

УДК 612.821

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ АНАЭРОБНОГО ПОРОГА ПО ДИНАМИКЕ ЧСС В ПРОЦЕССЕ РАБОТЫ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ТЕСТА НАРАСТАЮЩЕЙ МОЩНОСТИ ДО ОТКАЗА

© 2019 г. А. В. Козлов^{1, *}, А. В. Якушкин², Р. С. Андреев³, А. В. Ваваев¹,
Р. В. Юриков¹, В. Д. Сонькин^{1, 2, 3, **}

¹Центр спортивных инновационных технологий и сборных команд Москомспорта, Москва, Россия

²ФГБОУ ВО Российский государственный университет физической культуры, спорта, молодежи и туризма, Москва, Россия

³ФГБНУ Институт возрастной физиологии РАО, Москва, Россия

*E-mail: 89165363085a@mail.ru

**E-mail: sonkin@mail.ru

Поступила в редакцию 24.08.2018 г.

После доработки 20.10.2018 г.

Принята к публикации 01.11.2018 г.

Предложен новый графический метод определения анаэробного порога (АнП), который был экспериментально апробирован в процессе тестирования максимальной аэробной производительности у 46 спортсменов циклических видов (средний возраст 20.3 ± 3.6 года, масса тела 68.3 ± 10.4 кг). Определяли показатели газообмена, ЧСС, время (от начала теста) наступления анаэробного порога (АнП) по показателям легочного газообмена, неметаболического излишка CO_2 , концентрации лактата в капиллярной крови, а также время наступления АнП, определяемого предлагаемым графическим методом по параметрам пульсограммы, полученной во время выполнения тестирования и 10 мин восстановления. Были использованы два различных протокола изменения нагрузки: рамп-тест на беговой дорожке и ступенчатый тест на велоэргометре. Независимо от протокола нагрузки и типа нагрузки, статистический анализ не выявил значимых различий между результатами измерения АнП у одних и тех же спортсменов по показателям газообмена или динамике лактата, с одной стороны, и результатами измерения АнП, установленного по параметрам пульсограммы графическим методом, с другой стороны. В тестировании со ступенчато повышающейся нагрузкой на велоэргометре, так же как и в тестировании с плавно повышающейся нагрузкой на беговом тредбане, показатели на уровне АнП, полученном с помощью графического метода, сильно коррелируют с показателями на АнП, полученными с помощью анализа динамики легочной вентиляции, неметаболического излишка углекислого газа и концентрации лактата ($p < 0.05$). Предлагаемый метод не требует использования сложной аппаратуры и инвазивных процедур и может найти широкое применение в практике спорта и фитнеса.

Ключевые слова: нагрузочное тестирование, анаэробный порог, динамика ЧСС.

DOI: 10.1134/S0131164619020036

Анаэробный порог (АнП) — один из наиболее важных показателей в оценке качества функционирования аэробной системы энергообеспечения мышечной деятельности и адаптации организма к специфической спортивной нагрузке. Несмотря на сохраняющиеся разногласия между разными научными школами относительно физиологической сущности и механизмов возникновения АнП, практически все авторы соглашаются с тем, что этот показатель наиболее информативен для суждения о потенциале аэробных возможностей спортсмена или физкультурника [1, 2], а также наиболее чувствителен к внешним факторам и

лучше других отражает эффективность тренировочного процесса [3].

Прямые измерения показателей легочного газообмена (V_{O_2}' , V_{CO_2}' , V_E' и др.) и концентрации лактата (La) в капиллярной крови, необходимые для определения АнП, нуждаются в дорогостоящем оборудовании и специалистах высокого уровня для проведения сложного анализа полученных данных. Подобное тестирование может проводиться только в специализированных лабораториях, что существенно сужает доступность этих методов контроля функционального состояния спортсменов.

Между тем, широкое распространение носимых регистраторов ЧСС позволяет получать большой объем персональной информации о динамике функционального состояния. Естественно, имеются многочисленные попытки использовать динамику ЧСС и вариабельность ритма сердца для оценки величины АНП и МПК [4–8].

Пульсовые характеристики нагрузки могли бы серьезно усовершенствовать оперативный контроль функционального состояния спортсменов, одновременно делая его проще и доступнее для всех участников тренировочного процесса, если бы по ним было возможно определять АНП.

В 1982 г. Ф. Конкони, М. Феррари, П.Г. Зиглио и др. [8] опубликовали метод определения анаэробного порога по точке отклонения (V_d) прямолинейной зависимости между приростом ЧСС и скоростью бега. Сопоставление результатов измерения координат точки V_d с показателем лактатного порога выявило высокую корреляцию ($r = 0.99$). Это позволило авторам сделать вывод о том, что значение ЧСС, при котором исчезает прямолинейная зависимость между приростом ЧСС и интенсивностью физической нагрузки, соответствует анаэробному порогу.

Тест Конкони подвергся активной критике со стороны многих исследователей, считающих его недостаточно точным и не вполне пригодным для работы со спортсменами [9–16]. По мнению многих авторов, парадигма Конкони, состоящая в сопоставлении кинетики пульса и кинетики показателя интенсивности нагрузки (скорость бега), не обеспечивает реальных надежных измерений АНП. Требуется иная парадигма, опирающаяся на другие базовые показатели.

