наступному етапі необхідно обрати математичну модель на основі рівнянь гідродинаміки, на базі якої здійснюється розрахунок потокових процесів та їх характеристик. Течія повітря в носовому каналі в рамках даного проекту розглядається

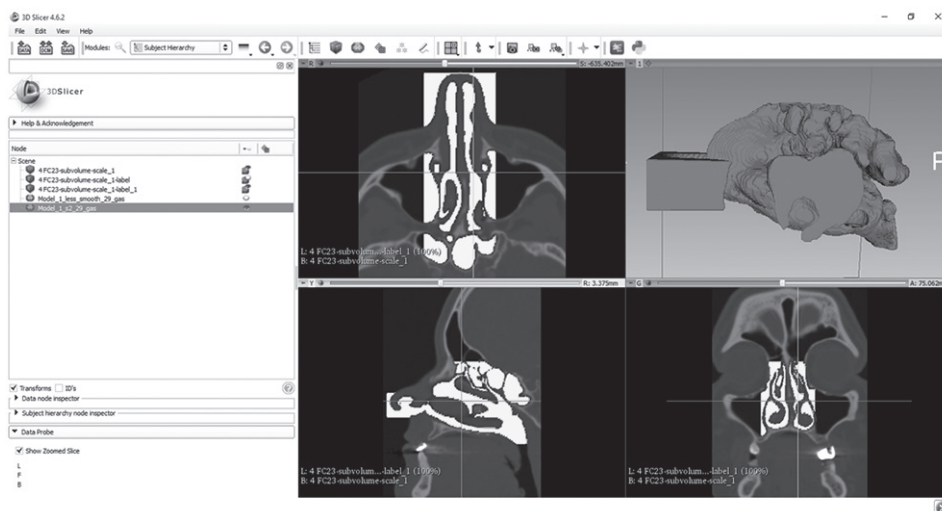


Рис. 1. Графічний інтерфейс користувача

в наближенні тривимірного нестационарного турбулентного потоку однорідного ізотермічного суцільного середовища. При таких умовах задачею моделювання є математичне формулювання законів збереження маси і кількості руху, доповнених рівнянням стану ідеального газу. Клапейрона. Ці рівняння записуються в інтегральній формі:

$$\begin{aligned} & \int_V \frac{\partial \rho}{\partial t} dV + \oint_S \rho \bar{U} d\bar{S} = 0, \\ & \int_V \frac{\partial(\rho \bar{U})}{\partial t} dV + \oint_S \rho U_x \bar{U} d\bar{S} = \\ & = -\oint_S \frac{P^*}{\rho} dS_x + \int_V g(\rho - \rho_h) dV + \oint_S \sigma_{xj} dS_j, \\ & \int_V \frac{\partial(\rho \bar{U})}{\partial t} dV + \oint_S \rho U_y \bar{U} d\bar{S} = \\ & = -\oint_S \frac{P^*}{\rho} dS_y + \int_V g(\rho - \rho_h) dV + \oint_S \sigma_{yj} dS_j, \\ & \int_V \frac{\partial(\rho \bar{U})}{\partial t} dV + \oint_S \rho U_z \bar{U} d\bar{S} = \\ & = -\oint_S \frac{P^*}{\rho} dS_z + \int_V g(\rho - \rho_h) dV + \oint_S \sigma_{zj} dS_j. \end{aligned} \quad (1)$$

Моделювання турбулентності виконується на основі SST-моделі Ментера:

$$\begin{aligned} & \int_V \frac{\partial \rho k}{\partial t} dV + \oint_S \left[\bar{U} \bar{n}(\rho k) - (\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial n} \right] dS = \\ & = \int_V \rho (P_k - \beta^* k \omega) dV, \\ & \int_V \frac{\partial \rho \omega}{\partial t} dV + \oint_S \left[\bar{U} \bar{n}(\rho \omega) - (\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial n} \right] dS = \\ & = \int_V \rho \left(P_k - \beta \omega^2 + 2(1 - F_1) \sigma_\omega \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \right) dV, \\ & \mu_t = \frac{\rho k}{\omega}, \tau_{ij} = 2\mu_t S_{ij} - 2\bar{I} \frac{\mu_t \nabla \nabla + \rho k}{3}, \\ & P_k = \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j}, P_\omega = \frac{\gamma}{\mu_t} \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j}. \end{aligned} \quad (2)$$

SST-модель на сьогодні є найбільш досконалою, оскільки однаково добре враховує вплив турбулентності на осереднені параметри і в пристінковій області, і в ядрі потоку. За числовий метод вибрано метод скінчених об'ємів. Докладно реалізація цього методу описана в роботі [3]. Ці рівняння можна записати в інтегральній формі [7] або за допомогою системи рівнянь Нав'є-Стокса і нерозривності [8]. Модель Ментера у деталях викладено у [9].

