ФИЗИОЛОГИЯ ЧЕЛОВЕКА, 2022, том 48, № 1, с. 18–25

УДК 612.821

УДЕЛЬНАЯ ИНТЕНСИВНОСТЬ ФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ ЗАТРАТ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОЙ РАБОТЕ РАЗЛИЧНОЙ МОЩНОСТИ

© 2022 г. А. В. Козлов[1, *], А. В. Ваваев[1], А. В. Якушкин[1], А. И. Лаптев[2], Р. В. Юриков[2], В. Д. Сонькин[1, 2, 3, **]

[1]ГКУ Центр спортивных инновационных технологий и подготовки сборных команд Москомспорта, Москва, Россия

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

[3]ФГБНУ Институт возрастной физиологии РАО, Москва, Россия

**E-mail: 89165363085a@mail.ru*

***E-mail: sonkin@mail.ru*

Поступила в редакцию 13.07.2021 г.
После доработки 31.08.2021 г.
Принята к публикации 21.09.2021 г.

Цель исследования – поиск пульсометрических критериев интенсивности энергозатрат при напряженной циклической работе. В первой части исследования 9 спортсменов (перворазрядники и кандидаты в мастера спорта (КМС), возраст – 18.3 ± 1.5 лет, вес – 72.2 ± 8.04 кг), специализирующихся в *BMX* (*Bicycle MotoX*), выполняли в разные дни серию из пяти максимальных упражнений на велоэргометре с предельной мощностью и фиксированной продолжительностью 10, 30, 60, 120 и 360 с. Во второй части исследования 8 спортсменов–велошоссейников (перворазрядники, КМС, возраст – 21.3 ± 3.4 лет, вес – 72.9 ± 11.3 кг) выполняли серию из двух упражнений на велоэргометре с мощностью аэробного порога (АэП) и мощностью анаэробного порога (АнП), каждое продолжительностью 30 мин. Между парными значениями удельной интенсивности физиологических затрат (УИФЗ), рассчитанными по потреблению кислорода – $УИФЗ_{O_2}$ и по пульсовым суммам – $УИФЗ_{fh}$, во всем диапазоне мощности от АнП до максимальной анаэробной мощности выявлены высокие коэффициенты корреляции ($p < 0.05$, $R^2 > 0.9$), что позволяет в тренировочной практике для оценки интенсивности энергозатрат в упражнении использовать пульсометрический показатель $УИФЗ_{fh}$.

Ключевые слова: предельные и непредельные упражнения, интенсивность энергозатрат, пульсометрические показатели, спортсмены велосипедисты.

DOI: 10.31857/S0131164622010076

Как известно, нагрузки различной мощности вызывают разные по интенсивности и структуре физиологические затраты, что было постулировано В.С. Фарфелем в его концепции “зон относительной мощности”, и в дальнейшем подтверждено результатами биохимических исследований [1]. При этом в каждой из этих зон для характеристики нагрузки применяются разные инструменты и показатели. Так, в зонах умеренной и большой мощности нагрузки (по Фарфелю) используют линейную зависимость частоты сердечных сокращений (ЧСС) и потребления кислорода от мощности нагрузки, тогда как в зонах субмаксимальной и максимальной мощности необходимо применять нелинейные характеристики – например, предложенный в середине 1980-х гг. показатель “интенсивности накопления пульсового долга” (ИНПД) [2], который позволяет оценить интенсивность физиологических затрат организма при предельной по длительности работе в условиях активного анаэробного энергообеспечения.

Между тем, уровень (интенсивность) физиологических затрат – один из важнейших параметров, учитывающихся при формировании тренировочных программ и методик. Разработке разных способов его оценки были посвящены в последние десятилетия многие исследования отечественных и зарубежных авторов [3–11].

Для определения интенсивности упражнения в лабораторных условиях обычно используют показатели уровня кислородного запроса и параметры его составляющих [12–20].

В тренировочной практике для оценки интенсивности нагрузки и ее регламентации, обычно используются абсолютные значения ЧСС, а также разнообразные методы, основанные на отно-

сительных значениях ЧСС, например, метод расчета относительного рабочего прироста ЧСС [3, 4], метод расчета ИНПД [2] и др. Однако во всех этих случаях предлагаются инструменты, решающие частные проблемы оценки физиологических затрат в том или ином диапазоне мощности.