Наиболее существенным из таких базовых показателей может выступать время от начала процедуры тестирования. На протяжении теста оно эквивалентно показателю мощности (интенсивности) нагрузки, который в большинстве протоколов повышающейся нагрузки до отказа равномерно нарастает с той или иной фиксированной скоростью; по завершении теста шкала времени сохраняет свое базовое значение для оценки динамики пульсовой кривой, и, в частности, для обнаружения границ быстрой и медленной фаз восстановительного периода – поскольку такая граница на графике ЧСС от времени выглядит как точка перегиба, абсолютно четко определяемая визуально. В этой парадигме величина АНП определяется в единицах времени от начала тестирования, что необычно и противоречит пониманию того факта, что пороговое значение характеризует интенсивность нагрузки, при которой начинает изменяться соотношение активностей аэробного и анаэробно-гликолитического процессов. Однако, поскольку время достижения любого физиологического показателя, при известном законе изменения мощности (интенсивности), является его функциональной характеристикой, мы мо-

жем попытаться формализовать процедуру нахождения значения времени АНП по параметрам пульсовой кривой с учетом как времени работы, так и периода восстановления.

Цель данной работы заключалась в валидации нового метода определения АНП, основанного на графическом анализе пульсовой кривой, полученной во время работы и последующего восстановления, в тестировании с повышающейся нагрузкой до отказа.

МЕТОДИКА

Экспериментальную работу проводили на базе ГКУ “ЦСТиСК” Москомспорта. В исследованиях приняли участие 46 спортсменов (2 р., 1 р., КМС): 32 бегуна, лыжника и биатлониста (средний возраст 20.8 ± 4.0 г., масса тела 68.3 ± 10.4 кг) и 14 велосипедистов (средний возраст 19.3 ± 2.6 г., масса тела 68.0 ± 9.6 кг). Каждый из испытуемых дал письменное информированное согласие на участие в исследовании. Все исследования выполнены с соблюдением норм биомедицинской этики, а протоколы тестирования одобрены Локальным биоэтическим комитетом ЦСТиСК.

Бегунов, лыжников и биатлонистов подвергали нагрузке на беговом тредбане *Woodway Pro XL* (США). Начальная скорость составляла 7 км/ч. Скорость плавно повышалась на 0.1 км/ч каждые 10 с (на 0.6 км/ч в мин). Велосипедисты выполняли ступенчато повышающуюся нагрузку на велоэргометре *Lode Excalibur sport* (Нидерланды). Начальная мощность составляла 60 Вт, далее мощность ступенчато повышали каждые 2 мин на 30 Вт. Во всех случаях работу продолжали до отказа. Отказ фиксировали индивидуально по заявлению испытуемого или при явной невозможности поддерживать заданную интенсивность нагрузки.

В процессе исследования регистрировали потребление кислорода, выделение углекислого газа и легочную вентиляцию с помощью газоанализатора *Cortex Metalyzer 3B* (Германия), который калибровали непосредственно перед проведением каждого исследования. ЧСС регистрировали по 5-секундным интервалам времени с помощью кардиомонитора *POLAR RS800* (Финляндия). Измерения вели на протяжении всей процедуры нагрузочного тестирования и 10 мин после нагрузки в положении стоя в беговом тестировании и в положении сидя в тестировании на велоэргометре. Кровь для определения концентрации лактата брали из дистальной фаланги безымянного или среднего пальца кисти непосредственно перед каждым тестированием и сразу после его завершения. Во время тестирования на беговом тредбане кровь брали каждые 3 мин, во время тестирования на велоэргометре – каждые 2 мин, в конце каждой ступени нагрузки. Концентрацию лактата в отобранных пробах капиллярной крови

