

УДК 615.471, 612.127, 612.127-1.3

## АНАЛИТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ АЭРОБНОГО ЭНЕРГООБМЕНА И КИСЛОРОДНОГО СТАТУСА КРОВИ ОРГАНИЗМА

Л.П. КИСЛЯКОВА, д.б.н.; Ю.Я. КИСЛЯКОВ, д.б.н., профессор;  
А.Ю. КИСЛЯКОВА, к.ф-м.н.

Институт аналитического приборостроения РАН, Санкт-Петербург

*Представлен автоматизированный аналитический комплекс для исследования процессов аэробного энергообмена организма и кислородного статуса крови. Он включает сенсорные, электронные и компьютерные модули измерений и анализа. Комплекс в стационарном или мобильном исполнении может использоваться для биологических, медицинских и экологических исследований.*

**Ключевые слова:** кислород, кровь.

*Universal automated system for investigation of the aerobic energetical process in organism and oxygen status of the arterial blood is presented. It consists of electronics and sensors parts connected with the computer. It can be used as stationary and mobile device in biological, medical and ecological research.*

**Key words:** oxygen, blood.

Успешное решение вопросов, связанных с поддержанием работоспособности населения, возможно лишь при организации **высокоинформативной, оперативной, регулярной и массовой** диагностики индивидуального физического здоровья и функционального состояния физиологических систем, определяющих состояние организма. Она крайне необходима для прогнозирования, лечения и реабилитации здоровья большого контингента людей. Для оптимального решения этой проблемы необходимы относительно **дешевые, быстродействующие** диагностические комплексы нового поколения, основанные на реализации современных медико-биологических методов контроля здоровья по состоянию **энергетического и пластического** метаболизма, определяемого по ключевым физиологическим и биохимическим показателям кардиореспираторной и метаболической систем. В таких комплексах нуждаются тысячи больниц, диагностических центров, спортивных и военных организаций. Существующие импортные комплексы (EOS-Sprint, ER 800, ER 900, Ergo-line, Oxycon 5, Meta Max 3B, Rapidlab 840, Synthesis 15, Omni 3) стоимостью выше двух миллионов рублей малодоступны для отечественной медицины.

Для решения указанной выше задачи массовой, экономически доступной диагностики индивидуального физического здоровья был разработан отечественный автоматизированный комплекс из двух многопараметрических анализаторов – **аэробного энергообмена и кислородного статуса крови**. Первый предназначен для оценки параметров механики дыхания, газообмена и аэробного энергообмена (по парциальным давлениям  $pO_2$ ,  $pCO_2$  в выдыхаемом воздухе в ходе каждого дыхательного цикла). Методология этого подхода детально описана в существующей литературе [1]. Второй – для определения кислородного статуса крови по

содержанию в ней основных фракций гемоглобина (окси-, деокси-, карбокси- и метгемоглобина), парциальному давлению респираторных газов ( $pO_2$ ,  $pCO_2$ ), величине pH крови и вычисленным показателям ее кислотно-щелочного равновесия. Методология этого подхода описана в имеющейся литературе [2, 3].

Каждый из анализаторов представляет собой компьютеризированную исследовательскую и диагностическую систему, состоящую из измерительных модулей (электрохимического, оптического и др.), модулей их микропроцессорного управления, связанных с модулем общего компьютерного управления и анализа получаемых данных, а также с соответствующими модулями пробоподготовки. В состав каждого измерительного модуля входят 3 блока: сенсорный, измерительного электронного преобразования и блок подачи проб.

Сенсорный блок каждого измерительного модуля представлен комплектом миниатюрных датчиков. Каждый из датчиков обеспечивает выдачу выходного сигнала, отражающего величину основного измеряемого или дополнительного параметра, необходимого для вычислений определяемых показателей или обеспечения требуемого режима работы анализатора. Электрохимические измерительные модули реализуют определение парциальных давлений  $O_2$  в крови и выдыхаемом воздухе,  $CO_2$  и уровня pH в микропробах крови, а также вычисление по измеренным показателям основных параметров кислотно-щелочного равновесия крови. Оптический измерительный модуль форм гемоглобина в крови основан на регистрации спектров поглощения светового потока в диапазоне 400 – 800 нм микрообразцами крови. Оптический модуль анализа парциального давления  $CO_2$  в выдыхаемом воздухе основан на реализации метода молекулярной спектроскопии в области среднего ин-

фракрасного диапазона ( $\lambda = 4.26$  мкм), не чувствительной к парам воды. Модуль пробоподготовки обеспечивает выполнение измерений при задаваемых условиях поддержания температуры и подачи жидких и газовых сред.

