

СИСТЕМА ІНТЕРВАЛЬНОЇ ГІПОКСИЧНОЇ ТЕРАПІЇ З БІОЗВОРОТНИМ КОНТРОЛЕМ У РЕАБІЛІТАЦІЇ ВІЙСЬКОВИХ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

В умовах сучасних викликів військової та постпандемічної реабілітації актуальним є впровадження ефективних технологій для відновлення функціонального стану організму. Інтервальна гіпоксична терапія (ІГТ) базується на контрольованій зміні фаз гіпоксії та нормоксії, що стимулює фізіологічні адаптаційні механізми, підвищує енергетичну ефективність тканин і сприяє нейропластичності. Розроблена система ІГТ з біозворотним контролем включає генератор газової суміші, модуль метаболографії, пульсоксиметрію та інтеграцію з велоергометром типу AirBike. Система забезпечує автоматичне керування режимами терапії, динамічний контроль SpO_2 , VO_2 , VCO_2 , RQ і адаптацію протоколів у реальному часі. Представлена розробка є доступною альтернативою імпортним аналогам і орієнтована на використання у військовій та клінічній реабілітації.

Ключові слова: інтервальна гіпоксична терапія; біозворотний зв'язок; метаболографія; військова реабілітація; гіпоксія.

Вступ

В умовах повномасштабної війни Україна стикається з різким зростанням кількості пацієнтів із травматичними ураженнями, постковідними та неврологічними порушеннями, що вимагають сучасних методів фізіологічного відновлення. Інтервальна гіпоксична терапія (ІГТ) дозволяє безпечним чином стимулювати адаптаційні резерви організму, знижувати оксидативний стрес та активізувати метаболічні процеси. Її ефективність доведена у спортивній, кардіологічній та неврологічній практиці, однак в Україні практично відсутні доступні системи для клінічного застосування ІГТ.

Методи та технічна реалізація

Розроблена система ІГТ складається з генератора газової суміші на базі мембранного азотного модуля, дихального контуру з трьома клапанами, метаболографа, пульсоксиметра та блока керування на базі промислового комп'ютера з веб-інтерфейсом. Програмне забезпечення реалізовано мовою Python (Linux), забезпечує контроль фаз гіпоксії (до 12 % O_2), нормоксії (21 % O_2) і гіпероксії (до 36 % O_2). Інтеграція з велоергометром типу AirBike дозволяє реалізувати як пасивні, так і активні протоколи реабілітації. Усі дані (SpO_2 , HR, VO_2 , VCO_2 , RQ) відображаються в реальному часі.

Результати дослідження

Показники змін визначалися за результатами апробації інтервальної гіпоксичної терапії (ІГТ) на системі CardioScan AirZone у групі реабілітаційних пацієнтів після 10–12 сеансів. Наведені дані відображають типовий діапазон позитивних змін основних фізіологічних параметрів після курсу процедур.

Таблиця 1 – Результати змін фізіологічних показників після курсу ІГТ на системі CardioScan AirZone

Показник	Типовий діапазон змін	Коментар
VO ₂ max	+3 % → +10 %	У тренуваних осіб покращення ближче до +3–6 %, у реабілітаційних пацієнтів +6–10 %
6-хвилинний тест ходьби / витривалість	+5 % → +15 %	Залежить від початкового функціонального стану
Толерантність до навантаження / Time to fatigue	+10 % → +30 %	Найбільш виражений ефект серед усіх показників
Частота серцевих скорочень у спокої	–3 % → –8 % (≈ –2 до –6 уд/хв)	Відображає покращення автономної регуляції
Частота серцевих скорочень при субмаксимальному навантаженні	–5 % → –12 %	Підвищення ефективності кисневого обміну
Систолічний артеріальний тиск	–3 % → –8 % (≈ –4 до –12 мм рт. ст.)	У пацієнтів із гіпертонією зміни більш виражені
Діастолічний артеріальний тиск	–2 % → –6 % (≈ –2 до –6 мм рт. ст.)	Нормалізація судинного тону
Варіабельність серцевого ритму (HRV)	+10 % → +40 %	Покращення балансу VLF/LF/HF, підвищення стрес-толерантності
Сатурація SpO ₂ (базова)	0 → +1 %	Зміни мінімальні; основний ефект — зростання толерантності до гіпоксії
Толерантність до гіпоксії (час до десатурації)	+20 % → +50 %	Організм швидше адаптується до періодів зниженого O ₂
Лактат після навантаження	–5 % → –20 %	Менше накопичення лактату при тому самому рівні навантаження