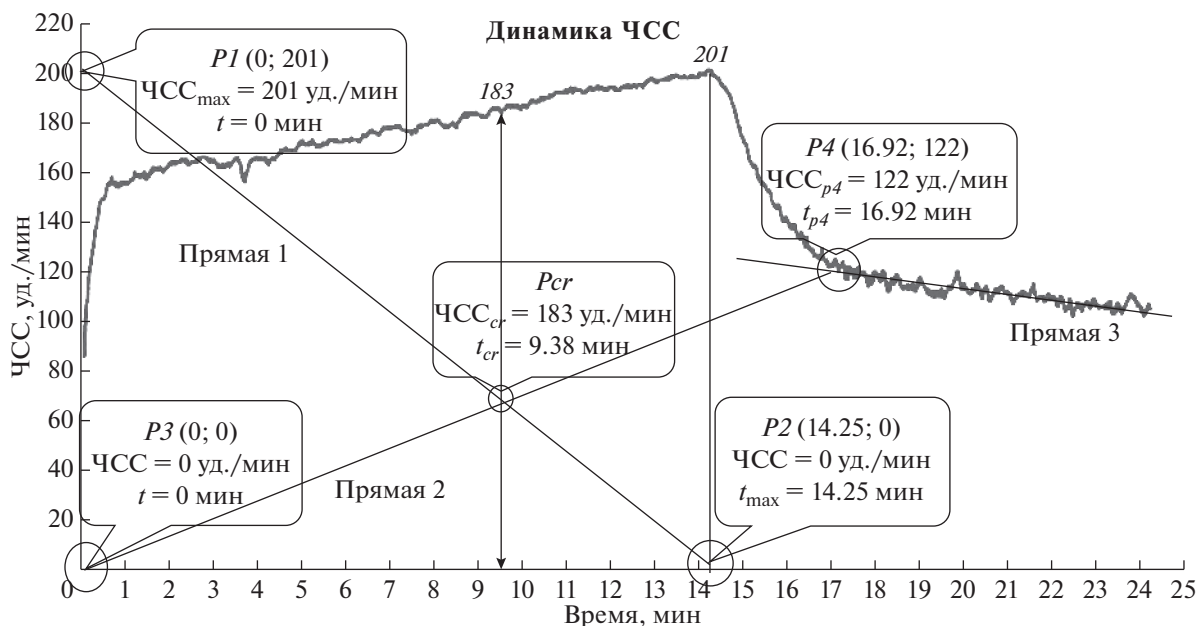


Рис. 1. Пример определения АнП графическим методом по динамике ЧСС испытуемого во время выполнения физической работы и восстановления.

Черной линией отмечено время отказа спортсмена от продолжения работы (t_{max}). Пояснение в тексте.

определяли на автоматическом анализаторе *Bi-osen C-Line* (EKF-diagnostic GmbH., Германия).

Статистический анализ данных проводился с помощью программы *R* (версия 3.5.1) и *MS Excel*. Для исследования связи между показателями использовали корреляционный анализ методом Спирмена. Для сравнения значений показателей АнП, определенных методами газоанализа, динамики концентрации лактата, со значениями показателей АнП, полученного графическим методом, использовали парный двухвыборочный t -тест для средних. Нормальность распределения проверяли методом Шапиро–Уилка и с помощью визуальной оценки гистограмм распределения и их квантиль-квантиль графиков. В случаях ненормального распределения, для сравнения значений показателей АнП был использован T -критерий Вилкоксона.

Определение значений времени достижения АнП. Определяли значения времени от начала тестирования, соответствующие возникновению признаков АнП, по резкому возрастанию уровня легочной вентиляции (V'_E) и неметаболического излишка углекислого газа ($\text{ExhCO}_2 = V'_{\text{CO}_2} - \text{RER}_{\text{покоя}} \times V'_{\text{O}_2}$) [17], и ускоренного накопления лактата в капиллярной крови. Значение времени, соответствующее ускоренному накоплению лактата (La) в капиллярной крови, определяли методом *D-max* [18].

Расчет значений времени достижения АнП по параметрам пульсограммы графическим методом.

Предлагаемый графический метод является эмпирическим. Построения проводили с использованием *MS Excel*. Пример расчета представлен на рис. 1, на котором по шкале абсцисс отложено время от начала процедуры тестирования, а на шкале ординат – величина ЧСС в данный момент времени. На графике, отражающем фактическую динамику ЧСС во время работы и 10 мин восстановления, необходимо провести две прямые пересекающиеся линии. На рис. 1 этими линиями являются прямые 1 и 2.

Прямая 1 соединяет точки $P1(0; 201)$ и $P2(14.25; 0)$. Значение по оси Y в точке $P1(0; 201)$ соответствует ЧСС_{max} (в нашем примере – 201 уд./мин). Значение по оси X в точке $P2(14.25; 0)$ соответствует времени прекращения работы в нагрузочном тесте t_{max} (в нашем примере 14.25 мин).

Прямая 2 проводится между точками $P3(0; 0)$ и $P4(16.92; 122)$ – цифры в скобках являются координатами этих точек для конкретного примера. Точка $P3(0; 0)$ – это точка начала отсчета в использованной системе координат, т.е. начальный момент проводимого теста. Точка $P4(16.92; 122)$ соответствует моменту времени ($t_{p4} = 16.92$ мин), когда график динамики ЧСС во время восстановления проходит через точку перегиба и таким образом переходит из быстрой экспоненциальной фазы в медленную, после чего приобретает практически линейный характер (при этом ЧСС_{p4} = 122 уд./мин). Для более точного нахождения точки $P4$ можно построить еще одну прямую (Прямая 3), совпадающую с линейным трендом

Таблица 1. Характеристика испытуемых, прошедших тестирование на тредбане ($n = 32$)

Параметр	Ед. изм.	$M \pm \sigma$
Длина тела	см	175.5 ± 8.41
Масса тела	кг	68.3 ± 10.40
МПК _{отн}	мл/мин/кг	58.88 ± 6.30
МПК _{абс}	л/мин	4.01 ± 0.70
ЧСС _{max}	уд./мин	199 ± 6.26
t_{max}	мин	16.34 ± 2.02
V_{max}	км/ч	16.64 ± 1.17

Примечание: МПК_{отн} – максимальное потребление кислорода, относительные значения; МПК_{абс} – максимальное потребление кислорода, абсолютные значения; ЧСС_{max} – значение максимальной ЧСС, зафиксированной в тесте; t_{max} – значение времени отказа спортсмена от продолжения физической работы в тесте; V_{max} – максимальная скорость бега, достигнутая в тесте.

той части пульсовой кривой восстановления, которая относится к медленной фазе восстановительного периода.

Точка перекреста прямых 1 и 2 (*Per*) соответствует 9.38 мин (t_{cr}) и 183 уд./мин (ЧСС, соответствующей этому значению времени – ЧСС_{cr}). Перпендикуляр, опущенный из точки пересечения Прямой 1 и Прямой 2 на ось абсцисс указывает ВРЕМЯ достижения АНП в данном протоколе нагрузочного тестирования. Все точки на графике (рис. 1) отмечены кружками и вкладками с координатами.

