

УДК 616.137.83/621.397

В.Й. Котовський, канд. техн. наук

## Неінвазивні дослідження судин нижніх кінцівок за допомогою комплексного методу

**Цель данной работы – демонстрация возможностей комплексного метода неинвазивных исследований, на примере контроля парциального давления кислорода в подкожных тканях нижних конечностей в границах аномальных температурных зон при проведении функциональных проб у здоровых людей и лиц с признаками патологии. Одновременный мониторинг распределения поверхностной температуры и парциального давления кислорода в подкожных тканях даёт возможность быстрее и более достоверно получать информацию о состоянии сосудов и микрососудов.**

**In the present work the features of complex method for non-invasive studies is demonstrated using as an example the control of partial pressure of oxygen in subcutaneous tissues of the lower extremities within the anomalous thermal zones when functional tests were conducted for healthy people and people with pathological signs. Simultaneous monitoring of distribution of the surface temperature and partial pressure of oxygen in subcutaneous tissues allows get information about vessels and micro vessels faster and more reliably.**

**Ключевые слова:** *неинвазивные исследования, биологический объект, инфракрасная термография, кислород, парциальное давление кислорода*

### Вступ

Знання про зв'язок певних ділянок шкірного покрову (ШП) біологічного об'єкту (БО) яким є людина, з внутрішніми органами, судинами та мікросудинами, надає можливість отримувати інформацію про стан органів через вивчення певної зони ШП і особливостей судинного русла [1]. Зміни у мікросудинах призводять до змін функціональних характеристик пов'язаних з ним ділянок ШП. Однією з таких змін є температурна реакція, що чітко відбиває стан мікросудин. Друга зміна – це парціальний тиск кисню ( $pO_2$ ) в крові, вимірювання якого надасть можливість судити саме про зміни на рівні капілярів і венул, чим і обумовлений розвиток порушень.

Рівень  $pO_2$  в нормальних зонах і зонах із аномальною температурою буде відрізнятися певною залежністю, і можливість виявлення цієї

залежності буде свідчити про рівень кровоплину в даній області.

При виконанні наукових досліджень [2] було запропоновано метод вимірювання температури та контролю капілярної системи людини при одночасному синхронному аналізі розподілення інфрачервоного (ІЧ) випромінювання шкіри та розподілення кисню ( $O_2$ ) в підшкірних тканинах, як відображення біохімічних процесів на досліджуваній ділянці ШП.

Запропонований метод надає можливість вирішити актуальну медичну задачу – адекватно оцінити уражені кровоносні судини, що дуже важливо як при ранньої діагностиці так і при проведенні терапевтичного лікування або хірургічного втручання та задовольняє таким важливим критеріям як: безпека, достовірність, простота, невелика вартість і є повністю неінвазивним.

Інтерес представляє практична реалізація методу для виявлення порушень кровоплину в організмі на ранній стадії. Особливо це важливо при діагностуванні порушень капілярного кровоплину, що призводить до тяжких ускладнень.

Мета даної роботи полягає у демонстрації можливостей запропонованого авторами [3] комплексного методу неінвазивних досліджень БО, на прикладі контролю динаміки транскутанного (черезшкірного)  $pO_2$  підшкірних тканин нижніх кінцівок.

### Постановка задачі

Важливим фактором визначення ступеню патології судин дистальних відділів кінцівок є порушення кисневого статусу (КС) підшкірних тканин, яке проявляється у виді регіонарної гіпоксії. Одним із методів контролю за ступеню ішемії є транскутанне вимірювання  $pO_2$  у підшкірних тканинах, значення якого дуже добре корелює з  $pO_2$  артеріальної крові як у новонароджених дітей, так і у дорослих [4].

Найбільшу інформативність цей показник має при проведенні функціональних проб [5]. Справа в тому, що величина  $pO_2$  є результуючою функцією яка залежить від ряду факторів, таких як тканинне дихання, коефіцієнт дифузії  $O_2$  і його парціальний тиск в артеріальної крові, порушення місцевого кровоплину і т. інш.

Незважаючи на велику кількість робіт присвячених вивченню  $pO_2$  у підшкірних тканинах в

умовах ішемічних навантажень і подальшої постішемічної реактивної гіперемії, досліджень пов'язаних зі зміною цього показника при проведенні функціональної проби в сполученні з контролем температурних змін, у доступній науковій літературі не виявлено.

В роботах [6, 7] показано, що технічні можливості сучасної інфрачервоної термографії (ІЧТ) надають можливість широко використовувати її у біомедичних дослідженнях. Термограф реєструє теплове випромінювання, що надходить з поверхні ШП, а отримані термограми являють собою теплові проекції тих, або інших органів (судин) на ШП.