Каждый измерительный модуль обеспечивает преобразование и выдачу полученной от сенсоров информации с задаваемыми интервалами времени (0.01-2.0 сек) в модуль микропроцессорного управления процедурой параллельных многопараметрических (8-17) измерений. Он выполняет обработку и передачу этой информации в персональный компьютер, являющийся модулем общего управления и анализа данных.

**Анализатор аэробного энергообмена** состоит из 3-х измерительных и 2-х компьютерных модулей (управления и анализа) и блока пробоподготовки.

Модуль измерений параметров дыхания предназначен для непрерывной регистрации объемной скорости потока воздуха в процессе каждого вдоха и выдоха с помощью высокочувствительного тензометрического датчика давления. Модули контроля содержания  $O_2$  (метод амперометрии) и  $CO_2$  (метод молекулярной корреляционной инфракрасной спектроскопии) осуществляют непрерывные измерения содержания этих газов в выдыхаемом воздухе и воздухе, поступающем в легкие из окружающего пространства. Блок пробоотбора представляет собой измерительную термостатируемую проточную ячейку для размещения сенсоров газового анализа и устройство для автоматической непрерывной подачи в нее микропроб выдыхаемого и вдыхаемого воздуха в процессе дыхания или проб анализируемого газа. Система управления с помощью микроконтроллера обеспечивает калибровку, измерение и расчет исследуемых показателей, контроль работоспособности всех модулей комплекса. Модуль анализа и прогнозирования физиологических функций предназначен для оценки параметров внешнего дыхания, физической работоспособности и состояния физического здоровья по всему комплексу анализируемых параметров.

*Основные непрерывно измеряемые показатели:* объемная скорость вдыхаемого и выдыхаемого воздуха в ходе дыхательных циклов; содержание  $O_2$  и  $CO_2$  в газовых смесях, выдыхаемом воздухе и окружающей среде; температура среды; атмосферное давление.

*Основные определяемые комплексные показатели:* легочные объемы и емкости; показатели легочной вентиляции; интенсивность потребления  $O_2$ ; интенсивность выделения  $CO_2$ ; дыхательный коэффициент; анаэробный порог; аэробная емкость; сердечный выброс.

*Основные показатели физического здоровья и работоспособности:* мощность, емкость и эффективность аэробного энергообмена.

*Основные технические характеристики комплекса:*

Измеряемые параметры	Диапазон	Предел основной абсолютной погрешности
$pO_2$ , мм рт.ст.	0 – 800	$\pm 0.3$
Содержание $O_2$ , об.%	0 – 100	$\pm 0.05$
$pCO_2$ , мм рт.ст.	0 – 100	$\pm 0.3$
Содержание $CO_2$ , об.%	0 – 13	$\pm 0.05$
$W_{\text{выд.}}$ , л/с	0 – 16	$\pm 2$ (%)
$P_{\text{атм}}$ , мм рт.ст.	630 – 800	$\pm 0.5$
$T$ , °C	10 – 45	$\pm 0.2$

**Анализатор кислородного статуса крови** представляет собой компьютеризированную исследовательскую и диагностическую систему модульного типа для одновременного контроля парциальных давлений  $O_2$  и  $CO_2$ , а также уровня pH и содержания различных форм гемоглобина (и других химических переносчиков кислорода) в микропробах крови.

Анализатор состоит из 2-х измерительных модулей (оптического и электрохимического), компьютерного модуля управления и блока пробоподготовки. Каждый измерительный модуль состоит из сенсорного звена, измерительного устройства, микроконтроллера, управляющего процессом измерений, обработки и передачи информации в компьютер, и комплекта методов измерений.