Таким образом, параметрами этого графического построения являются: 1) время от начала процедуры тестирования до наступления отказа от продолжения работы; 2) время (момент) прохождения пульсовой кривой точки перегиба в период перехода из быстрой в медленную фазу восстановления; 3) максимальная величина ЧСС, достигнутая в тесте; 4) величина ЧСС в момент прохождения пульсовой кривой точки перегиба в восстановительном периоде.

Именно эти четыре параметра (два временных и два пульсовых) позволяют построить на графике две пересекающиеся прямые, точка пересечения которых, по нашему мнению, соответствует времени (а следовательно – величине мощности (интенсивности) нагрузки) и частоте пульса в момент достижения АНП данным испытуемым.

Как показывает рис. 1, координаты точки *P1* и точки *P2* определяют на плоскости ординат положение Прямой 1, т.е. положение Прямой 1 зависит от значений времени отказа от продолжения работы в тестировании (t_{max}) и наивысшего значения частоты пульса в тесте (ЧСС_{max}). Координаты точки перегиба *P4* определяют на плоскости ор-

динат положение Прямой 2 относительно точки *P3* (0; 0), т.е. положение Прямой 2 зависит от значений времени и ЧСС, когда график динамики ЧСС во время восстановления переходит из быстрой фазы в медленную и приобретает линейный характер.

В результате пересечения прямых 1 и 2 определяется точка перекреста (*Per*) – точка, которая предположительно соответствует времени достижения АНП. Экспериментальное исследование было призвано проверить это предположение.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В ходе обследования части спортсменов были получены максимальные показатели нагрузочного тестирования на беговом тредбане, рассчитаны значения времени достижения вентиляторного, газометрического и лактатного АНП и его физиологические характеристики, а также параметры АНП, определенные графическим методом по пульсограмме. Результаты представлены в табл. 1, 2, 3.

Средние значения эргометрических и физиологических показателей на уровне АНП, полученном с помощью графического метода по параметрам пульсограммы, были сопоставлены с показателями на уровне АНП, полученном с помощью анализа динамики легочной вентиляции (V_E'), неметаболического излишка углекислого газа (ExhCO₂) и концентрации лактата (*La*) (табл. 2).

Методы парных сравнений не выявили статистически значимых различий между вариантами сопряженных рядов по представленным показателям (табл. 2) на АНП, установленном с помощью графического метода, и на АНП, полученных по анализу динамики легочной вентиляции (V_E'), неметаболического излишка углекислого газа (ExhCO₂) и концентрации лактата (*La*).

Показатели на уровне АНП, полученного графическим методом по параметрам пульсограммы, сильно коррелируют с показателями на других АНП, полученных с помощью анализа динамики легочной вентиляции, неметаболического излишка углекислого газа и концентрации лактата (табл. 3).

Далее было необходимо выяснить, зависит ли точность графического метода от протокола нагрузки и типа нагрузки. Для этого провели исследование с участием велосипедистов на велоэргометре, используя протокол не непрерывно, а ступенчато повышающейся нагрузки до отказа.

Результаты этого исследования представлены в табл. 4, 5, 6.

Как видно в табл. 5, показатели на уровне АНП, полученного с помощью графического метода, у спортсменов, прошедших тестирование на велоэргометре, так же как и у спортсменов, прошедших тестирование на беговом тредбане, прак-

Таблица 2. Средние значения эргометрических и физиологических показателей на уровне АНП, полученные с помощью различных методов в рамп-тесте на тредбане ($M \pm \sigma$)

Показатель на уровне АНП	Лактатный порог	Вентиляторный порог	Порог по ExhCO_2	Порог граф. методом
t достижения (мин)	10.36 ± 1.44	10.68 ± 1.54	10.91 ± 1.52	10.83 ± 1.39
Скорость (км/ч)	13.1 ± 0.84	13.3 ± 0.91	13.4 ± 0.89	13.3 ± 0.81
ЧСС (уд./мин)	179 ± 9	181 ± 8	182 ± 9	181 ± 9
V'_{O_2} (л/мин)	3.29 ± 0.56	3.33 ± 0.58	3.35 ± 0.58	3.34 ± 0.57
V'_E (л/мин)	90.8 ± 16.0	92.8 ± 17.0	94.4 ± 17.1	93.9 ± 16.1
ДК (ед.)	0.94 ± 0.07	0.95 ± 0.07	0.95 ± 0.07	0.95 ± 0.08
La (ммоль/л)	2.7 ± 0.91	2.91 ± 1.03	3.01 ± 1.0	2.92 ± 1.02

Примечание: t достижения – время достижения АНП; Скорость – скорость соответствующая АНП; ЧСС – ЧСС соответствующая АНП; V'_{O_2} – скорость потребления кислорода соответствующая АНП; V'_E – скорость вентилируемого воздуха на АНП; ДК – дыхательный коэффициент, соответствующий АНП; La – концентрация лактата, соответствующая АНП.