Одночасний моніторинг розподілу поверхневої температури і  $pO_2$  у підшкірних тканинах дозволяє швидше і більш достовірно отримувати інформацію про стан судин та мікросудин, а також додаткову інформацію про тканинне дихання, ступінь розвитку компенсаторних механізмів, зміни метаболізму при різних патологічних станах, що пов'язано з порушенням біохімічної синхронізації, як самої чутливої і самої дієвої.

### Інструментальна складова і методика досліджень

У якості інструментальної складової методу використовувався розроблений раніше лабораторний дослідницький комплекс «ОксіТерм» (рис. 1), можливості якого описано в роботі [2]. До складу комплексу входить термографічний канал (1) для дистанційної реєстрації ІЧ випромінювання пацієнта, реалізований на матричному термографі ThermaCAM E300 в діапазоні 7–14 мкм, канал контролю КС організму (2), реалізований на базі пристрою [8] з транскутанним сенсором кисню (ТСК), персональний комп'ютер (ПК) типу Notebook (3) і спеціально розроблений штатив (4).

Дослідження проводились в навчально-науковій лабораторії неінвазивних методів досліджень біологічних об'єктів НТУУ «КПІ», у приміщенні обладнаному згідно вимог [9].

В дослідженнях добровільно приймали участь студенти і співробітники санаторіо-профілакторію університету, у віці від 20 до 60 років, як з відомими діагнозами, встановленими традиційними методами, так і пацієнти без ознак патологій.

Дослідження проводились у стані спокою і функціональних навантажень. Було використано навантаження двох видів:

1. Підняття ніг під кутом  $45^\circ$  над горизонтальною поверхнею і утримання їх в такому положенні на протязі 3–5 хвилин, що змінює в основному тільки регіонарний тонус судин.

2. Штучна ішемія проксимального відділу кінцівки, яку створювали за рахунок 3-х мінутної компресії стегна за допомогою пневматичної манжети, що різко змінює як тонус судин, так і об'єм кровоплину в кінцівках.

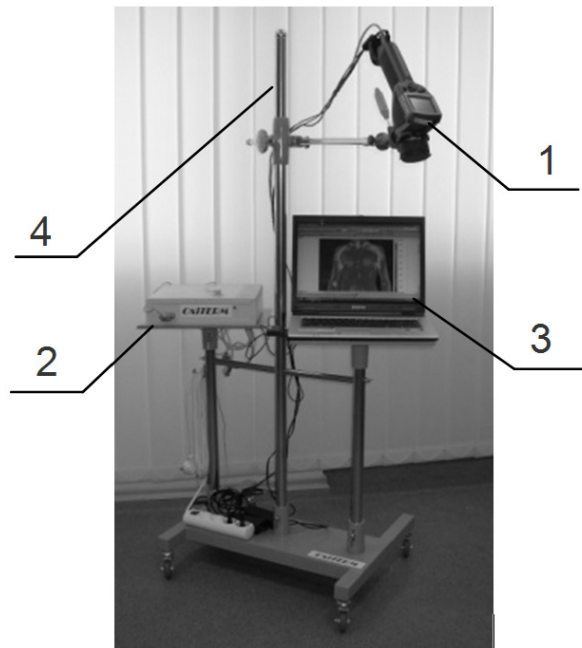


Рис. 1 Зовнішній вигляд дослідницького комплексу «ОксіТерм»

Після визначення місця порушення кровоплину на ШП згідно температурних градієнтів отриманих за допомогою методу ІЧТ, проводився контроль  $pO_2$  в межах термоаномальних зон транскутанним методом.

Реєстрували такі показники КС підшкірних тканин як час половини витрачення запасу  $O_2$  ( $T_{1/2}$ ), час повного витрачення запасу  $O_2$  ( $T_0$ ), час відновлення  $pO_2$  ( $T_r$ ) та час максимального приросту  $O_2$  ( $T_{max}$ ) під час ішемічного навантаження і на протязі 5-ти хвилин постішемічної реактивної гіперемії.

При оцінці ступеню функціональних розладів мікросудин в області термоаномальної зони, до уваги брали два фактори: градієнт температури між епіцентром термоаномальної зони й навколишніми тканинами, та величину термоаномальної зони. Чим вищий градієнт температури, тим сильніша виразність патологічних розладів. Величину від  $0,5^\circ C$  до  $1,2^\circ C$  приймали як помірну виразність патологічних зрушень, а та, що перевищує  $1,2^\circ C$  – як високу.