Модули высокоточного и быстродействующего аналитического определения содержания  $O_2$  (электрохимический метод амперометрии с применением миниатюрного мембранного электрода типа Clark и высокоточного измерителя малых токов), напряжения  $CO_2$  и уровня pH (метод потенциометрии с применением миниатюрных pH- и  $pCO_2$ -электродов), форм гемоглобина (метод быстрой спектрофотометрии с применением многоэлементного фотоприемника) осуществляют параллельные измерения этих показателей в микропробах крови, доставляемых в термостатируемые оптическую и электрохимическую измерительные ячейки.

Блок пробоподготовки содержит устройства для автоматической подачи микропроб крови, калибровочных и промывочных растворов и газовых смесей в измерительные ячейки.

Компьютерная система управления с помощью микроконтроллеров обеспечивает автоматическое выполнение процедур: калибровка, ввод пробы в измерительную ячейку, измерение и расчет исследуемых показателей, контроль качества измерений, в том числе, с применением эталонных и контрольных материалов любых фирм-изготовителей, контроль работоспособности всех модулей анализатора. Она включает план проведения эксперимента, комплекты методик и программ обработки результатов измерений с отчетом и их графическим отображением, а также банк данных с информацией о результатах каждого эксперимента.

Программное обеспечение системы управления обеспечивает оценку параметров кислородного статуса и кислотно-щелочного состояния крови по всему комплексу анализируемых параметров и прогнозирование физиологических функций.

*Основные технические характеристики комплекса:*

Измеряемые параметры	Диапазон	Предел основной абсолютной погрешности
pO <sub>2</sub> , мм рт.ст.	0–800	±0,2 (0–200)
pCO <sub>2</sub> , мм рт.ст.	0–120	±0,3 (10–80)
pH	6–8	±0,002
P <sub>атм</sub> , мм рт.ст.	630–800	±0,5
T, °C	25–38	±0,1
tHb – суммарный гемоглобин, g %	3–24 g	±0,2 (11–9)
O <sub>2</sub> Hb – оксигемоглобин, %	0–100	±0,5 (50–100)
RHb – деоксигемоглобин, %	0–100	±0,5 (0–20)
COHb – карбоксигемоглобин, %	0–100	±0,5 (0–30)
MetHb — метгемоглобин, %	0–100	±0,5 (0–20)
A, оптическая плотность, ед. ОП	0,0–3,0	±(0,01–0,1)
Спектральный интервал, нм	400–900	±1

Основные измеряемые показатели:

- Парциальное давление O<sub>2</sub>.
- Парциальное давление CO<sub>2</sub>.
- Уровень pH.
- Концентрации различных форм гемоглобина.

Основные определяемые комплексные показатели крови человека:

- Кислородный статус крови.
- Кислотно-щелочной статус крови.
- Кислородсвязывающие свойства гемоглобина.

Всего 38 измеряемых и рассчитываемых параметров крови (истинные pH и pCO<sub>2</sub> крови и плазмы, истинная концентрация гидрокарбоната в крови и плазме, истинная суммарная концентрация CO<sub>2</sub> в плазме, истинный избыток кислоты в крови и в плазме, избыток кислоты в крови, во внеклеточной жидкости, концентрация буферных щелочей в крови и в плазме, избыток щелочи во внеклеточной жидкости и в крови, истинный избыток щелочи в крови и в плазме и др.).

Проведенные технические и медико-биологические исследования созданных макетов показывают, что по аналитическим характеристикам они соответствуют лучшим зарубежным аналогам.

#### Литература

1. Волков Н.И., Несен Э.Н., Осипенко А.А., Корсун С.Н., Биохимия мышечной деятельности. – Киев: Олимп. лит-ра, 2000. – 496 с.
2. Fogh-Andersen N., Siggaard-Andersen O., Lundsgaard F.C., et al.. Diode-array spectrophotometer for simultaneous measurement of hemoglobin pigments // Clin. Chem. Acta. – 1987. – Vol. 166. – P. 283-289.
3. Siggaard-Andersen O., Gothgen I.H., Wimberley P.D., Fogh-Andersen N. The oxygen status of the arterial blood revised: relevant oxygen parameters for monitoring the arterial oxygen availability // Scand. J. Clin. Lab. Invest. – 1990. – Vol. 50. – P. 17-28.

Поступила 09.04.09

*Работа выполнена при поддержке грантов Программы Президиума РАН «Фундаментальные науки – медицине» 2009 г.*