

УДК [616.78]

АНДРІЙ СОКОЛЬЦОВ, ОЛЕГ АВРУНІН, ЛЕОНІД КОВАЛЬ, ОЛЕКСАНДР КАДУК

ОЦІНКА ПОКАЗНИКІВ СТЕРЕОЕНДОСКОПІЧНИХ СИСТЕМ В РИНОЛОГІЇ

*Харківський національний університет радіоелектроніки, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, 61166, Ukraine, Kandrii.sokoltsov@nure.ua, oleh.avrunin@nure.ua
Вінницький національний технічний університет*

Анотація. У цьому дослідженні розглянуто переваги та недоліки 3D-ендоскопії у порівнянні з традиційною 2D-ендоскопією для хірургії носових пазух. Встановлено, що 3D-ендоскопія значно покращує сприйняття глибини, яскравість операційного поля та інтраопераційну візуалізацію, особливо корисну для навчання та розуміння анатомії. Незважаючи на це, 3D-ендоскопія може викликати дискомфорт у хірургів, включаючи запаморочення, напруження очей та головний біль. Розробка автоматизованих систем візуалізації на основі стерео камер може покращити точність процедур. Використання персоналізованих натурних моделей, створених за допомогою швидкого прототипування, сприяє підвищенню ефективності тренувальних систем. Однак, необхідність носіння 3D-окулярів та складність очищення лінз залишаються проблемами. Перспективи включають застосування таких систем у телемедичних сервісах для дистанційних консультацій.

Ключові слова: 3D-ендоскопія, хірургія носових пазух, автоматизовані системи візуалізації, натурні моделі, здоров'я людини.

Abstract. This research examines the advantages and disadvantages of 3D endoscopy compared to traditional 2D endoscopy for sinus surgery. It has been found that 3D endoscopy significantly improves depth perception, the brightness of the surgical field, and intraoperative visualization, making it particularly useful for training and understanding anatomy. Despite these benefits, 3D endoscopy can cause discomfort in surgeons, including dizziness, eye strain, and headaches. The development of automated visualization systems based on stereo cameras can enhance procedural accuracy. The use of personalized physical models created through rapid prototyping increases the effectiveness of training systems. However, the need to wear 3D glasses and the difficulty in cleaning the lenses remain issues. Future prospects include the application of such systems in telemedicine services for remote consultations.

Keywords: 3D endoscopy, sinus surgery, automated visualization systems, physical models, human health.

DOI: 10.31649/1681-7893-2024-47-1-128-139

I. ВСТУП

Сучасні технології ендоскопії зараз є одними з найбільш поширеними для проведення діагностики та малоінвазивних втручань [1, 2]. Використання ендоскопічних підходів дозволяє не лише візуалізувати внутрішні структури організму людини, але й здійснювати малоінвазивні хірургічні втручання.

На сучасному етапі розвитку технологій, ендоскопічні методи стали ще більш прецизійними, достовірними та ефективними, зокрема у ринології для проведення огляду верхніх дихальних шляхів та оперативних втручань у носовій порожнині та придаткових пазухах, де вони зараз фактично є «золотим стандартом».

Розвиток систем стереозору розкриває нові можливості перед ендоскопічними системами [3, 4]. Можливості стереобачення розкривають додаткові переваги в ендоскопії за рахунок оцінки глибини оглядового простору [4, 5]. Тому, доцільним є визначити характеристики стереоендоскопічних систем, які могли би за типовими оптико-геометричними показниками застосовуватись в ринології та надавати додаткову інформацію лікарю при візуалізації анатомічних структур.

II. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

Основна мета цієї роботи полягає в оцінці показників та можливостей сучасних стереоендоскопічних систем для візуалізації анатомічних структур в ринології.

Верхні дихальні шляхи являють собою складну сукупність анатомічних кісткових хрящових та м'якотканинних структур і повітряних порожнин [6, 7], що можна бачити з комп'ютерної томографії на характерній мультипланарній реконструкції даних спіральної комп'ютерної томографії в сагітальній проекції (рис. 1). Дослідженнями впливу анатомічних структур носової порожнини при різних режимах дихання саме на функцію верхніх дихальних шляхів саме займається функціональна ринологія, де ендоскопічні методи обстеження дозволяють візуалізувати конфігурацію інтраназальних структур (рис. 2) [4, 8-10].

Якщо подивитися ретроспективно, то ендоскопічна техніка зазнавала ряду змін від першої документальної згадки про ендоскоп у 1700—1600 році до н. е. до сучасності. Наразі світова спільнота вже декілька десятиріч користується жорсткими ендоскопами, які мають варіативні кути огляду, але швидкі темпи розвитку сучасних технологій вимагають постійного удосконалення обладнання, щоб забезпечити максимальну точність діагностики та мінімізувати ризики ускладнень.

Серед завдань, що постають перед сучасною ендоскопією, одним з перших є повнота візуалізації анатомічних структур інтра- та постопераційно для попередження рецидивів захворювання [1]. Жорсткі ендоскопи не дають змогу оглянути всі стінки придаткових пазух, для більш широкого огляду операційного поля доводиться вдаватися до додаткової резекції здорових тканин та функціональних структур, таких як: носослізна протока або нижня носова раковина. Подібний підхід йде всупереч із принципами функціональної ендоскопічної риносинусохірургії та підвищує ризики виникнення ускладнень [1,31].



Рисунок 1 – Приклад візуалізації верхніх дихальних шляхів за даними спіральної комп'ютерної томографії за мультипланарною реконструкцією в сагітальній проекції

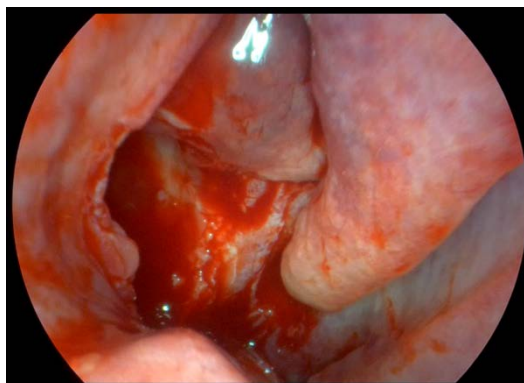


Рисунок 2 – Приклад ендоскопічної візуалізації носової порожнини

Застосування гнучких ендоскопів показало чудові результати в хірургічній практиці. Зокрема, інтраопераційне використання гнучкого ринофаринголарингоскопа Karl Storz дозволило ефективно візуалізувати найважкодоступніші місця лобних пазух, такі як латеральна кишеня і верхня стінка орбіти. У цих випадках гнучкий ендоскоп дозволив повністю видалити патологічний вміст, уникнути додаткової резекції здорової тканини та запобігти ускладненням, таким як кровотеча, лікворея та аносія [11].