Отримана в такий спосіб інформація є вихідною базою для неінвазивних досліджень за даним методом.

### Результати досліджень і їх аналіз

Результати проведених досліджень показали, що транскутанно визначений показник  $pO_2$  в підшкірних тканинах стіп у осіб з ознаками пато-

логії судин нижніх кінцівок, після визначення термоаномальних зон на поверхні ШП, у стані спокою відрізнявся від показників у здорових людей (табл. 1).

**Таблиця 1. Показники  $pO_2$  у спокої**

Об'єкт досліджень	Кількість вимірів	$pO_2$ , мм рт. ст.
Особи без ознак патології	32	$58,2 \pm 1,6$
Особи з ознаками патології різного ступеню	16	$(43,2-15,5) \pm 3$

Результати наших досліджень співпадають з даними інших і дослідників, котрі спостерігали зниження  $pO_2$  у осіб з патологією судин нижніх кінцівок [10].

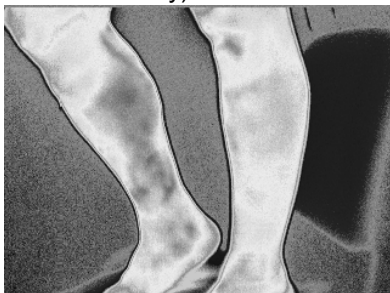
При аналізі результатів досліджень які проводились з використанням дозованих навантажень, нами було виявлено декілька варіантів змінювання  $pO_2$  при зміні положення кінцівок.

1. У осіб без судинних патологій нижніх кінцівок, у котрих на термограмах було відмічено добре кровонаповнення судин і нормальний судинний тонус (рис. 2), при підніманні ніг під кутом  $45^\circ$  з горизонтального положення, величина  $pO_2$  знижувалась на 15–28% у порівнянні з початковим положенням.



**Рис. 2 Термограма нижніх кінцівок пацієнта М. з нормальним судинним тонусом**

2. У осіб з підвищеним судинним тонусом (рис. 3) після навантаження,  $pO_2$  у підшкірних тканинах і місцевий кровоплин практично не змінювались, або незначно знижувались (до 10% початкового стану).



**Рис. 3 Термограма нижніх кінцівок пацієнта К. з підвищеним судинним тонусом. Температурні градієнти складають від  $0,7^\circ C$  до  $1,0^\circ C$**

3. У осіб з порушенням кровопостачання (рис. 4) після навантаження було відмічено значне зниження як місцевого кровоплину, так і  $pO_2$  в тканинах на 50% і більше у порівнянні з початковим положенням.



**Рис. 4 Термограма (пацієнт С.) з явно вираженою патологією судин нижніх кінцівок (градієнт температури складає  $1,8^\circ C$ )**

Низький рівень  $pO_2$  і різке його коливання у зв'язку зі зміною положення кінцівки у осіб з явними ознаками патології (візуальна блідість кінцівки, зниження температури, що підтверджується термограмою) можна пояснити порушенням процесу авторегуляції кровоплину, зниженням перфузійного тиску судин ШП дистальних відділів кінцівки.

При проведенні ішемічної проби (або проби на реактивну гіперемію), у осіб без ознак патології, відбувалося постійне зниження рівня  $pO_2$  і місцевого кровоплину. Час зниження  $pO_2$  до 0 мм рт. ст. залежав від початкового рівня  $pO_2$ . Швидкість падіння складала 24–16 мм рт. ст./хв.

Аналіз динаміки  $O_2$  під час навантаження (перетинання стегна пневмоманжетою) показав, що показник  $T_{1/2}$  в стадії компенсованої ішемії не відрізняється від показників здорових людей.

В таблиці 2 наведено показники транскутанного  $pO_2$  в підшкірних тканинах нижніх кінцівок в процесі проведення ішемічного навантаження і постішемічної реактивної гіперемії у здорових осіб і тих хто страждає хронічною ішемією різного ступеню.

