

## КАРДИОПУЛЬМОНАЛЬНОЕ ТЕСТИРОВАНИЕ В КАРДИОЛОГИИ

*А.В. Березина, А.В. Козленок*

*ФГБУ «Федеральный медицинский исследовательский центр им. В.А. Алмазова»  
Минздрава России, Санкт-Петербург, Россия*

*Березина Аэлита Валерьевна* — доктор медицинских наук, заведующая НИЛ кардиопульмонального тестирования ФГБУ «Федеральный медицинский исследовательский центр им. В.А. Алмазова» Минздрава России (ФМИЦ им. В.А. Алмазова); *Козленок Андрей Валерьевич* — кандидат медицинских наук, заведующий НИО физиологии кровообращения ФМИЦ им. В.А. Алмазова.

**Контактная информация:** ФГБУ «Федеральный медицинский исследовательский центр им. В.А. Алмазова» Минздрава России, ул. Аккуратова, д. 2. Санкт-Петербург, Россия, 197341. E-mail: aelitaberezina@mail.ru (Березина Аэлита Валерьевна).

### Резюме

В обзоре изложены физиологические основы кардиопульмонального тестирования, показания и преимущества использования данного теста в отношении диагностики, оценки эффективности лечения и прогноза у больных с сердечно-сосудистой патологией.

**Ключевые слова:** кардиопульмональное тестирование, пиковое потребление кислорода, дифференциальная диагностика одышки, диагностика ИБС, прогноз больных ХСН.

## THE CARDIOPULMONARY TEST IN THE CARDIOLOGY

*A.V. Berezina, A.V. Kozlenok*

*Federal Almazov Medical Research Centre, Saint-Petersburg, Russia*

**Corresponding author:** Federal Almazov Medical Research Centre, 2 Akkuratova st., St Petersburg, Russia, 197341. E-mail: aelitaberezina@mail.ru (Aelita V. Berezina, MD, Head of Research Laboratory of cardiopulmonary test).

### Abstract

The purpose of this survey is to present information on the clinical use of cardiopulmonary exercise test in patients with cardiovascular disease, with particular emphasis on evidence base for the functional evaluation, prognosis and assessment of interventions.

**Keywords:** cardiopulmonary exercise testing,  $VO_{2peak}$ , differential diagnostics of dyspnoea, diagnostics of CAD, prognosis of HF.

*Статья поступила в редакцию 06.04.14 и принята к печати 10.04.14.*

Уровень физической работоспособности (ФР), характеризующий способность индивидуума выполнять максимальную физическую нагрузку (ФН), является одним из критериев здоровья человека, поэтому его оценка имеет важное диагностическое и прогностическое значение. Совершенно очевидно, что уровень ФР зависит от функционального состояния и резервных возможностей сердечно-

сосудистой и легочной систем, и поэтому для ее оценки используется проба с физической нагрузкой, так как известно, что легочные и сердечные показатели, определяемые в состоянии покоя, не могут надежно предсказывать выполнение и функциональные возможности организма. Для того, чтобы оценить, соответствует ли реакция сердечно-легочной системы на физическую нагрузку норме,

проба должна быть строго дозирована. Нагрузка может быть выражена в привычных единицах работы (джоуль) и мощности (ватт), однако наиболее строгим количественно измеряемым параметром, пригодным для стандартизации проб с физической нагрузкой, является определение потребления кислорода. Эквивалентом потребления  $O_2$  при обычной ФН является стандартизированная величина — метаболические единицы, на основании которых мы можем лишь косвенно судить об уровне потребления  $O_2$ .

С развитием диагностической техники стало возможным одновременно оценить не только ответ сердечно-сосудистой системы на физическую нагрузку (ЭКГ, ЧСС, АД), но также показатели газообмена и вентиляции. Последнее дает возможность непосредственно определить уровень потребления кислорода и выявить причины его изменения.

Кардиопульмональный нагрузочный тест, или спироэргометрия (КПНТ) — это эксклюзивная методика, позволяющая проследить за всем процессом доставки и утилизации кислорода в организме от внешнего до тканевого дыхания в условиях физической нагрузки (Рис. 1).

С помощью КПНТ возможно оценить работу всех систем и органов, участвующих в обеспечении организма кислородом (сердечно-сосудистая система, легочная система и система крови), а также его утилизацию (мышечная система) и выявить причины и механизмы снижения физической работоспособности (Рис. 2).