Таблица 3. Корреляционные взаимосвязи показателей на уровне АНП, установленного с помощью графического метода, с аналогичными показателями на уровне АНП, установленном по динамике V'_E , ExhCO_2 , La в беге на тредбане

Показатель на уровне АНП	Лактатный порог	Вентиляторный порог	Порог по ExhCO_2
t достижения (мин)	0.94	0.93	0.95
Скорость (км/ч)	0.90	0.94	0.93
ЧСС (уд./мин)	0.96	0.94	0.98
V'_{O_2} (л/мин)	0.99	0.98	0.99
V'_E (л/мин)	0.96	0.94	0.98
ДК (ед.)	0.97	0.95	0.98
La (ммоль/мин)	0.97	0.93	0.92

Примечание: обозначения см. табл. 2.

тически не отличаются от показателей на уровне АНП, полученного с помощью других методов.

В тестировании со ступенчато повышающейся нагрузкой на велоэргометре, так же как и в тестировании с плавно повышающейся нагрузкой на беговом тредбане, показатели на уровне АНП, полученном с помощью графического метода, сильно коррелируют с показателями на уровне АНП, полученном с помощью анализа динамики легочной вентиляции, неметаболического излишка углекислого газа и концентрации лактата, при $p < 0.05$ (табл. 6).

В тестировании со ступенчато повышающейся нагрузкой на велоэргометре, так же, как и в тестировании с плавно повышающейся нагрузкой на беговом тредбане, методы парных сравнений не выявили статистически значимых различий между вариантами сопряженных рядов по представленным показателям (табл. 2, 5) на уровне АНП, установленном с помощью графического метода,

Таблица 4. Характеристика испытуемых, прошедших тестирование в ступенчатом тесте на велоэргометре ($n = 14$)

Параметр	Ед. изм.	$M \pm \sigma$
Длина тела	см	175.9 ± 5.8
Масса тела	кг	68.0 ± 9.6
$\text{МПК}_{\text{отн}}$	мл/мин/кг	58.66 ± 8.7
$\text{МПК}_{\text{абс}}$	л/мин	3.95 ± 0.59
ЧСС_{max}	уд./мин	193 ± 7
t_{max}	мин	18.52 ± 2.49
W_{max}	Вт	320 ± 55
$W/\text{кг}_{\text{max}}$	Вт/кг	4.78 ± 0.97

Примечание: W_{max} – максимальная мощность педалирования, достигнутая в тесте; $W/\text{кг}_{\text{max}}$ – максимальная относительная мощность педалирования, достигнутая в тесте. Остальные обозначения см. табл. 1.

Таблица 5. Средние значения эргометрических и физиологических показателей на уровне АНП, полученные с помощью различных методов в ступенчатом тесте на велоэргометре ($M \pm \sigma$)

Показатель на уровне АНП	Лактатный порог	Вентиляторный порог	Порог по ExCO_2	Порог граф. методом
t достижения (мин)	11.74 ± 1.69	12.25 ± 1.97	12.20 ± 1.70	12.31 ± 1.59
W (Вт)	210 ± 37	218 ± 44	217 ± 41	219 ± 41
W (Вт/кг)	3.12 ± 0.63	3.24 ± 0.72	3.23 ± 0.68	3.26 ± 0.70
ЧСС (уд./мин)	160 ± 12	163 ± 11	163 ± 11	163 ± 11
V'_{O_2} (л/мин)	2.84 ± 0.35	2.94 ± 0.44	2.93 ± 0.39	2.94 ± 0.36
V'_E (л/мин)	70.5 ± 7.6	73.2 ± 7.9	72.9 ± 7.4	74.5 ± 8.0
ДК (ед.)	0.99 ± 0.08	1.00 ± 0.07	1.00 ± 0.07	1.01 ± 0.08
La (ммоль/л)	2.57 ± 0.76	2.86 ± 0.81	2.80 ± 1.00	2.91 ± 0.90

Примечание: обозначения см. табл. 2 и 4.

Таблица 6. Взаимосвязи показателей на уровне АНП, установленном с помощью графического метода, с показателями на уровне АНП, установленном по динамике V'_E , ExCO_2 , La в ступенчатом тесте на велоэргометре

Показатель на уровне АНП	Лактатный порог	Вентиляторный порог	Порог по ExCO_2
t достижения (мин)	0.93	0.95	0.97
W (Вт)	0.96	0.97	0.98
W (Вт/кг)	0.97	0.92	0.94
ЧСС (уд./мин)	0.95	0.98	0.92
V'_{O_2} (л/мин)	0.95	0.96	0.93
V'_E (л/мин)	0.88	0.73	0.79
ДК (ед.)	0.98	0.98	0.96
La (ммоль/мин)	0.91	0.89	0.92

Примечание: обозначения см. табл. 2 и 4.

и показателями на АНП, установленных по анализу динамики легочной вентиляции (V'_E), метаболического излишка углекислого газа (ExCO_2) и концентрации лактата, при $p < 0.05$.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Частота сокращений сердца – наиболее легко регистрируемый физиологический показатель при мышечной работе, несущий обширную информацию о состоянии и функциональных возможностях организма. На анализе динамики ЧСС во время работы и восстановления базируются весьма популярные тесты для оценки различных сторон работоспособности организма – такие как PWC_{170} , Гарвардский степ-тест, проба Летунова, проба Мастера, ИНПД и другие [19–21]. При этом для характеристики аэробных возмож-

ностей обычно используется линейная зависимость динамики ЧСС от мощности (интенсивности) нагрузки в процессе работы, а для характеристики анаэробных возможностей используют нелинейную динамику ЧСС в восстановительном периоде. Крайне редко анализируется весь ход пульсовой кривой – как в работе, так и в восстановительном периоде.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что эмпирически разработанный графический метод определения АНП по динамике ЧСС в процессе предельной работы и восстановления открывает хорошие возможности его практического применения. Между тем, остаются вопросы теоретического плана – каковы физиологические механизмы, лежащие в основе данной эмпирической конструкции?