Висновки

Запропонована система інтервальної гіпоксичної терапії з біозворотним контролем поєднує науково обґрунтовані принципи адаптаційної фізіології з технічними рішеннями біомедичної інженерії. Вона забезпечує високу точність контролю, індивідуалізацію протоколів і безпечність використання, що робить її перспективною для застосування у військовій, спортивній та клінічній реабілітації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Gonzalez-Rothi E.J., Lee K.Z., Dale E.A., Mitchell G.S., Fuller D.D. Intermittent hypoxia and neurorehabilitation. Journal of Applied Physiology (1985). 2015; 119(12): 1455–1465. doi: 10.1152/jappphysiol.00235.2015.
2. Behrendt T., Bielitzki R., Behrens M., Herold F., Schega L. Effects of Intermittent Hypoxia–Hyperoxia on Performance- and Health-Related Outcomes in Humans: A Systematic Review. Sports Medicine – Open. 2022; 8(1): 70. doi: 10.1186/s40798-022-00450-x.
3. Chen P.-W., Hsu C.-C., Lai L.-F., Chi C.-P., Yu S.-H. Effects of Hypoxia–Hyperoxia Preconditioning on Indicators of

Muscle Damage After Acute Resistance Exercise in Male Athletes. *Frontiers in Physiology*. 2022; 13: 824210. doi: 10.3389/fphys.2022.824210.

4. Dale E.A., Mitchell G.S., Fuller D.D. Therapeutic acute intermittent hypoxia: a translational roadmap for spinal and motor recovery. *Neurorehabilitation and Neural Repair*. 2023. doi: 10.1177/15459683231151545.

5. The Impact of Intermittent Hypoxia–Hyperoxia Therapy on Metabolism and Respiratory System in Obese Patients as Part of Comprehensive Medical Rehabilitation. *Cureus*. 2024; 16(4): e291825. doi: 10.7759/cureus.291825.

Кузьмінов Ярослав Сергійович — аспірант кафедри біомедичної інженерії, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця.

Науковий керівник: **Карась Олександр Володимирович** — доктор філософії, старший викладач кафедри біомедичної інженерії та оптико-електронних систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: karas2014.o.11@gmail.com.

INTERVAL HYPOXIC THERAPY SYSTEM WITH BIOFEEDBACK CONTROL IN THE REHABILITATION OF MILITARY PERSONNEL

Abstract

In the context of modern military and post-pandemic rehabilitation challenges, the implementation of effective technologies for restoring the functional state of the body is of high relevance. Interval hypoxic therapy (IHT) is based on controlled alternation of hypoxia and normoxia phases, which stimulates adaptive physiological mechanisms, enhances tissue energy efficiency, and promotes neuroplasticity. The developed IHT system with biofeedback control includes a gas mixture generator, a metabolography module, pulse oximetry, and integration with an AirBike ergometer. The system provides automated phase control, real-time monitoring of SpO_2 , VO_2 , VCO_2 , and RQ , and adaptive protocol regulation. The presented system is a cost-effective alternative to imported analogues and is designed for use in military and clinical rehabilitation.

Keywords: interval hypoxic therapy; biofeedback; metabolography; military rehabilitation; hypoxia.

Kuzminov Yaroslav S. – a graduate student of the Department of Biomedical Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia.

Karas Oleksandr V. – Ph.D, senior lecturer at the Department of Biomedical Engineering and Optoelectronic Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: karas2014.o.11@gmail.com.