Преимущества этой методики очевидны: во-первых, непосредственно и индивидуально определяется уровень потребления кислорода; во-вторых, одновременная оценка газообмена дает возможность оценить комплексно и интегрально работу

всех систем организма, обеспечивающих доставку и утилизацию кислорода [1, 2].

Поэтому к общим задачам, которые решаются в клинике с помощью КПНТ, относятся выявление причин и механизмов необъяснимой непереносимости ФН и объективная оценка функциональных возможностей организма [1, 2].

К сожалению, в нашей стране эта методика до сих пор не получила широкого распространения. Это обусловлено рядом объективных причин, а именно: дорогое оборудование и расходные материалы, отсутствие четких знаний о диагностических возможностях и области применения этой методики, что в свою очередь обусловлено отсутствием литературы на русском языке. Кроме того, от врача, который анализирует результаты исследований, требуются знания биохимии, физиологии, патофизиологии, кардиологии и пульмонологии.

Наиболее широко КПНТ используется в кардиологической практике. К показаниям для применения КПНТ у больных с сердечно-сосудистыми заболеваниями относятся:

- диагностика ИБС у больных с измененной ЭКГ (блокада левой ножки пучка Гиса, систолическая перегрузка левого желудочка и другие изменения реполяризации) и безболевого депрессией сегмента ST-T;
- диагностика ранних стадий сердечной недостаточности;
- оценка эффективности терапии и прогноза у больных ХСН;
- отбор на трансплантацию сердца;
- подбор программ по реабилитации больных с сердечно-сосудистой патологией;
- диагностика шунта «справа налево», возникающего во время нагрузки при пороках сердца;

Рисунок 1. Физиологическая реакция организма на физическую нагрузку

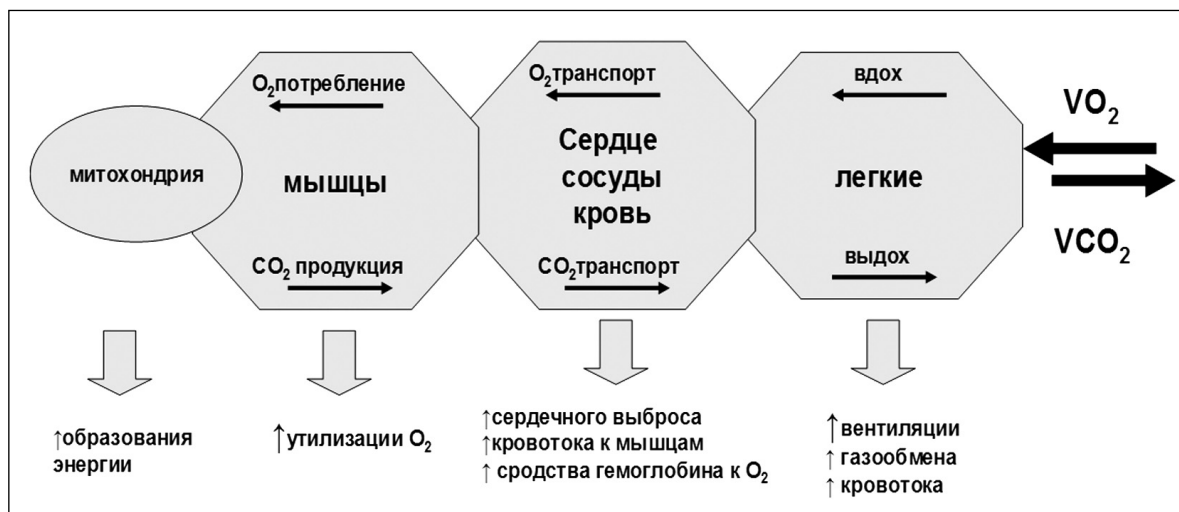


Рисунок 2. Патологические состояния, снижающие переносимость физических нагрузок



- дифференциальная диагностика одышки;
- оценка эффективности работы электрокардиостимуляторов, в том числе ресинхронизирующих, и устройств механической поддержки кровообращения [1N6].

Важными интегральными показателями КПНТ, отражающими адекватность доставки кислорода, являются максимальное или пиковое потребление кислорода ( $VO_{2max}$ ,  $VO_{2peak}$ ) и анаэробный порог.  $VO_{2max}$  определяется, как наивысшая величина потребления кислорода, которая не изменяется (плато — leveling off) даже несмотря на дальнейшее увеличение мощности ФН.  $VO_{2max}$  могут достигнуть только хорошо тренированные люди или спортсмены, поэтому чаще всего при спироэргометрии оценивается пиковое потребление кислорода.  $VO_{2peak}$  — это тот наивысший уровень потребления кислорода, которого достиг человек при выполнении ФН. Анаэробный порог (АП) — это такой уровень потребления кислорода при ФН, на котором к процессу аэробного пути образования энергии присоединяется анаэробный, что сопровождается увеличением уровня лактата в крови, накоплением ионов водорода и развитием метаболического ацидоза [1, 2].