Функциональный смысл Прямой 1 состоит, вероятно, в том, что она позволяет наглядно увидеть объем затраченных организмом функциональных ресурсов. Отсекаемый ею на графике (рис. 1) треугольник $P1, P2, P3$ служит (с известной долей допущения) графическим выражением суммарных затрат организма на выполнение предельной физической нагрузки, и его площадь может быть вычислена в единицах “удар”, т.е. числа систол, произведенных за время работы. В конкретном примере, приведенном на рис. 1, площадь этого треугольника составляет:

$$S(P1, P2, P3) = \\ = (200 \text{ уд/мин} \times 14.25 \text{ мин})/2 = 1425 \text{ уд.}$$

В зависимости от индивидуальной специфики, этот показатель может варьироваться из-за изменений максимальной достигнутой величины ЧСС и благодаря изменениям в длительности выполнения теста. И тот, и другой фактор может значимо влиять на суммарные энергозатраты организма при выполнении напряженной работы.

Функциональный смысл Прямой 2, заключен в том, что она характеризует величину анаэробных сдвигов за время предельной нагрузки, вернее эту величину характеризует точка перегиба ($P4$), которая определяет угол наклона Прямой 2, и положение которой зависит от соотношения величин быстрой (БФ) и медленной фракций пульсового долга: значение точки перегиба по оси Y (значение $ЧСС_{p4}$) тесно коррелирует с объемом общего пульсового долга за 10 мин ($0.95, p < 0.05$), а время погашения БФ пульсового долга (от которой зависит значение точки перегиба по оси X) тесно коррелирует с объемом БФ пульсового долга ($0.94, p < 0.05$).

Использованные для графического построения Прямой 1 характеристики пульсовой кривой работы, так же, как и динамика ЧСС в тесте Конкони, характеризуют скорость нарастания ЧСС по мере увеличения нагрузки, а значит и скорость повышения интенсивности окислительных процессов во время выполнения работы нарастающей мощности. Разница методов заключается в том, что мы не ищем небольшие отклонения от линейности этой зависимости, которые трудно выделяются и недостаточно наглядны для того, чтобы быть надежным ориентиром в оценке АНП. Мы используем совершенно другой критерий — момент времени, когда на смену первой, “быстрой” фазе восстановления ЧСС, приходит вторая, “медленная”. На наш взгляд, это — одна из наиболее важных характеристических точек пульсовой кривой “работа—восстановление”.

В далеком 1933 г., когда еще не были известны функции аденозинтрифосфорной кислоты (АТФ) и почти ничего не знали о креатинфосфате (КрФ) и его метаболизме, *R. Margaria et al.* показали, что именно медленная фаза восстановления после предельной нагрузки сопряжена с погашением той части кислородного долга, которая определяется наличием в организме продуктов анаэробного гликолиза, а точнее — молочной кислоты [22]. Опираясь на это открытие, в 1963 г. *R. Margaria* выдвинул концепцию трех источников энергии для мышечной деятельности, впервые обратив внимание на “алактатный” процесс, более всего связанный с метаболизмом КрФ в мышцах [23, 24].

Сегодня эта концепция общепризнана, хотя успехи современной молекулярной биологии далеко перешагнули когда-то пионерские взгляды *R. Margaria* и его последователей. Известно, что активация работы митохондрий зависит от так называемого “энергетического потенциала клетки” — отношения фосфорилированных макроэргов к общему количеству потенциально макроэргических молекул [25, 26]. Понижение содержания КрФ и одновременное повышение концентрации креатина являются неременным условием для активации гликолиза и окислительного фосфорилирования [27–29], соотношение активности которых зависит от мощности нагрузки.

По мнению авторов [30], скорость ресинтеза КрФ после сокращения является показателем окислительной способности скелетных мышц, а связь между КрФ и лактатом в сокращающейся мышце может быть использована в качестве показателя гликолитической способности. *R. Harris et al.* показали, что при интенсивных истощающих нагрузках в мышце имеется линейная зависимость между отношением АТФ/АДФ и содержанием лактата [31].

С ресинтезом КрФ, по мнению ряда авторов [32, 33], связан объем БФ кислородного долга. Чем больше относительная доля быстрого компонента кислородного долга — тем, вероятно, выше достижимый энергетический потенциал клеток. При таком взгляде, роль КрФ становится ключевой с точки зрения регуляции митохондриальной активности. Общепризнано, что относительный объем быстрой и медленной фракций кислородного долга, а также его дериватов в виде пульсовых кривых восстановления, имеет важное значение для прогноза работоспособности, т.к. соотношение их величин зависит от степени вовлеченности в работу разных механизмов энергообеспечения (т.е. от индивидуальных физиологических особенностей работоспособности спортсмена).

По этой причине, по-видимому, точка перегиба, отображающая условную границу быстрой и медленной фаз восстановительного периода, имеет прогностическое значение. Используемые для графического построения прямые 1 и 2, отражают качество энергoveгетативной регуляции на уровне организма, выражающееся в скорости нарастания ЧСС, и качество метаболической регуляции на уровне клеток и тканей, проявляющееся в величине и соотношении параметров быстрой и медленной фаз восстановления после предельной работы.