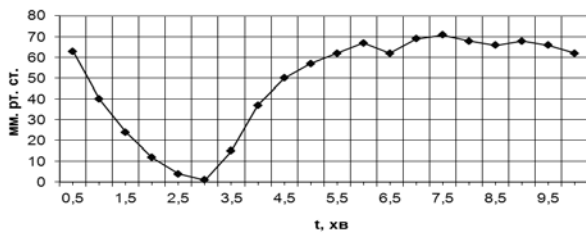
**Таблиця 2. Показники  $pO_2$  при навантаженнях**

Показники, хв.	Досліджувані особи	
	без ознак патології	з ознаками патології
$T_{1/2}$	$1,5 \pm 0,5$	$(1,3-0,6) \pm 0,1$
$T_0$	$2,8 \pm 0,2$	$(2,3-1,9) \pm 0,2$
$T_r$	$3,1 \pm 0,5$	$(4,2-4,5) \pm 0,2$
$T_{max}$	$4,4 \pm 0,1$	$(5,3-5,8) \pm 0,4$

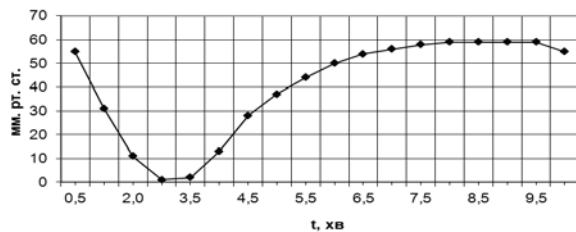
На рис. 5 представлені графіки змінювання  $pO_2$  в підшкірних тканинах стопи у здорових осіб і осіб з хронічною ішемією нижніх кінцівок при проведенні ішемічного навантаження і в постішемічний період.

Повне витрачення запасу  $O_2$  (нульовий рівень), в процесі 3-х хвилинного ішемічного на-

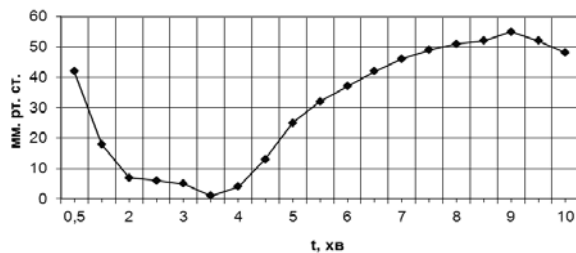
вантаження реєструвалося не у всіх досліджуваних. У здорових пацієнтів у 65% випадків був зареєстрований нульовий рівень (в кінці третьої хвилини ішемії). У осіб з патологією він був відмічений у 80% випадків.



а



б



в

**Рис. 5** Динаміка  $pO_2$  у підшкірних тканинах: а – у здорових осіб; б, в – у осіб з патологією судин нижніх кінцівок різного ступеню

Показник  $T_0$  в умовах хронічної ішемії було знижено на 15–20%, а показник  $T_r$  після ішемічного навантаження в умовах хронічної ішемії нижніх кінцівок був вище в середньому на 32% відносно показників у здорових осіб.

Прирощення транскутанного  $pO_2$  після ішемічного навантаження реєструвалося не у всіх досліджуваних. В групі здорових осіб воно спостерігалось в 83% випадків, при патологічному стані різного ступеню – від 62 до 60%. Час природження  $pO_2$  в умовах хронічної ішемії був вищий на 20–30% (в залежності від ступеню патології).

Проведення ішемічного навантаження показує, що у здорових людей повне витрачення запасу  $O_2$  спостерігається наприкінці часу оклюзії, відновлення  $pO_2$  здійснюється через інтервал часу, рівний часу ішемічного навантаження. Час розходу половини запасу  $O_2$  рівний половині часу ішемічного навантаження. У більшості досліджуваних осіб без ознак патології, відмічено природження  $O_2$  після проведення ішемічного

навантаження, хоча в середньому це виражається у вигляді тенденції до зростання.

Час розходу половини запасу припадає на середину часу проведення ішемічного навантаження, що співпадає з даними інших дослідників [18].

Час половини та повного розходу  $O_2$  менший ніж у здорових людей. Час відновлення  $pO_2$ , час природження  $O_2$  значно вищий за норму (рис. 5).

В стадії компенсованої ішемії у осіб з патологією судин нижніх кінцівок не спостерігалось різко вираженого порушення КС підшкірних тканин. Можливо цьому заважає розвиток деяких довгострокових компенсаторних реакцій на гіпоксичні навантаження.

Аналіз досліджень показав, що діагностичну цінність (як маркер патології) представляє в основному час початку збільшення  $pO_2$  (після декompresії) і час релаксації (час повернення показника  $pO_2$  к початковому рівню).

Питання про те, чи дійсно показники  $pO_2$  в підшкірних тканинах і характер термограм під час функціональних проб відображують ступень порушення кровопостачання, є важливим. Для цього було проведено співставлення показників часу початку збільшення  $pO_2$  і часу повернення величини  $pO_2$  до початкового значення після зняття компресії з кінцівки з ознаками клінічних проявів патології судин, а також з даними ІЧ термографії і отримано високий корелятивний зв'язок зі ступеню порушення кровопостачання при судинних патологіях. Той факт, що у осіб з неуразженими судинами ніколи не змінюється час початку зростання  $pO_2$ , надає можливість інтерпретації всіх випадків його уповільнення як порушення кровопостачання, що можна розглядати як реальний патологічний маркер (діагностичний показник).