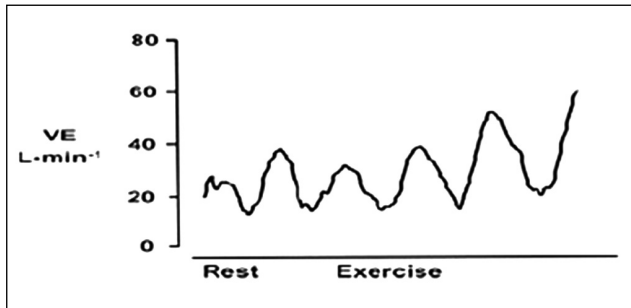
В настоящее время доказано, что пиковое потребление кислорода ( $VO_{2peak}$ ), потребление кислорода на уровне анаэробного порога, вентиляторный эквивалент  $CO_2$  ( $VE/VCO_2$ , где  $VE$  — минутная вентиляция (л/мин),  $VCO_2$  — выделение углекислого газа (л/мин)), определяемые при КПНТ, имеют высокую прогностическую значимость у больных хронической сердечной недостаточностью (ХСН). Так,  $VO_{2peak} < 14$  мл/кг/мин у больных с ХСН ассоциируется с низкой выживаемостью в течение года и поэтому является одним из критериев отбора боль-

ных на трансплантацию сердца [7, 8]. Также установлено, что  $VE/VCO_2 > 34$  является пограничным значением, разделяющим благоприятное и неблагоприятное течение ХСН. Риск смерти прогрессивно увеличивается, если значение  $VE/VCO_2$  возрастает от нормы ( $< 30$ ) до  $> 40$  при наблюдении в динамике. Наихудший прогноз выявлен у больных ХСН с сочетанием  $VO_{2peak} < 10$  мл/кг/мин и  $VE/VCO_2 > 40$  [9]. Риск неблагоприятных событий у больных ХСН увеличивается при значении потребления  $O_2$  на уровне анаэробного порога менее 11 мл/кг/мин. В последние годы пристально изучается изменение паттерна дыхания у больных ХСН как предиктора неблагоприятного прогноза. Волнообразная вентиляция (exercise oscillatory ventilation, EOV) характеризуется медленной и постоянной волнообразной флуктуацией минутной вентиляции во время возрастающей ФН. В ряде исследований было показано, что такой паттерн дыхания регистрируется у 20N60 % пациентов ХСН и ассоциируется с низкой толерантностью к физической нагрузке и тяжестью состояния [10, 11] (Рис. 3).

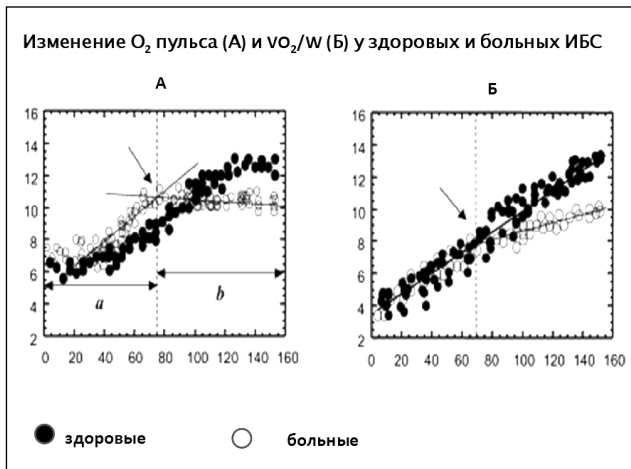
Патогенез этого феномена до конца не изучен, но предполагается, что такой паттерн дыхания может быть обусловлен изменением гемодинамических и нейрогормональных регулирующих факторов, таких как нарушение «обратной связи» с дыхательным центром и флуктуация легочного кровотока [12].