При таком подходе, положение точки перекреста прямых 1 и 2 на графике динамики ЧСС спортсмена во время работы нарастающей мощности и последующего восстановления, так же как и величина АНП, отражает соотношение вкладов аэробного и анаэробного процессов энергопродукции в обеспечение предельной работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен графический метод определения АНП в тестировании с повышающейся циклической нагрузкой до отказа по динамике ЧСС при выполнении физической нагрузки и в процессе восстановления. Применение метода позволяет обходиться без газоанализа или инвазивных процедур для определения одного из важнейших показателей физического состояния – индивидуального уровня АНП.

Статистический анализ не выявил значимых различий между результатами измерения АНП у одних и тех же спортсменов по показателям газообмена, динамике лактата, и результатам оценки АНП, установленного графическим методом по параметрам пульсограммы, независимо от протокола нагрузки и нагрузочного устройства, на котором выполнялась работа.

В тестировании со ступенчато повышающейся нагрузкой на велоэргометре, так же как и в тестировании с плавно повышающейся нагрузкой на беговом тредбане, показатели на уровне АНП, полученном с помощью графического метода, сильно коррелируют с показателями на уровне АНП, полученного с помощью анализа динамики легочной вентиляции, неметаболического излишка углекислого газа или концентрации лактата.

Предлагаемый эмпирический метод точен, прост, не нуждается в использовании дорогостоящей и сложной газометрической аппаратуры и высококвалифицированном персонале, его точность не зависит от параметров протокола нагрузки и выбора нагрузочного оборудования. Все это открывает широкие перспективы использования метода на практике; в подготовке спортсменов и в фитнесе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Joyner M.J., Coyle E.F. Endurance exercise performance: the physiology of champions // *J. Physiol.* 2008. V. 586. № 1. P. 35.
2. Lundby C., Robach P. Performance enhancement: what are the physiological limits? // *Physiology (Bethesda)*. 2015. V. 30. P. 282.
3. Мак-Дугалл Д.Д., Говард Э. Уенгер, Говард Дж. Гринн. Физиологическое тестирование спортсмена высокого класса. Киев: Олимпийская литература, 1998. 431 с.
4. Селуянов В.Н., Калинин Е.М., Пак Г.Д. и др. Определение Анаэробного порога по данным легочной вентиляции и вариативности кардиоинтервалов // *Физиология человека*. 2011. Т. 37. № 6. С. 106.
5. Mourof L., Fabre N., Savoldelli A., Schena F. Second ventilatory threshold from heart-rate variability: valid when the upper body is involved? // *Human Kinetics in International Journal of Sports Physiology and Performance International Journal of Sports Physiology and Performance*. V. 9. P. 695.
6. Buchheit M., Solano R., Millet G.P. Heart-rate deflection point and the second heart-rate variability threshold during running exercise in trained boys // *Exercise Science*. 2007. V. 19. P. 192.
7. Mendia-Iztueta I., Monahan K., Kyröläinen H., Hynynen E. Assessment of heart rate variability thresholds from incremental treadmill tests in five cross-country skiing techniques // *PLoS One*. 2016. V. 11. № 1:e0145875.
8. Conconi F., Ferrare M., Ziglio P.G. et al. Determination of the anaerobic threshold by a non-invasive field test in runners // *Journal of Applied Physiology*. 1982. V. 52. № 4. P. 869.
9. Jones A.M., Doust J.H. Lack of reliability in Conconi's heart rate deflection point // *International Journal of Sports Medicine*. 1995. V. 16. № 8. P. 541.
10. Jones A.M., Doust J.H. The Conconi test is not valid for estimation of the lactate turnpoint in runners // *J. Sports Sciences*. 1997. V. 15. № 4. P. 385.
11. Weltman A., Snead D., Seip R. et al. Prediction of lactate threshold and fixed blood lactate concentrations from 3200-m running performance in male runners // *International J. Sports Medicine*. 1987. V. 8. № 6. P. 401.
12. Vachon J.A., Bassett D.R., Clarke S. Validity of the heart rate deflection point as a predictor of lactate threshold during running // *Journal of Applied Physiology*. 1999. V. 87. № 1. P. 452.
13. Kuipers H., Keizer H.A., Vries T. et al. Comparison of heart rate as a non-invasive determinant of anaerobic threshold with the lactate threshold when cycling // *Europ. J. Appl. Physiol.* 1988. V. 58. № 3. P. 303.
14. Tokmakidis S., Léger L. Comparison of mathematically determined blood lactate and heart rate "threshold" points and relationship with performance // *Europ. J. Appl. Physiol.* 1992. V. 64. № 4. P. 309.
15. Walker J., Eisenman P. Validity of a heart rate inflection point or a 3.2 kilometer performance pace as estimators of maximal steady-state running velocity in high school runners // *Sports Medicine, Training and Rehabilitation*. 1995. V. 6. № 3. P. 215.