Оцінити точний діапазон огляду верхньощелепного синусу (ВЩС) у людини складно. Для порівняння візуального діапазону жорсткого та гнучкого ендоскопів була створена модель ВЩС, надрукована на 3D-принтері, з внутрішньою поверхнею, покритою сітчастим проградуйованим папером. Дослідження показало, що площа огляду під жорстким ендоскопом з кутом 0° становила $11,625 \text{ см}^2$ (22,46% від загальної площі), під кутом 45° – $22,25 \text{ см}^2$ (43%), а під кутом 70° – 26 см^2 (50,24%). Таким чином, жорсткий ендоскоп з кутом 70° забезпечує найбільший діапазон огляду серед жорстких ендоскопів. Обсяг спостереження гнучким ендоскопом значно перевищує показники жорстких ендоскопів і становить $34,25 \text{ см}^2$ (66,18% від загальної площі). Проте гнучкість інструменту ускладнює його просування в напрямку стінок синуса, тоді як жорстким ендоскопом з кутом огляду 45° або 70° легше маневрувати, але напрямок огляду може не відповідати напрямку інструменту, що може призводити до плутанини. Гнучкі ендоскопи також виявилися більш зручними для післяопераційного огляду. Пацієнти відзначають менший дискомфорт під час процедури, оскільки гнучкий ендоскоп є м'якшим і спричиняє менший тиск на навколишні тканини [12]. Ендоскоп PliENT, довжиною 370 мм та діаметром стрижня 2,3 мм, є найтоншим активним гнучким ендоскопом, розробленим для хірургії верхньощелепних пазух. Втім, експерименти з використанням реалістичних моделей, надрукованих на 3D-принтері, виявилися неможливими через відсутність специфічної текстури та кольору тканин, які служать важливими анатомічними маркерами для хірургів. Найчастіше в ендоскопічній хірургії носових пазух використовуються ендоскопи з кутом огляду 0° і 30° , тому саме вони були вибрані для порівняння. Під час експериментів було встановлено пряму залежність між об'ємом видаленої тканини та повнотою візуалізації стінок верхньощелепної пазухи. Ендоскоп PliENT дозволив хоча б частково візуалізувати всі стінки верхньощелепної пазухи при виконанні класичної медіальної антростомії. Зокрема, задню та бічні стінки можна було оглянути повністю, тоді як медіальну, нижню та передню стінки – частково, на площі понад 50% їх поверхні. Було встановлено, що максилектомія 2-го типу забезпечує повну візуалізацію всіх стінок верхньощелепної пазухи. Що стосується досвіду хірургів з різними інструментами та робочого навантаження, яке вони відчували, результати тесту NASA-TLX показали, що робота з ендоскопом PliENT вимагає більше розумових та фізичних зусиль порівняно з роботою з жорсткими ендоскопами. Крім того, значення має досвід роботи в роботизованій хірургії, а хірургам потрібно певний час для адаптації до нового інструменту [13]. Деякі гнучкі ендоскопи також оснащені модулем вузькосмугової візуалізації (NBI), який дозволяє виявляти дрібні кровоносні судини під слизовою оболонкою. Це широко використовується в отоларингології для виявлення передракових і злоякісних уражень. Гнучкі ендоскопи мають ще одну перевагу — додатковий канал для введення щипців для біопсії, хоча це дещо зменшує кут огляду ендоскопа. Розробка гнучких інструментів залишається важливим напрямком досліджень.

Серед жорстких ендоскопів виділяються системи із рухомим кінцевим модулем, як-от «Peregrine Drivable ENT Scope», який отримав схвалення FDA у 2017 році. Це одноразовий синус-ендоскоп з рухомим наконечником діаметром 2,3 мм, дистальним чіпом, що забезпечує поле зору 120° і світлодіодним освітленням. Ендоскоп може повертатися на кути від 0° до 125° . Дослідження на 17 пацієнтах показали, що успіх візуалізації анатомічних орієнтирів за допомогою керованого ендоскопа становив 98,3%, порівняно з 42,7% для стандартних жорстких ендоскопів ($p < 0,001$). Хірурги оцінили зручність використання керованого ендоскопа на понад 4 бали (за шкалою від 1 до 5). Здатність зрошувати пазухи отримала середню оцінку 4,3, а якість зображення — 3,4. Пацієнти, оцінені після операції, повідомили про слабкий біль і високу переносимість процедури. Системи надвисокої чіткості (UHD) 4K також мають значні переваги, особливо в хірургії основи черепа. Поєднання з системою NBI дозволяє виділити судинні особливості тканин, що важливо для розпізнавання патологічних тканин і повної резекції без рецидиву захворювання. Серед недоліків цих систем відзначають спеціальні налаштування колірної гами, великі вимоги до місця зберігання даних і простору в операційній. Однак висока роздільна здатність і детальне представлення анатомічних структур підвищують безпеку та ефективність хірургічних процедур [14-16].

При порівнянні традиційної 2D ендоскопії з 4-K ультра-HD ендоскопією та тривимірною (3D) ендоскопією. Було проаналізовано 74 випадки оперативних втручань з використанням 3D/HD та/або 2D/4K ендоскопії, а також 12 випадків із застосуванням 2D/SD (стандартної роздільної здатності) при трансназальних нейрохірургічних втручаннях. Виявилось, що 3D/HD має перевагу на назальній фазі завдяки інтуїтивному сприйняттю глибини, тоді як 2D/4K демонструє кращі результати на інтрадуральній фазі завдяки високій якості зображення. Тривалість операції на назальній фазі з 3D/HD та інтрадуральною фазою з 2D/4K була значно коротшою, ніж з 2D/SD. Також покращення в часі та точності зшивання твердої мозкової оболонки дна селярної кістки спостерігалось у порядку: 2D/SD, 2D/4K, 3D/HD. Тривимірна ендоскопія, яка з'явилася у 2012 році, стала революційною технологією в медичній діагностиці та хірургії, з кожним днем розширюючи свій потенціал та можливості. Її прийняли з надією на покращення стереопсису, що компенсує втрату бінокулярного зору при ендоскопічній хірургії. З

моменту появи 3D-ендоскопи зазнали значної еволюції в частині покращення чіткості зображення та якості самих ендоскопів. Дослідження, проведене серед студентів та лікарів-ординаторів з невеликим досвідом в ендоскопії (менше 10 операцій/асистенцій), показало, що 77% з 35 опитаних хірургів у віці близько 28 років віддають перевагу 3D-ендоскопам. Розвиток нових технологій вимагає нових підходів та навичок, які потребують часу для освоєння. Дослідження, учасники якого були поділені на групи новачків (без ендоскопічного досвіду), середнього рівня (до 10 років досвіду) та експертів (більше 10 років досвіду) на основі попереднього ендоскопічного досвіду, не виявило статистично значущої різниці в часі чи точності виконання завдання зшивання твердої мозкової оболонки з ендоназальним доступом. Молоді хірурги надавали перевагу 3D-ендоскопам за їхню візуалізацію, тоді як досвідчені хірурги більше звикли до традиційних 2D-ендоскопів, що, ймовірно, пов'язано з їхньою адаптацією та звичкою до 2D-ендоскопів, які простіші у використанні [17-19].