Основным признаком ХСН является снижение переносимости ФН, поэтому определение уровня ФР у больных ХСН важно и для диагностики степени тяжести сердечной недостаточности и оценки эффективности проводимой терапии. Поскольку воспроизводимость и информативность обычных показателей толерантности к физической

**Рисунок 3. Флуктуация минутной вентиляции при возрастающей физической нагрузке у больных ХСН**



**Рисунок 4. Диагностика ИБС с помощью кардиопульмонального тестирования**



**Примечание:**  $O_{2p}$  пульс — индекс ударного объема,  $VO_2/W$  — доставка  $O_2$  на выполненную работу.

нагрузке, таких как максимальная длительность и мощность нагрузки, не совершенны, в 1988 году Вебером была предложена новая классификация ХСН, основанная на таких объективных критериях, как уровень пикового потребления кислорода и потребление кислорода на уровне анаэробного порога [13] (Табл. 1).

КПНТ является объективным методом, позволяющим диагностировать стресс-индуцируемую ишемию миокарда у лиц с подозрением на ИБС и измененной ЭКГ или атипичным болевым синдромом. Диагностика ИБС с помощью КПНТ базируется на теории «ишемического каскада». Согласно этой теории, нарушение функции левого желудочка предшествуют изменениям на ЭКГ и болевым ощущениям. Анализ результатов КПНТ пациентов с подтвержденной ИБС выявил 2 основных предиктора ишемии миокарда: изменение соотношения потребления  $O_2$  ( $\Delta VO_2/\Delta WR$ ) и кислородного пульса ( $O_{2pulse}$ ), который является индексом ударного объема, к выполненной работе ( $O_{2pulse}/WR$ ). Эти изменения характеризуются тем, что несмотря на дальнейшее увеличение ФН наступает такой момент, когда  $VO_2$  и  $O_{2pulse}$  перестают увеличиваться линейно по отношению к работе и кривые на графике сглаживаются значительно раньше, чем у здоровых лиц сопоставимого возраста и пола. При сопоставлении результатов КПНТ и нагрузочной сцинтиграфии у этих пациентов было установлено, что точка начала выравнивания графиков соответствует нарушению сократительной функции левого желудочка, причем величина наклона  $\Delta VO_2/\Delta WR$ , равная 3,9 мл/мин/ватт, считается критической в отношении начала ишемии миокарда. С помощью КПНТ чувствительность и специфичность диагностики ишемии миокарда повысилась до 87% и 74% соответственно [14] (Рис. 4). Чувствительность и специфичность КПНТ в отношении диагностики ишемии миокарда сопоставима со стресс-эхокардиографией, но при этом КПНТ лишен фактора субъективной интерпретации получаемых результатов, которая присуща ультразвуковой диагностике.

Наиболее распространенная жалоба, заставляющая пациента прекратить выполнение ФН, — одышка. Именно КПНТ позволяет клиницисту выявить генез данного синдрома [15] (Табл. 2).

Таблица 1

**КЛАССИФИКАЦИЯ ТЯЖЕСТИ СЕРДЕЧНОЙ НЕДОСТАТОЧНОСТИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ НАГРУЗОЧНОГО ТЕСТА (WEBER К.Т., 1988)**

Тяжесть СН	Класс	$VO_{2max}$ (мл/кг/мин)	$VO_2$ на АП (мл/кг/мин)	Максимальный сердечный индекс (л/мин/м <sup>2</sup> )
Нет или начальная	A	> 20	> 14	> 8
Умеренная до средней	B	16N20	11N14	6N8
Средняя до тяжелой	C	10N15	8N11	4N6
Тяжелая	D	< 10	< 8	< 4

**Примечание:** СН — сердечная недостаточность;  $VO_{2max}$  — максимальное потребление кислорода;  $VO_2$  на АП — потребление кислорода на уровне анаэробного порога.

## ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ДИАГНОСТИКА ОДЫШКИ

Показатели	Сердечная патология	Легочная патология	Психогенная одышка
$VO_{2peak}$	Снижен	Снижен	Норма
Анаэробный порог	Может быть снижен	Может быть снижен	Норма
Резерв дыхания ( $VE_{max}/MVV*100\%$ )	Норма	Снижен или отсутствует	Норма
Сердечный резерв ( $ЧСС_{max} - ЧСС_{мин}$ )	Снижен или отсутствует	Норма	Норма
Сатурация $O_2$ ( $SpO_2$ )	> 90 % во время ФН	Может снижаться < 90 % во время ФН	Норма
Функция внешнего дыхания в покое	Норма	Норма, обструктивный или рестриктивный паттерн	Норма
ОФВ <sub>1</sub> после ФН	Не изменяется	Снижение $\geq 15\%$	Норма

**Примечание:**  $VO_{2peak}$  — пиковое потребление кислорода; MVV — максимальная произвольная вентиляция; ОФВ<sub>1</sub> — объем форсированного выдоха за 1 секунду.