16. *Thorland W., Podolin D., Mazzeo R.* Coincidence of lactate threshold and HR-power output threshold under varied nutritional states // *International J. Sports Medicine*. 1994. V. 15. № 6. P. 301.
17. *Wasserman K., Hansen J.E., Sue D.Y. et al.* Principles of Exercise Testing and Interpretation 3rd ed. Lipincott, Williams & Wilkins, Baltimore, Maryland, 1999. P. 551.
18. *Cheng B., Kuipers H., Snyder A.C. et al.* A New Approach for the Determination of Ventilatory and Lactate Thresholds // *International J. Sports Medicine*. 1992. V. 13. № 7. P. 518.
19. *Master F.M., Jppenheimer E.T.* A siple exercise tolerance test for circulation efficiency with standart tables for normal individuals // *Amer. J. Med. Sei.* 1929. V. 177. P. 223.
20. *Летунов С.П., Мотылянская Р.Е.* Определение состояния тренированности спортсменов. Проблемы спортивной медицины. Методы врачебно-физиологических исследований спортсменов: Сб. науч. тр. М.: Физкультура и спорт, 1972. С. 6.
21. *Сонькин В.Д., Тамбовцева Р.В.* Развитие мышечной энергетики работоспособности в онтогенезе. М.: ЛИБРОКОМ, 2011. 368 с.
22. *Margaria R., Edwards H.T., Dill D.B.* The possible mechanism of contracting and plaining the oxygen debt and the role of lactic acid in muscular contraction // *Am. J. Phisiol.* 1933. V. 106. № 3. P. 689.
23. *Margaria R.* Biochemistry of muscular contraction and recovery // *J. Sports. Med. and Physical Fitness*. 1963. V. 3. P. 145.
24. *Margaria R., Cerretelli R., di Prampero P.E. et al.* Kinetics and mechanism of oxygen debt contraction in man // *J. Appl. Phisiol.* 1963. V. 18. № 2. P. 371.
25. *Atcinson D.E.* The Energy charge of the adenylic nucleotide pool as a regulatory parameter // *Biochemistry*. 1968. V. 7. № 5. P. 4030.
26. *Atcinson D.E.* Cellular energy metabolism and its regulation. N.Y.; Academy Press, 1977. P. 151.
27. *Демин В.И.* Показатели состояния дыхательной цепи митохондрий, анаэробного гликолиза и креатинкиназной системы скелетных мышц в онтогенезе // Особенности развития физиологических систем школьника. М.: Просвещение, 1983. С. 77.
28. *Edwards H.T.* Interaction of chemical electromechanical factors in human skeletalmuscule fatigue // *Acta Phisiol. Scand.* 1986. V. 128. Suppl. № 556. P. 15.
29. *Wyss M., Kaddurah-Daouk R.* Creatine and Creatinine Metabolism // *Physiological Reviewc.* 2000. V. 80. № 3. P. 1107.
30. *Sjoholm H., SahlinK., Edstrom L., Hultman E.* Quantitative estimation of anaerobic and oxidative energy metabolism and contraction characteristics in intact human skeletal muscle in response to electrical stimulation // *Clinical Phvsiology*. 1983. V. 3. P. 227.
31. *Harris R.C., Sahlin K., Hultman E.* Phosphagen and lactate contents of m. quadriceps femoris of man after exercise // *J. Appl. Phisiol.* 1977. V. 43. P. 852.
32. *Margaria R.* Biochemistry and energetics of muscular exercise. Oxford: Clarendon Press, 1976. P. 146.
33. *Cerretelli R.* Oxygen debt: definition, role and significance // *Physiol. Chem. Train. and Detrain*. 2nd int. Course *Physiol. and Biochem. Exerc. and Detrain*. Nice, 1982. Basel, 1984. P. 68.

A Method for the Evaluation of Anaerobic Threshold Based on Heart Rate Dynamics during Incremental Exercise to Exhaustion and Recovery

A. V. Kozlov^{a,*}, A. V. Yakushkin^b, R. S. Andreev^c, A. V. Vavaev^a, R. V. Yurikov^a, and V. D. Sonkin^{a, b, c, **}

^aMoscow Centre of Advanced Sports Technologies, Moscow, Russia

^bRussian State University of Physical Education, Sport, Youth and Tourism, Moscow, Russia

^cInstitute of Developmental Physiology RAE, Moscow, Russia

*E-mail: 89165363085a@mail.ru

**E-mail: sonkin@mail.ru

We propose a new graphical method for the evaluation of anaerobic threshold. The method was experimentally tested during the measurements of maximal aerobic capacity in 46 endurance athletes (mean age: 20.3 ± 3.6 years; body weight 68.3 ± 10.4 kg). We monitored the ventilation parameters, heart rate, the time of anaerobic threshold (basing on pulmonary ventilation parameters), non-metabolic CO₂ excess, lactate concentration in capillary blood, as well as time of anaerobic threshold basing on the graphical method using a pulsogram obtained during the testing time and 10 minutes of recovery. We used two exercise protocols, in particular a ramp-test on a treadmill and a step incremental test on cycle ergometer. Regardless of the protocol and exercise type, no significant differences were found for the time of anaerobic threshold calculated basing on the ventilation parameters and lactate dynamics and basing on the pulsogram parameters. In both exercise protocols, the parameters of anaerobic threshold obtained by the graphical method correlate significantly with the parameters of anaerobic threshold obtained basing on the evaluation of pulmonary ventilation parameters, non-metabolic CO₂ excess and lactate concentration in capillary blood. Proposed pulsogram-based method requires no complex equipment or invasive procedures; thus, it can be easily introduced in sports practice.

Keywords: exercise testing, anaerobic threshold, heart rate dynamics.