У проспективному рандомізованому контрольованому дослідженні 46 пацієнтів з хронічним поліпoidним риносинуситом пройшли функціональну ендоскопічну операцію на приносових пазухах (FESS) з використанням одного з трьох ендоскопів: 2D 0° високої чіткості (HD), 3D 0° стандартної чіткості (SD) і 3D 0° HD. Чотири хірурги оцінювали ендоскопи за такими критеріями, як стереоскопічне сприйняття глибини, різкість та яскравість зображення, а також комфорт використання під час операції. Вони зазначили, що яскравість 2D HD значно перевищувала яскравість 3D SD ($p = 0,009$), тоді як яскравість 3D HD була значно кращою порівняно з 3D SD ($p = 0,038$). Стереоскопічне сприйняття глибини 3D SD оцінювалося значно краще, ніж 2D HD ($p = 0,021$), тоді як 3D HD показало найкращі результати у цьому параметрі ($p = 0,0001$). Комфорт використання був значно вищим у групі 3D HD порівняно з 2D HD ($p = 0,025$). Висновки свідчать, що 3D HD ендоскопія покращує стереоскопічне сприйняття глибини, яскравість операційного поля та інтраопераційну візуалізацію. У рандомізованому перехресному дослідженні з використанням кадаверного матеріалу 30 хірургів виконували п'ять завдань різної складності. Результати показали, що при використанні 3D HD ендоскопії в другому раунді завдань (перший 2D - другий 3D), учасники виконували завдання найшвидше. Проте, при використанні 3D HD у першому раунді завдань (перше 3D - друге 2D), час виконання завдань був найдовшим. Не було істотних відмінностей у часі виконання завдань між 2D HD та 3D HD у першому раунді. Оцінка характеристик ендоскопів показала, що 3D HD отримав найвищі оцінки за різкістю зображення ($P < 0,01$), якістю кольору ($P < 0,01$) та представленням глибини ($P = 0,02$). Крім того, роздільна здатність ($P < 0,01$) і точність виконання процедур ($P < 0,01$) були оцінені значно краще для 3D HD ендоскопа, тоді як суб'єктивне поле зору не мало істотних відмінностей ($P = 0,01$). Ефективність хірургічного втручання залежить від наявності і якості сенсорного зворотного зв'язку. Додаткові сигнали глибини, такі як текстура тканини і відтінок інтраназальних структур, сприяють більш точному виконанню процедур. Присутність справжньої слизової оболонки носа в операційному полі підвищує достовірність дослідження. Проте, відомим недоліком 3D HD ендоскопії є схильність до забруднення оптики слизом або кров'ю, що призводить до розмиття зображення. Це негативно впливає на якість зображення 3D ендоскопів більше, ніж на 2D ендоскопи, особливо ті, що використовують технологію «око комах» [20-21].

У проспективному рандомізованому багатоцентровому дослідженні взяли участь 80 пацієнтів із хронічним риносинуситом з поліпами та без них, які не мали попереднього хірургічного втручання. Пацієнтам виконували функціональну ендоскопічну операцію на пазухах (FESS) з використанням 2D-ендоскопії з одного боку та 3D-ендоскопії з іншого боку. Оцінювали тривалість операції, а також суб'єктивні враження хірургів від візуалізації та застосування 3D-ендоскопії, використовуючи анкету з 20 пунктів. Хірурги пройшли навчання 3D-техніці для уникнення упередженості через тривалий попередній досвід використання 2D-ендоскопії. За якістю зображення 2D перевершувала 3D у всіх аспектах, окрім «розпізнавання деталей», «сприйняття глибини» та «3D ефекту» (у верхньощелепній пазусі 2D дещо краща через відсутність виступаючих структур). За зручністю 2D також перевершувала 3D, за винятком «ваги ендоскопів». Середня тривалість операції становила 26,1 хвилини для 2D та 27,4 хвилини для 3D, без статистично значущої різниці ($P = 0,219$). Найбільша перевага 3D полягала в кращому розпізнаванні анатомічних деталей та глибини, що є особливо корисним для навчання, виділення топографічних зв'язків з критичними анатомічними структурами навколоносових пазух.

Недоліками 3D є необхідність носіння 3D-окулярів, додаткові зусилля при очищенні лінз, погіршення якості зображення та складності з підключенням обладнання. Також об'єктив і камера є єдиним цілим, що ускладнює кутову ендоскопію. Дослідження свідчить, що 3D-ендоскопічна технологія є корисним доповненням до стандартних методів, особливо для навчання та розуміння анатомії навколоносових пазух і основи черепа. Виявлено, що під час клінічного дослідження з 52 ендоназальних хірургічних втручань використання 3D-ендоскопа показало значно швидше виконання операцій порівняно з 2D, хоча це було статистично недостовірною. Відзначено статистично значуще зниження використання хірургічної навігаційної системи в групі 3D. Також спостерігалось статистично незначуще

збільшення дискомфорту хірургів при використанні 3D-ендоскопа, деякі з них зазнали побічних ефектів, таких як запаморочення, напруження очей, втома, мігрень та головний біль. Під час розтину трупів з 3D-ендоскопом спостерігалось покращення сприйняття глибини при демонстрації анатомічних орієнтирів порівняно з 2D-ендоскопом. Середній час розтину кадаврів не мав статистично значущих відмінностей між 2D та 3D. Однак трупне дослідження зосереджене на якісному порівнянні підходів і анатомічних орієнтирів з використанням 3D-ендоскопії як нового навчального інструменту [22-23].

ІІІ. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Проведені дослідження характеризували якісне і достатньо суб'єктивне відчуття покращення візуалізації операційного поля в режимі стереоендоскопії, тому доцільно оцінити саме чисельні характеристики щодо сприйняття простору, які можна отримати з системи ендоскопічних стерео камер (див. рис. 3).

Стереоскопічний паралакс P розраховується виходячи з формули

$$P = \frac{B \cdot F}{d} \quad (1)$$

де B – стереобаза;

F – фокусна відстань об'єктиву;

d – відстань до об'єкту.

Виходячи з цієї формули (1), відстань від об'єкту до об'єктиву буде визначатись як

$$d = \frac{B \cdot F}{P} \quad (2)$$

Фокусна відстань обирається відповідно фокусної відстані стандартного 50 мм об'єктиву. Стереобаза відповідно до діаметру сучасних ендоскопів обирається як 2 та 4 мм [1].