На боковій поверхні каналу граничною умовою є умова не проникнення і прилипання, тобто всі три компоненти вектору швидкості дорівнюють нулю, на вході задається тиск повітря в оточуючому

середовищі: одна атмосфера. На виході з каналу задаються дані, одержані експериментальним шляхом за допомогою програмно-апаратного комплексу для оцінки носового дихання "OPTIMUS" (свідоцтво державної реєстрації № 14777/2015 від 12.06.2015), (рис. 3).

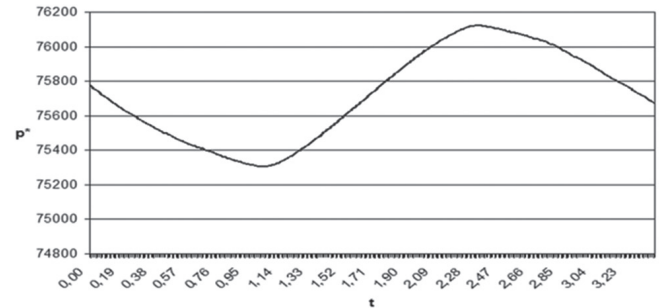


Рис. 3. Гранична умова на виході з каналу

Результати чисельного моделювання наведено на рис. 4, де показані лінії струму в носовому каналі та рис. 5, де зображено поля вектору швидкості в деяких перетинах цього каналу.

Time: 1.00

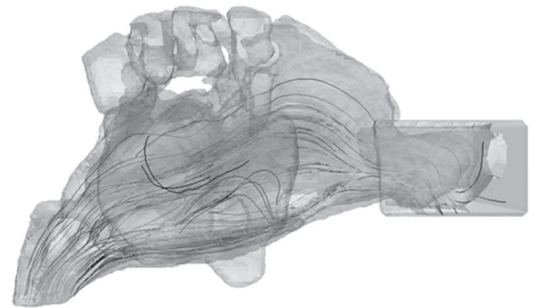


Рис. 4. Лінії струму в каналі

Time: 1.00



Рис. 5. Поля вектору швидкості в деяких перетинах каналу

2. Розробка інформаційної технології планування оперативних втручань

Однією з причин активного залучення сучасних інформаційних технологій в медичну галузь — можливість зниження витрат на надання медичної допомоги при поліпшенні якості послуг. Впровадження інформаційних технологій в медицину дозволяє не тільки підвищити ефективність роботи медичного персоналу, але і якість послуг,

що надаються пацієнтам. Ефективність впровадження інформаційних технологій в медичній сфері підтверджується результатами дослідження європейських та американських колег, які підготували і опублікували матеріали про результати ефективного впровадження інформаційних технологій в медичні установи, як приватного, так і державного характеру.

Грунтуючись на проведених дослідженнях розроблено інформаційну технологію планування оперативних втручань у ринології. За основу прийнята методологія функціонального моделювання IDEF0. Вихідними даними для обробки є дані CT-сканів у форматі DICOM (Digital Imaging and Communications in Medicine). Стандарт DICOM дозволяє вирішити завдання інтеграції на основі відкритої архітектури. DICOM дозволяє організувати пересилання даних по мережі та їх автоматичну обробку. Як результат значно зменшується час підготовки та проведення досліджень, управління зображеннями і відповідною інформацією. У якості правил, що регламентують вимоги до виконання відповідних функцій використовуються стандарт обміну, управління та інтеграції електронної медичної інформації HL7 (Health Level 7) та ринологічний стандарт «ISCOANA» [10]. Запропонована інформаційна технологія складається з процесів обробки зображень (постобробки CT-сканів), побудови об'ємної моделі нерегулярного каналу, розрахунку та візуалізації його гідродинамічних характеристик за допомогою CFD-аналізу, прийняття рішення про корекцію 3D моделі та формування рекомендацій щодо проведення оперативного