Таким образом, оценка газообмена при ФН значительно расширила области применения функциональных нагрузочных проб в кардиологии. Кроме того, улучшилась точность измерений важных показателей и количество получаемой информации, которая дает возможность интегрально оценить ответ всего организма в целом на ФН, не прибегая к использованию более сложных и дорогостоящих методик.

## Литература

1. American Thoracic Society / American College of Chest Physicians. ATS/ACCP statement on cardiopulmonary exercise testing // *Am. J. Respir. Crit. Care Med.* — 2003. — Vol. 167. — P. 211–277.
2. Wasserman K., Hansen J.E. et al. Principles of exercise testing and interpretation. Lippincott Williams & Wilkins, Baltimore, 1999. — 3<sup>rd</sup> ed.
3. Wasserman K., Sun X., Hansen J. Effect of biventricular pacing on the exercise pathophysiology of heart failure // *Chest.* — 2007. — Vol. 132. — P. 250N261.
4. Leclercq C. Upgrading from right ventricular pacing to biventricular pacing in pacemaker patients with chronic heart failure // *Heart.* — 2008. — Vol. 94. — P. 102N107.
5. De Jonge N., Kirkels H., Lahpor J., Klopping G. et al. Exercise performance in patients with end-stage heart failure after implantation of a left ventricular assist device and after heart transplantation: an outlook for permanent assisting? // *Am. Coll. Cardiol.* — 2001. — Vol. 37. — P. 1794N1799.
6. Maybaum S., Mancini D., Xydas S., Starling R., Aaronson K. et al. LVAD Working Group. Cardiac improvement during mechanical circulatory support: a prospective multicenter study of the LVAD Working Group // *Circulation.* — 2007. — Vol. 115. — P. 2497N2505.
7. Szlachetec J., Massie B.M., Kramer B.L., Topic N., Tubau J. Correlates and prognostic implication of exercise capacity in chronic congestive heart failure // *Am. J. Cardiol.* — 1985. — Vol. 55. — P. 1037–1042.
8. Cohn J.N., Johnson G.R., Shabetai R., Loeb H., Tristani F., Rector T., Smith R., Fletcher R. Ejection fraction, peak exercise oxygen consumption, cardiothoracic ratio, ventricular arrhythmias, and plasma norepinephrine as determinants of prognosis in heart failure: the V-HeFT VA Cooperative Studies Group // *Circulation.* — 1993. — Vol. 87, suppl. — V-15–V-16.
9. Arena R., Myers J., Guazzi M. The clinical and research applications of aerobic capacity and ventilatory efficiency in heart failure: an evidence-based review // *Heart Fail. Rev.* — 2008. — Vol. 13. — P. 245–269.
10. Clark A., Coats A. Usefulness of arterial blood gas estimations during exercise in patients with chronic heart failure // *Br. Heart J.* — 1994. — Vol. 71. — P. 528N530.
11. Corra U., Giordano A., Bosimini E., Mezzani A. et al. Oscillatory ventilation during exercise in patients with chronic heart failure. Clinical correlates and prognostic implication // *Chest.* — 2002. — Vol. 121. — P. 1572N1580.
12. Mezzani A., Agostini P., Cohen-Solal A., Corra U. et al. Standards for the use of cardiopulmonary exercise testing for the functional evaluation of cardiac patients: a report from the Exercise physiology Section of the European association for cardiovascular prevention and rehabilitation // *Eur. J. of Cardiovasc. Prev. and Rehab.* — 2009. — Vol. 16. — № 3. — P. 249N267.
13. Weber K.T., Janicki J.S., McElroy P. Determination of aerobic capacity and the severity of chronic cardiac and circulatory failure // *Circulation.* — 1987. — Vol. 78. — V140NV145.
14. Belardinelli R., Lacalaprice F., Carle F., Minnucci A., Cianci G., Perna G., D'Eusanio G. Exercise-induced myocardial ischemia detected by cardiopulmonary exercise testing // *Eur. Heart J.* — 2003. — Vol. 24. — P. 1304–1313.
15. Balady G., Arena R., Sietsema K., Myers J. et al. Clinician's Guide to Cardiopulmonary Exercise Testing in Adult: A Scientific Statement From the American Heart Association // *Circulation.* — 2010. — Vol. 122. — P. 191N225.