При візуальному сприйнятті зображення радіус (дистанція) d_0 стереоскопічного зору згідно з формулою (2) за допомогою оптичного пристрою, такого як ендоскоп, приймається з урахуванням визначення мінімального паралакса P_0 як помноження кутового розрізнення ока людини $\delta_0=1'$ на відстань спостереження. При реєстрації зображення цифровими камерами як мінімальний паралакс P_0 обирається розмір елемента сенсора зображення. При використанні сучасних матричних сенсорів зображень з розміром елементів в діапазоні від 1 до 10 мкм та обраних стереобазах, максимальна дистанція стереозору становить декілька десятків метрів, що є більш ніж достатньою для ендоскопічних систем з дистанцією огляду до 10 см.

Просторове розрізнення вздовж осі z (яке саме надає стереозор) визначається як мінімальна відстань, для якої сприймається різниця сприйняття об'єкту по глибині за формулою

$$\Delta_z = \frac{L^2 \Delta_d}{F \cdot B} \quad (3)$$

Це демонструє квадратичну залежність розрізнення вздовж осі z від відстані L до об'єкту в полі спостереження і лінійну від величини стереобаз B . На рисунку 4 наведені залежності просторового розрізнення вздовж осі z системи стереоендоскопічних камер від відстані до об'єкта спостереження при типових стереобазах 2 мм та 4 мм, відповідно. Максимальні значення розрізнення складають 160 мкм та 80 мкм, відповідно, що свідчить все ж про необхідність тримати максимально можливу стереобазу.

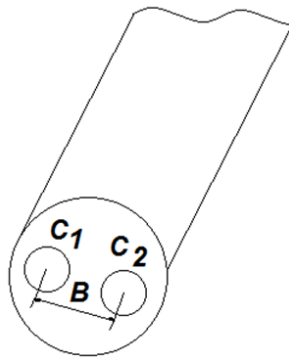


Рисунок 3 - Схематичне зображення стереоендоскопу з двома камерами C₁ та C₂ та стереобазою B

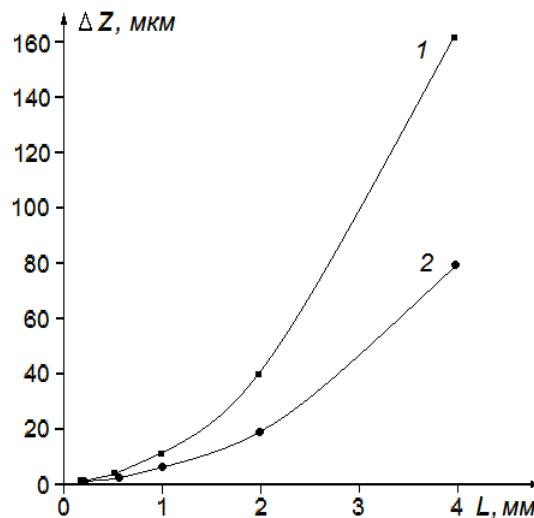


Рисунок 4 – Залежність просторового розрізнення системи стереоендоскопічних камер при наступних параметрах $\Delta=10\text{мкм}$; $F=50\text{ мм}$ (1 – $B = 2\text{ мм}$, 2 – $B = 4\text{ мм}$)

В автоматизованому режимі можливо створити окрему додаткову систему візуалізації для отримання карти глибини об'єктів в операційному полі. Це створюється на основі отримання кадрів від лівої та правої камери (рис. 5, а та б, відповідно) та автоматизованого підрахунку паралаксів об'єктів в елементах зображення (рис. 6, а та б, відповідно). На рисунку 6 показані схематично визначені контури об'єкту з ендоскопічної картини на рисунку 5 та визначено приклади відстаней до об'єкту від лівої границі кадрів x_r та x_l , відповідно, на лівому та правому зображеннях. Паралакси розташування кожного n - го об'єкту для формули (2) і при відомому лінійному розмірі елементу сенсору зображення будуть визначатись як

$$P_n = (x_{ln} - x_{rn}) \cdot a = \Delta x_n \cdot a . \quad (4)$$

Це дозволить створити автоматизовану систему візуалізації карти глибини об'єктів в операційному полі, що є дуже важливим для оцінки стану носової порожнини та придаткових пазух носа [24-26]. Таке завдання може бути вирішено на основі використання алгоритмів потокової обробки медичних даних та залучення засобів штучного інтелекту при аналізі медичних зображень [27].

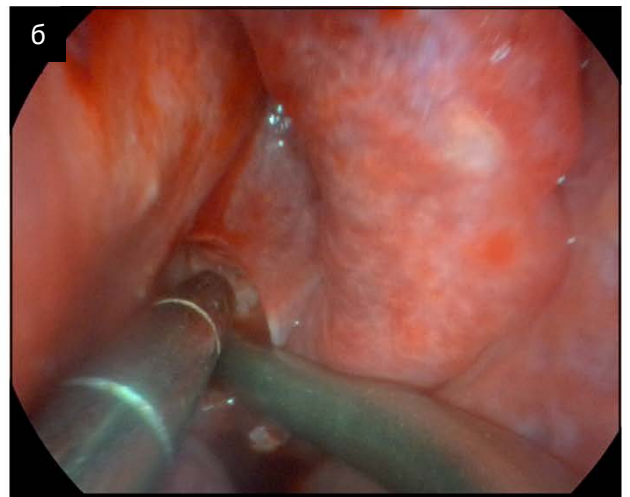
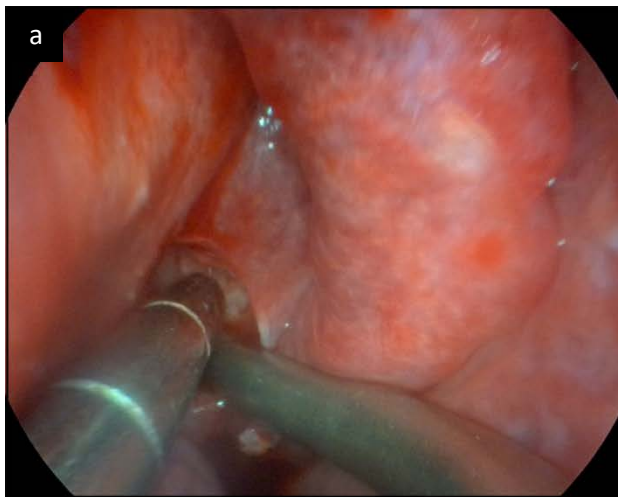


Рисунок 5 – Приклад стереоендоскопічної візуалізації верхніх дихальних шляхів: а – ендоскопічна картина з лівої камери, б – ендоскопічна картина з правої камери