втручання. Постобробка зображень – це сукупність підпроцесів фільтрації та сегментації зображень які виконуються за допомогою автоматизованих систем. На наступному етапі будується об'ємна модель та її мережа. Далі обирається середовище чисельного моделювання та метод проведення розрахунків. Після цього задаються граничні умови та здійснюється CFD – моделювання. Результати моделювання поступають для аналізу експертом, який приймає рішення щодо необхідності корегування геометричних параметрів моделі. Після чого знову запускається процес CFD-моделювання на базі отриманої об'ємної моделі. Дані моделювання та конфігурації моделей зберігаються у вигляді рекомендацій, які використовуються лікарем для планування оперативного втручання.

Розроблену інформаційну технологію зображено на рис. 6.

Дана інформаційна технологія є основою підсистеми планування оперативних втручань ринологічної інформаційної системи [11]. Дана підсистема зв'язана з базою знань та блоком прийняття рішень, до якого входить комплекс математичних моделей обчислювального інтелекту, статистики, теорії прийняття рішень та ін. Система має сервіс-орієнтовану архітектуру, взаємодіє з низкою біологічних та технічних агентів та містить модулі введення, виведення, зберігання, обробки та аналізу інформації. Система може бути інтегрована у робоче місце спеціаліста в умовах лікарні та інших закладів охорони здоров'я. Медичні спеціалісти взаємодіють з платформою через графічний веб-інтерфейс користувача.