Враховуючі вищенаведене, можна відмітити, що у порівнянні з візуальним визначенням початку реактивної гіперемії, дані транскутанного визначення  $pO_2$  і характер теплових полів на термограмах, більш чітко і об'єктивно вказують на ступень порушення кровообігу при різних патологіях судин нижніх кінцівок.

Таким чином, вірна інтерпретація термограм і подальший транскутанний контроль  $pO_2$  уражених судин нижніх кінцівок при різних навантаженнях, дають можливість об'єктивно оцінювати КС підшкірних тканин і судити про функціональний стан периферичного кровоплину уражених судин.

Спільний тепловізійний і кисневий моніторинг можуть бути використані також під час оцінки ефективності лікування, для визначення показників до хірургічного втручання, а також для контролю кровоплину при реконструктивних операціях на судинах кінцівок.

**Висновки**

1. Комплексний метод на основі дистанційного визначення температурних градієнтів і контролю кисневого статусу у підшкірних тканинах шляхом транскутанного визначення  $pO_2$ , достатньо чутливий, більш фізіологічний ніж інші методи дослідження функціонального стану БО і може бути рекомендований як діагностичний, що об'єктивно відображує кисневий статус і кровопостачання у осіб з різними патологіями судин нижніх кінцівок.

2. У осіб з патологіями судин нижніх кінцівок значення парціального тиску кисню у підшкірних тканинах, отримане за допомогою транскутанного методу, нижче ніж у здорових. Час витрачення половини і повного запасу кисню – знижений.

3. Діагностичну цінність, при проведенні ішемічної проби, представляє час початку прирощення парціального тиску кисню після зняття компресії стегна. Наявність збільшення цього часу може бути використано у якості патологічного маркера порушення кровоплину кінцівки яка досліджується.

**Література**

1. *Котовський В.Й., Ячник А.І., Довженко О.П., Ройтман Е.М., Шевченко В.В.* Сучасний підхід до проблеми ранньої діагностики захворювань судинної системи /Електроника и связь – №6(35) – 2006 – с. 24–29.
2. Заключний звіт
3. *В.Й. Котовський, В.І. Микитенко, Е.М. Ройтман* Метод функціональної діагностики стану мікросудинної системи на основі обміну кисню та теплового випромінювання / Электроника и связь. – Тематический выпуск "Проблемы электроники", ч. 2 – Киев – 2007 – с. 83 – 85.
4. *Matsen F.T., Burgess E.M., Wyss C.R. et al.* Transcutaneous oxygen tension as predictor of wound healing // J. Rehabil. Res. And Dev. 1986. V. 24. №1. P. 234
5. *Rosfors S., Celsing F., Eriksson M.* Transcutaneous oxygen pressure measurements in patients with intermitted claudication //Clin. Physiol. 1994. V. 14. № 4. P. 385
6. *Ю.П. Дегтярев, В.И. Дунаевский, В.И. Котовский и др.* Место и роль дистанционной инфракрасной термографии среди современных диагностических методов / Электроника и связь. – Тематический выпуск "Электроника и нанотехнологии". – №2 – Киев – 2010 – с. 192 – 196.
7. *Ю.П. Дегтярев, С.А. Мироненко, В.И. Нечипорук, и др.* Применение дистанционной инфракрасной термографии в диагностике заболеваний и последствий травм у спортсменов / Электроника и связь. – Тематический выпуск "Электроника и нанотехнологии", ч. 1 – №2-3 – Киев – 2009 – с. 220 – 223.
8. *В.Й. Котовський, В.Л. Осауленко, П.О. Івченко* Канал контролю парціального тиску кисню у міжклітинній рідині /Електроника и связь. – Тематический выпуск "Электроника и нанотехнологии". – №2 – Киев – 2010 – с. 122 – 126.
9. *Котовський В.Й.* Обґрунтування вимог до умов проведення термографічних досліджень біологічних об'єктів /Вісті академії інженерних наук України – № 2(39) – 2009 – С. 6 – 11.
10. *Forconi S., Sani P., Cappelli R. et al.*  $T_cPO_2$  at different temperatures in studying circulation of healthy subjects and of patients suffering from peripheral arterial disease: 17-th Eur. Conf. Soc. Microcirc. London, Juli 5-10, 1992 //Int. J. Microcirc. Clin. And Exp. 1992. V.11. Suppl. №1. P. 50