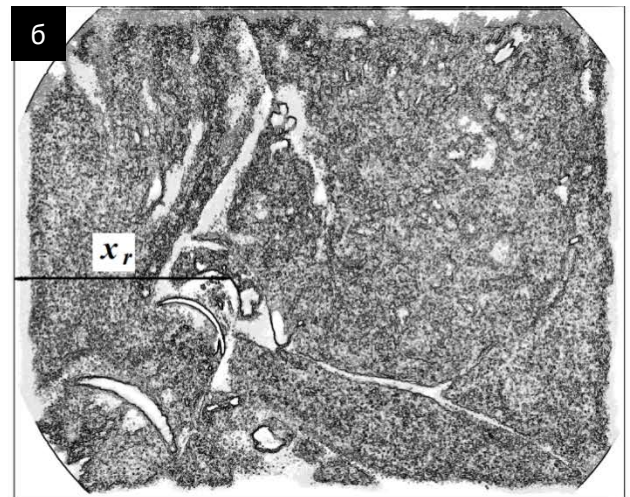
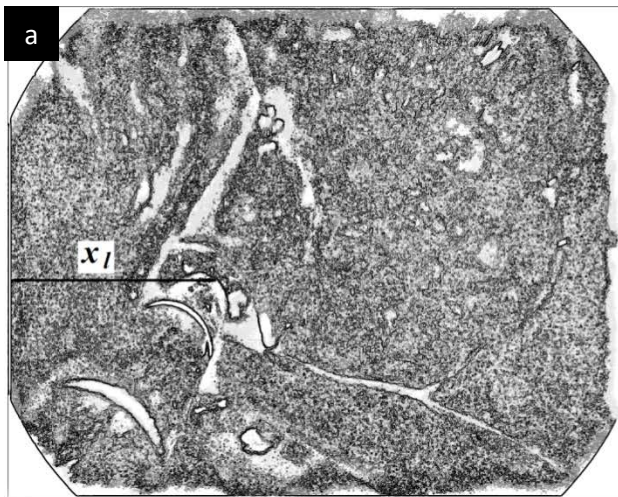


Рисунок 6 – Приклад стереоендоскопічної візуалізації верхніх дихальних шляхів після контурної сегментації: а – ендоскопічна картина з лівої камери, б – ендоскопічна картина з правої камери.

За допомогою сучасних технологій швидкого прототипування [28] можливо створення за даними комп'ютерної томографії персоніфікованих натурних моделей носової порожнини (рис. 7) та розробка тренінгових систем, які враховують переваги стерео ендоскопії та дозволяють отримати перші практичні навички ендоскопічної візуалізації.



Рисунок 7 – Приклад створення тренінгової системи для опанування навичок ендоскопії на основі прототипування персоніфікованих даних комп'ютерної томографії

ВИСНОВКИ

Наведений підхід та його аналіз свідчить, що стереоендоскопія покращує стереоскопічне сприйняття глибини, яскравість операційного поля та інтраопераційну візуалізацію. Наведені розрахунки можливо використовувати для оцінки можливостей стерео ендоскопічних систем в різних галузях медицини. При цьому можна бачити, що для підвищення просторового розрізнення вдовж осі z доцільним є використання максимально можливої стереобазис. Також точність просторової візуалізації зменшується пропорційно квадрату відстані до об'єктів спостереження, що необхідно враховувати при проектуванні таких систем та оцінки операційного поля.

Стереоендоскопічна технологія є корисним доповненням до стандартних методів, особливо для навчання та розуміння анатомії навколоносових пазух і основи черепа. Додаткові дані щодо глибини простору спостереження сприяють більш точному виконанню процедур. Найбільша перевага стереоендоскопії полягає в кращому розпізнаванні анатомічних деталей та глибини, що є особливо корисним для навчання, виділення топографічних зв'язків з критичними анатомічними структурами навколоносових пазух. Недоліками стереоскопічної візуалізації є необхідність носіння 3D-окулярів, додаткові зусилля при очищенні лінз (при навіть незначному забрудненні однієї з лінз взагалі зникає стереоскопічний ефект), погіршення якості зображення та складності з підключенням обладнання. При цьому можливе збільшення дискомфорту хірургів при використанні 3D-ендоскопа, деякі з них зазнали побічних ефектів, таких як запаморочення, напруження очей, втома, мігрень та головний біль [22, 23]. Також об'єктив і камера є єдиним цілим, що ускладнює куту ендоскопію.

Перспективою роботи є розробка тренінгових систем за допомогою створення натурних моделей анатомічних областей за допомогою 3D прототипування по реальним персоніфікованим даним комп'ютерної томографії та використання таких систем у телемедичних сервісах [29, 30] для проведення дистанційних консультацій на основі огляду пацієнта на відстані.

Дослідження виконано за підтримки гранту Національного фонду досліджень України 2022.01/0135.

REFERENCES

1. Інтелектуальні технології моделювання хірургічних втручань: монографія / О. Г. Аврунін, С. Б. Безшапочний, Є. В. Бодяньський, В. В. Семенець, В. О. Філатов – Харків: ХНУРЕ, 2018. – 224 с.
2. Сучасні інтелектуальні технології функціональної медичної діагностики : монографія / О. Г. Аврунін, Є. В. Бодяньський, М. В. Калашник, В. В. Семенець, В. О. Філатов. – Харків: ХНУРЕ, 2018. – 236 с.