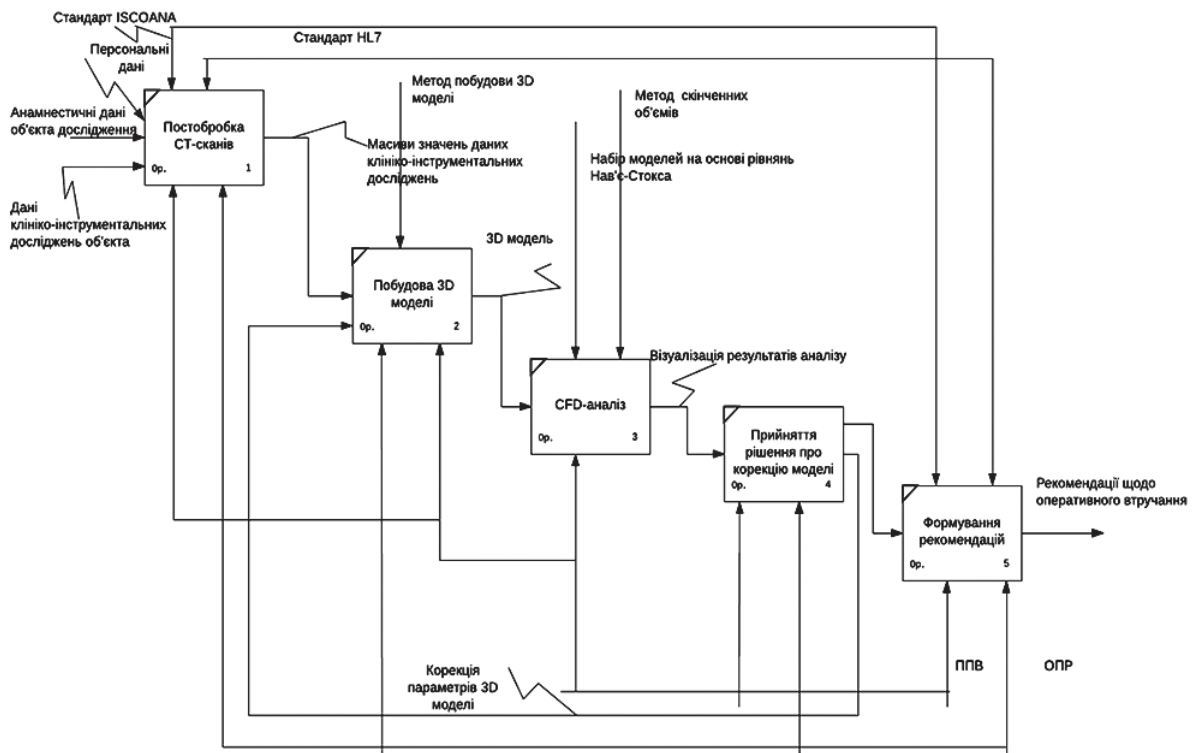


Рис. 6. Інформаційна технологія комп'ютерного планування оперативних втручань

Висновки

Створену в результаті досліджень інформаційну технологію було впроваджено у клінічну практику лікаря-отоларинголога. За даними дослідження кількість незадовільних результатів оперативних втручань, тобто розладнань, які було виявлено через рік після втручання, що було призначене згідно стандартних протоколів суттєво відрізняється, а саме: на 14,9 % від результатів втручань, які було призначено на підставі аналізу гідродинамічного коефіцієнту опору носової порожнини та на 18,8 % — з використанням комплексного підходу, який містить розрахунок коефіцієнту опору та CFD-аналіз. Носова порожнина являє собою канал нерегулярної форми, в якому навіть при малих швидкостях спостерігається турбулентний режим, враховуючи цей факт течія повітря в носовому каналі розглядається в наближенні тривимірного нестационарного турбулентного потоку.

При прийнятті рішення про оперативне втручання доцільно використовувати розрахунок гідродинамічного коефіцієнту опору носової порожнини за даними риноманометричних досліджень у комплексі із моделюванням поточкових процесів за допомогою CFD.

Отже, розроблена інформаційна технологія планування оперативних втручань дозволяє підвищити ефективність запропонованого підходу для раннього визначення розладнань, що дасть змогу уникнути непотрібних втручань та запобігти зайвим фінансовим витратам в умовах страхової медицини, а також автоматизувати процес планування оперативних втручань. Запропоновану інформаційну технологію буде використано у процесі розробки нових стандартів оцінки носового дихання, основною метою яких є впровадження нових параметрів оцінювання, які основані на

розрахунку аеродинамічних показників та враховують індивідуальні властивості анатомічних конфігурацій.

Список літератури:

1. *Clement P. A.* Standardisation Committee on Objective Assessment of the Nasal Airway. Consensus report on acoustic rhinometry and rhinomanometry / P.A. Clement, F. Gordts // *Rhinology*. — 2005. — 43. — P. 169–179.
2. *Thulesius H. L.*, Rhinomanometry in clinical use. A tool in the septoplasty decision making process : doctoral dissertation, clinical sciences / H.L. Thulesius — 2012. — 67 p. H. L.
3. *Malm L.* Guidelines for nasal provocations with aspects on nasal patency, airflow, and airflow resistance /L. Malm, R. G. v. Wijk, C. Bachert // International Committee on Objective Assessment of the Nasal Airways, International Rhinologic Society, "Rhinology, vol. 38(1), pp. 1-6, March.
4. *Чмовж В.В.* Аэродинамика носовой полости человека / В.В.Чмовж, О.Г. Гарюк, А.С. Нечипоренко // Матеріали XX Міжнародної науково-технічної конференції "Гідроаеромеханіка в інженерній практиці", Київ, 26-29 травня, — 2015, с. 70-72.
5. *Quadrio M.* OpenNOSE: an open-source procedure for the simulation of nasal aerodynamics / M. Quadrio// *Anno Accademico 2012 – 2013*, — 118 p.
6. *Yerokhin A. L.* Heat and mass exchange analysis indoors / A.L. Yerokhin, H.A. Zatserklyanyi // Збірник наукових праць «Відбір і обробка інформації». -2016. — №44 (120), с. 51-55.
7. *Єрохін А.Л.* CFD-моделювання для оцінювання носового дихання / А.Л. Єрохін, А.С. Нечипоренко, Г.А. Зацеркляний // II Міжнародна науково-технічна конференція «Поліграфічні, мультимедійні та Web-технології» № 1, с.167-170, 2017.
8. *Чмовж В.В.* Аэрогидродинамика. Часть 1. Харьков: «ХАИ», — 2006 — 193 с.
9. *Menter F.R.* Two–Equation Eddy–Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications / Menter F.R. // *AIAA J.* — 1994. — 32, № 8. — P. 1598-1605.
10. *Clement P. A.* Committee report on standardization of rhinomanometry // *Rhinology*, vol. 22(3), pp.151-155, 1984.
11. *Nechyporenko A.* Intelligent decision-support system in rhinology / A. Nechyporenko // Системні технології № 6(107), 2016, с. 133-141.

Надійшла до редколегії 13.06.2017