3. Selivanova K.G., Avrunin O.G., Tymkovych M.Y., etc. et al., "3D visualization of human body internal structures surface during stereo-endoscopic operations using computer vision techniques", *Przeglad Elektrotechniczny*, vol. 2021, no. 9, pp. 30-33, 2021.
4. Сокольников А.О., Кандава А.С., Тисевич Д.В., Аврун О.Г. Особливості розрахунку систем стерео-ендоскопії, Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я : тези доповідей XXXII міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2024, 22-25 травня 2024 р., Харків : НТУ «ХПІ». – С. 1360.
5. Сокольников А., інш. Аспекти моделювання хірургічних втручань на придаткових пазухах носа Сучасні технології біомедичної інженерії : матеріали III міжнародної науково-технічної конференції, 8–10 травня 2024 р. – Вінниця : ВНТУ, 2024. – С. 188-190.
6. Інтелектуальні технології в медичній діагностиці, лікуванні та реабілітації: монографія / [С.В. Павлов, О.Г. Аврун, С.М. Злепко, Є.В. Бодяньський та ін.]; за редакцією С. Павлова, О. Авруніна. – Вінниця: ПП «ТД «Едельвейс і К», 2019. – 260 с.
7. Сучасні методи діагностики респіраторно-ольфакторної функції: монографія / О. Г. Аврун, Я. В. Носова, В. В. Семенець, В. О. Філатов, Н. О. Шушляпіна. – Харків : ХНУРЕ, 2021. – 150 с. ISBN 978-966-659-300-2
8. Аврун О.Г., Бодяньський Є.В., Семенець В.В., Філатов В.О., Шушляпіна Н.О. Інформаційні технології підтримки прийняття рішень при визначенні порушень носового дихання: монографія.– Харків: ХНУРЕ, 2018. – 125 с.
9. Носова Я. В., Аврун О. Г., Шушляпіна Н. О., Абделхамід І. Ю., і Алі Саєд А. Б., «Порівняльний аналіз математичних та натурних моделей при визначенні коефіцієнту аеродинамічного носового опору», *Опт-ел. інженерг. техн.*, вип. 42, вип. 2, с. 33-43, Жов 2022.
10. Аврун О. О. Аналіз пневматичної потужності при диханні людини. *Радіоелектроніка та молодь в XXI столітті : матеріали 26-го Міжнародного молодіжного форуму*, 19-21 квітня 2022 р. Харків : ХНУРЕ, 2022. Т. 1. С. 40-41.
11. Carniol ET, Vázquez A, Patel TD, Liu JK, Eloy JA. Utility of intraoperative flexible endoscopy in frontal sinus surgery. *Allergy Rhinol (Providence)*. 2017 Jun 1;8(2):81-84. doi: 10.2500/ar.2017.8.0205. PMID: 28583231; PMCID: PMC5468760.
12. Xu Z, Zhang X, Dou X, Lin C, Wang H, Song S, Yu C, Cui X, Gao X. Flexible endoscopy in the visualization of 3D-printed maxillary sinus and clinical application. *Surg Endosc*. 2022 Oct;36(10):7827-7838. doi: 10.1007/s00464-022-09410-8. Epub 2022 Jul 26. PMID: 35882666; PMCID: PMC9485168.
13. Legrand J, Ourak M, Van Gerven L, Vander Poorten V, Vander Poorten E. A miniature robotic steerable endoscope for maxillary sinus surgery called PliENT. *Sci Rep*. 2022 Feb 10;12(1):2299. doi: 10.1038/s41598-022-05969-3. PMID: 35145155; PMCID: PMC8831515.
14. Choi AM, Brenner MJ, Gorelik D, Erbele ID, Crowson MG, Kadekade P, Takashima M, Santa Maria PL, Hong RS, Rose AS, Ostrander BT, Rabbani CC, Morrison RJ, Weissbrod PA, Tate AD, Kain JJ, Lina IA, Shaffer SR, Ahmed OG. New Medical Device and Therapeutic Approvals in Otolaryngology: State of the Art Review of 2021. *OTO Open*. 2022 Sep 23;6(3):2473974X221126495. doi: 10.1177/2473974X221126495. PMID: 36171808; PMCID: PMC9511340.
15. Van Zele T, Soudry E, Landsberg R, Gevaert P. A prospective, feasibility study to evaluate the efficacy and usability of a novel drivable endoscope in patients with chronic rhinosinusitis. *Eur Arch Otorhinolaryngol*. 2019 Sep;276(9):2499-2505. doi: 10.1007/s00405-019-05535-0. Epub 2019 Jul 5. PMID: 31278497.
16. Rigante M, La Rocca G, Lauretti L, D'Alessandris GQ, Mangiola A, Anile C, Olivi A, Paludetti G. Preliminary experience with 4K ultra-high definition endoscope: analysis of pros and cons in skull base surgery. *Acta Otorhinolaryngol Ital*. 2017 Jun;37(3):237-241. doi: 10.14639/0392-100X-1684. PMID: 28516968; PMCID: PMC5463515.
17. Uozumi Y, Taniguchi M, Nakai T, Kimura H, Umehara T, Kohmura E. Comparative Evaluation of 3-Dimensional High Definition and 2-Dimensional 4-K Ultra-High Definition Endoscopy Systems in Endonasal Skull Base Surgery. *Oper Neurosurg (Hagerstown)*. 2020 Sep 1;19(3):281-287. doi: 10.1093/ons/ozz426. PMID: 31960059.
18. Nassimizadeh A, Zaidi SM, Nassimizadeh M, Kholief A, Ahmed SK. Endoscopic training-is the future three-dimensional? *Laryngoscope Investig Otolaryngol*. 2018 Oct 3;3(5):345-348. doi: 10.1002/liv.2.207. Erratum in: *Laryngoscope Investig Otolaryngol*. 2019 Apr 11;4(3):374. PMID: 30410987; PMCID: PMC6209622.
19. Nebor I, Anderson Z, Mejia-Munne JC, Hussein A, Montemagno K, Fumagalli R, Labiad I, Patil Y, Andaluz N, Sedaghat AR, Zuccarello M, Forbes JA. 2D versus 3D Endoscopy: Head-to-Head Comparison in a Simulated Model of Endoscopic Endonasal Dural Suturing. *J Neurol Surg B Skull Base*. 2021 Nov 8;83(4):423-429. doi: 10.1055/s-0041-1736635. PMID: 35903652; PMCID: PMC9324314.

20. Albrecht T, Baumann I, Plinkert PK, Simon C, Sertel S. Three-dimensional endoscopic visualization in functional endoscopic sinus surgery. *Eur Arch Otorhinolaryngol*. 2016 Nov;273(11):3753-3758. doi: 10.1007/s00405-016-4040-3. Epub 2016 Apr 19. PMID: 27094054.
21. Ten Dam E, Helder HM, van der Laan BFAM, Feijen RA, Korsten-Meijer AGW. The effect of three-dimensional visualisation on performance in endoscopic sinus surgery: A clinical training study using surgical navigation for movement analysis in a randomised crossover design. *Clin Otolaryngol*. 2020 Mar;45(2):211-220. doi: 10.1111/coa.13494. Epub 2020 Jan 27. PMID: 31846558; PMCID: PMC7027512.
22. Tomazic PV, Sommer F, Treccosti A, Briner HR, Leunig A. 3D endoscopy shows enhanced anatomical details and depth perception vs 2D: a multicentre study. *Eur Arch Otorhinolaryngol*. 2021 Jul;278(7):2321-2326. doi: 10.1007/s00405-020-06495-6. Epub 2020 Dec 29. PMID: 33373011; PMCID: PMC8165070.
23. Kholief A, Ali A, Elwany S, Ahmed S, Youssef A, Zahran M. Evaluation of The Three-Dimensional Endoscopy in Basic and Extended Nasal Procedures: A Clinical and Cadaveric Study. *Int Arch Otorhinolaryngol*. 2023 Sep 14;27(4):e620-e624. doi: 10.1055/s-0042-1759604. PMID: 37876707; PMCID: PMC10593514.
24. Ismail, Husham Farouk, et al. The role of paranasal sinuses in the aerodynamics of the nasal cavities. *International Journal of Life Science and Medical Research* 2.3 (2012): 52-55.
25. Avrunin OG, Nosova YV, Abdelhamid IY, Pavlov SV, Shushliapina NO, Wójcik W, Kalizhanova A. Possibilities of automated diagnostics of odontogenic sinusitis according to the computer tomography data. *Sensors*. 2021;21(4):1198. (In English). DOI: <https://doi.org/10.3390/s21041198>
26. Avrunin OG, Nosova YV, Abdelhamid IY, Pavlov SV, Shushliapina NO et al. Research Active Posterior Rhinomanometry Tomography Method for Nasal Breathing Determining Violations. *Sensors*. 2021;21:8508. (In English). DOI: <https://doi.org/10.3390/s21248508>
27. Bodyansky Y., Shafronenko A., Rudenko D., Polubekhin A., Frolov D. Online image segmentation using reliable fuzzy clustering (2024) *CEUR Workshop Proceedings* , 3664, pp. 1–10.
28. Avrunin O. G. et al., “Application of 3D printing technologies in building patient-specific training systems for computing planning in rhinology,” *Information Technology in Medical Diagnostics II*, pp. 1–8, Feb. 2019, doi:10.1201/9780429057618-1.
29. Sokol, Y., Avrunin, O., Kolisnyk, K., & Zamiatin, P. (2020). Using medical imaging in disaster medicine. Paper presented at the 2020 IEEE 4th International Conference on Intelligent Energy and Power Systems, IEPS 2020 - Proceedings, 287-290. doi:10.1109/IEPS51250.2020.9263175
30. Avrunin, O., Kolisnyk, K., Nosova, Y., Tomashevskiy, R., & Shushliapina, N. (2020). Improving the methods for visualization of middle ear pathologies based on telemedicine services in remote treatment. Paper presented at the 2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology, KhPI Week 2020 - Conference Proceedings, 347-350. doi:10.1109/KhPIWeek51551.2020.9250090.
31. Wójcik, W., Pavlov, S., Kalimoldayev, M. (2019). *Information Technology in Medical Diagnostics II*. London: Taylor & Francis Group, CRC Press, Balkema book. – 336 Pages, <https://doi.org/10.1201/9780429057618>. eBook ISBN 9780429057618.

REFERENCES

1. Intelligent technologies for modeling surgical interventions: a monograph / O. G. Avrunin, S. B. Bezshapochnyi, E. V. Bodyanskyi, V. V. Semenets, V. O. Filatov – Kharkiv: Khnure, 2018. – 224 p.
2. Modern intellectual technologies of functional medical diagnostics: a monograph / O. G. Avrunin, E. V. Bodyanskyi, M. V. Kalashnyk, V. V. Semenets, V. O. Filatov. - Kharkiv: Khnure, 2018. - 236 p.
3. Selivanova K.G., Avrunin O.G., Tymkovych M.Y., etc. et al., "3D visualization of human body internal structures surface during stereo-endoscopic operations using computer vision techniques", *Przegląd Elektrotechniczny*, vol. 2021, no. 9, pp. 30-33, 2021.
4. Sokoltsov A.O., Kandala A.S., Tysyevich D.V., Avrunin O.G. Peculiarities of calculation of stereo endoscopy systems, *Information technologies: science, technology, technology, education, health: theses of reports of XXII international scientific and practical conference MicroCAD-2024, May 22-25, 2024, Kharkiv: NTU « KhPI*". - C. 1360.
5. Sokoltsov A., others. Aspects of modeling of surgical interventions on paranasal sinuses *Modern technologies of biomedical engineering: materials of the 3rd international scientific and technical conference, May 8-10, 2024 - Vinnytsia: VNTU, 2024. - C. 188-190.*

6. Intellectual technologies in medical diagnosis, treatment and rehabilitation: monograph / [S.V. Pavlov, O.G. Avrunin, S.M. Zlepko, E.V. Bodyansky and others]; edited by S. Pavlov, O. Avrunin. - Vinnytsia: PP "TD "Edelweiss and K", 2019. - 260 p.
7. Modern methods of diagnosis of respiratory-olfactory function: monograph / O. G. Avrunin, Y. V. Nosova, V. V. Semenets, V. O. Filatov, N. O. Shushlyapina. – Kharkiv: Khnure, 2021. – 150 p. ISBN 978-966-659-300-2
8. Avrunin O.G., Bodyanskyi E.V., Semenets V.V., Filatov V.O., Shushlyapina N.O. Information technologies for supporting decision-making in the determination of nasal breathing disorders: monograph. - Kharkiv: Khnure, 2018. - 125 p.
9. Nosova Ya. V., Avrunin O. G., Shushlyapina N. O., etc. "Comparative analysis of mathematical and natural models for determining the coefficient of aerodynamic nose drag", Opt. - email infenerg tech., vol. 42, issue 2, p. 33-43, October 2022.
10. Avrunin O. O. Analysis of pneumatic power during human breathing. Radio electronics and youth in the 21st century: materials of the 26th International Youth Forum, April 19-21, 2022. Kharkiv: KhNURE, 2022. Vol. 1. P. 40-41.
11. Carniol ET, Vázquez A, Patel TD, Liu JK, Eloy JA. Utility of intraoperative flexible endoscopy in frontal sinus surgery. *Allergy Rhinol (Providence)*. 2017 Jun 1;8(2):81-84. doi: 10.2500/ar.2017.8.0205. PMID: 28583231; PMCID: PMC5468760.
12. Xu Z, Zhang X, Dou X, Lin C, Wang H, Song S, Yu C, Cui X, Gao X. Flexible endoscopy in the visualization of 3D-printed maxillary sinus and clinical application. *Surg Endosc*. 2022 Oct;36(10):7827-7838. doi: 10.1007/s00464-022-09410-8. Epub 2022 Jul 26. PMID: 35882666; PMCID: PMC9485168.
13. Legrand J, Ourak M, Van Gerven L, Vander Poorten V, Vander Poorten E. A miniature robotic steerable endoscope for maxillary sinus surgery called PliENT. *Sci Rep*. 2022 Feb 10;12(1):2299. doi: 10.1038/s41598-022-05969-3. PMID: 35145155; PMCID: PMC8831515.
14. Choi AM, Brenner MJ, Gorelik D, Erbele ID, Crowson MG, Kadekade P, Takashima M, Santa Maria PL, Hong RS, Rose AS, Ostrander BT, Rabbani CC, Morrison RJ, Weissbrod PA, Tate AD, Kain JJ, Lina IA, Shaffer SR, Ahmed OG. New Medical Device and Therapeutic Approvals in Otolaryngology: State of the Art Review of 2021. *OTO Open*. 2022 Sep 23;6(3):2473974X221126495. doi: 10.1177/2473974X221126495. PMID: 36171808; PMCID: PMC9511340.
15. Van Zele T, Soudry E, Landsberg R, Gevaert P. A prospective, feasibility study to evaluate the efficacy and usability of a novel drivable endoscope in patients with chronic rhinosinusitis. *Eur Arch Otorhinolaryngol*. 2019 Sep;276(9):2499-2505. doi: 10.1007/s00405-019-05535-0. Epub 2019 Jul 5. PMID: 31278497.
16. Rigante M, La Rocca G, Lauretti L, D'Alessandris GQ, Mangiola A, Anile C, Olivi A, Paludetti G. Preliminary experience with 4K ultra-high definition endoscope: analysis of pros and cons in skull base surgery. *Acta Otorhinolaryngol Ital*. 2017 Jun;37(3):237-241. doi: 10.14639/0392-100X-1684. PMID: 28516968; PMCID: PMC5463515.
17. Uozumi Y, Taniguchi M, Nakai T, Kimura H, Umehara T, Kohmura E. Comparative Evaluation of 3-Dimensional High Definition and 2-Dimensional 4-K Ultra-High Definition Endoscopy Systems in Endonasal Skull Base Surgery. *Oper Neurosurg (Hagerstown)*. 2020 Sep 1;19(3):281-287. doi: 10.1093/ons/ozz426. PMID: 31960059.
18. Nassimizadeh A, Zaidi SM, Nassimizadeh M, Kholief A, Ahmed SK. Endoscopic training-is the future three-dimensional? *Laryngoscope Investig Otolaryngol*. 2018 Oct 3;3(5):345-348. doi: 10.1002/lio2.207. Erratum in: *Laryngoscope Investig Otolaryngol*. 2019 Apr 11;4(3):374. PMID: 30410987; PMCID: PMC6209622.
19. Nebor I, Anderson Z, Mejia-Munne JC, Hussein A, Montemagno K, Fumagalli R, Labiad I, Patil Y, Andaluz N, Sedaghat AR, Zuccarello M, Forbes JA. 2D versus 3D Endoscopy: Head-to-Head Comparison in a Simulated Model of Endoscopic Endonasal Dural Suturing. *J Neurol Surg B Skull Base*. 2021 Nov 8;83(4):423-429. doi: 10.1055/s-0041-1736635. PMID: 35903652; PMCID: PMC9324314.
20. Albrecht T, Baumann I, Plinkert PK, Simon C, Sertel S. Three-dimensional endoscopic visualization in functional endoscopic sinus surgery. *Eur Arch Otorhinolaryngol*. 2016 Nov;273(11):3753-3758. doi: 10.1007/s00405-016-4040-3. Epub 2016 Apr 19. PMID: 27094054.
21. Ten Dam E, Helder HM, van der Laan BFAM, Feijen RA, Korsten-Meijer AGW. The effect of three-dimensional visualisation on performance in endoscopic sinus surgery: A clinical training study using surgical navigation for movement analysis in a randomised crossover design. *Clin Otolaryngol*. 2020 Mar;45(2):211-220. doi: 10.1111/coa.13494. Epub 2020 Jan 27. PMID: 31846558; PMCID: PMC7027512.
22. Tomazic PV, Sommer F, Treccosti A, Briner HR, Leunig A. 3D endoscopy shows enhanced anatomical details and depth perception vs 2D: a multicentre study. *Eur Arch Otorhinolaryngol*. 2021

- Jul;278(7):2321-2326. doi: 10.1007/s00405-020-06495-6. Epub 2020 Dec 29. PMID: 33373011; PMCID: PMC8165070.
23. Kholief A, Ali A, Elwany S, Ahmed S, Youssef A, Zahran M. Evaluation of The Three-Dimensional Endoscopy in Basic and Extended Nasal Procedures: A Clinical and Cadaveric Study. *Int Arch Otorhinolaryngol.* 2023 Sep 14;27(4):e620-e624. doi: 10.1055/s-0042-1759604. PMID: 37876707; PMCID: PMC10593514.
 24. Ismail, Husham Farouk, et al. The role of paranasal sinuses in the aerodynamics of the nasal cavities. *International Journal of Life Science and Medical Research* 2.3 (2012): 52-55.
 25. Avrunin OG, Nosova YV, Abdelhamid IY, Pavlov SV, Shushliapina NO, Wójcik W, Kalizhanova A. Possibilities of automated diagnostics of odontogenic sinusitis according to the computer tomography data. *Sensors.* 2021;21(4):1198. (In English). DOI: <https://doi.org/10.3390/s21041198>
 26. Avrunin OG, Nosova YV, Abdelhamid IY, Pavlov SV, Shushliapina NO et al. Research Active Posterior Rhinomanometry Tomography Method for Nasal Breathing Determining Violations. *Sensors.* 2021;21:8508. (In English). DOI: <https://doi.org/10.3390/s21248508>
 27. Bodyansky Y., Shafronenko A., Rudenko D., Polubekhin A., Frolov D. Online image segmentation using reliable fuzzy clustering (2024) *CEUR Workshop Proceedings* , 3664, pp. 1–10.
 28. Avrunin O. G. et al., “Application of 3D printing technologies in building patient-specific training systems for computing planning in rhinology,” *Information Technology in Medical Diagnostics II*, pp. 1–8, Feb. 2019, doi:10.1201/9780429057618-1.
 29. Sokol, Y., Avrunin, O., Kolisnyk, K., & Zamiatin, P. (2020). Using medical imaging in disaster medicine. Paper presented at the 2020 IEEE 4th International Conference on Intelligent Energy and Power Systems, IEPS 2020 - Proceedings, 287-290. doi:10.1109/IEPS51250.2020.9263175
 30. Avrunin, O., Kolisnyk, K., Nosova, Y., Tomashevskiy, R., & Shushliapina, N. (2020). Improving the methods for visualization of middle ear pathologies based on telemedicine services in remote treatment. Paper presented at the 2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology, KhPI Week 2020 - Conference Proceedings, 347-350. doi:10.1109/KhPIWeek51551.2020.9250090.
 31. Wójcik, W., Pavlov, S., Kalimoldayev, M. (2019). *Information Technology in Medical Diagnostics II*. London: Taylor & Francis Group, CRC Press, Balkema book. – 336 Pages, <https://doi.org/10.1201/9780429057618>. eBook ISBN 9780429057618.

Надійшла до редакції 21.03.2024р.

СОКОЛЬЦОВ АНДРІЙ –аспірант, Харківський національний університет радіоелектроніки, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, 61166, Ukraine, *e-mail: andrii.sokoltsov@nure.ua*,

АВРУНІН ОЛЕГ – д.т.н., професор, зав. кафедри біомедичної інженерії, Харківський національний університет радіоелектроніки, Kharkiv, 61166, Ukraine, *e-mail: oleh.avrunin@nure.ua*

КОВАЛЬ ЛЕОНІД – к.т.н., доцент, зав. кафедри біомедичної інженерії та оптико-електронних систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, Україна, *e-mail: koval.l@vntu.edu.ua*

КАДУК ОЛЕКСАНДР – Ph.D., доцент кафедри комп’ютерної інженерії, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, Україна, *e-mail: o.kaduk@gmail.com*

ANDRII SOKOLTSOV, OLEH AVRUNIN, LEONID KOVAL, OLEKSANDR KADUK

EVALUATION OF INDICATORS OF STEREOENDOSCOPIC SYSTEMS IN RHINOLOGY

Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine
Vinnytsia National Technical University, 21021, 95 Khmelnytske Shosse, Vinnytsia, Ukraine