Один из методов оценки интенсивности нагрузки состоит в расчете показателя, выраженного отношением уровня кислородного запроса упражнения к максимальному потреблению кислорода, который авторы этой идеи назвали единицами максимального метаболического уровня (*maximum metabolic rate*, *MMR*) [19]. Этот метод позволяет оценить относительную интенсивность упражнений во всем диапазоне физических нагрузок вплоть до максимальной анаэробной мощности по уровню кислородного запроса, нормированного по *MMR*.

Однако измерения и расчет параметров кислородного запроса и его составляющих требуют дорогостоящего оборудования и специалистов–физиологов высокого уровня. Подобные измерения могут проводиться только в специализированных лабораториях, что существенно сужает доступность этих методов контроля состояния спортсмена в тренировочном процессе.

Цель исследования – поиск пульсометрических критериев интенсивности при напряженной циклической работе для количественной оценки уровня энергетических затрат и нормирования физических нагрузок, выполняемых спортсменом в диапазоне от аэробного порога (АэП) до максимальной анаэробной мощности.

МЕТОДИКА

Экспериментальную работу проводили на базе ГКУ “ЦСТиСК” Москомспорта (г. Москва). Исследование состояло из двух частей. В первой части разрабатывали УИФЗ$_{fh}$ и проверяли его информативность в анаэробном диапазоне – от критической до максимальной анаэробной мощности. Во второй части проверяли информативность УИФЗ$_{fh}$ в аэробных упражнениях – на мощности АэП и мощности анаэробного порога (АнП).

В исследовании участвовали две группы спортсменов. В первой части исследования группа из 9 спортсменов (1 разряд, КМС, возраст – 18.3 ± 1.5 лет, вес – 72.2 ± 8.04 кг), специализирующихся в *BMX* (*Bicycle MotoX*), последовательно выполняла серию максимальных упражнений на велоэргометре *Lode Excalibur Sport* (Нидерланды) с предельной мощностью и фиксированной продолжительностью 10, 30, 60, 120 и 360 с, с отдыхом 1–2 дня между тестированиями. Максимальные упражнения продолжительностью 10 и 30 с спортсмены выполняли в режиме “во всю”, предельные упражнения 60 и 120 с выполняли с установкой проявить наибольшую производительность, которая им была доступна по состоянию работоспособности на момент тестирования. В упражнениях длительностью 360 с спортсменов ориентировали на работу с критической мощностью, зафиксированную в тесте равномерно нарастающей мощности до отказа (рамптест), с установкой показать максимальную производительность. Все упражнения выполняли в разные дни.

Во второй части исследования группа из 8 спортсменов (1 разряд, КМС, возраст – 21.3 ± ± 3.4 лет, вес – 72.9 ± 11.3 кг), специализирующихся в шоссейных гонках, в разные дни последовательно выполняла серию из двух непредельных упражнений на велоэргометре с мощностью АэП и с мощностью АнП, каждое продолжительностью 30 мин.

Перед каждым тестированием спортсмены выполняли стандартную разминку на велоэргометре (мощностью 60 Вт, длительностью 5 мин), после прекращения разминки спортсмен оставался “в седле” (5 мин), в это время фиксировался предстартовый уровень функциональных показателей. Функциональные показатели фиксировали также во время выполнения работы и по окончанию упражнения, в процессе восстановления, в течение которого испытуемый оставался в положении сидя на велоэргометре 10 мин.

Предварительно, за 2–3 дня до начала серии максимальных тестов, каждый спортсмен выполнял рамптест на велоэргометре для определения максимального потребления кислорода (МПК) по единому протоколу: начальная мощность педалирования – 60 Вт, мощность равномерно повышалась на 15 Вт/мин, частота вращения педалей 70–75 оборотов. Во всех случаях работа продолжалась до отказа. Отказ фиксировали индивидуально по заявлению испытуемого или при снижении частоты педалирования на 30%. Пороги аэробного и анаэробного обмена определяли по зависимости концентрации лактата от мощности работы во время тестирования. Мощность порога аэробного обмена соответствовала началу отклонения концентрации лактата от ее линейного повышения [21]. Мощность порога анаэробного обмена соответствовала началу быстрого увеличения концентрации лактата в крови методом *D-max* [22].

В процессе исследования регистрировали ЧСС с помощью датчиков *Polar H10* (Финляндия), а также потребление кислорода, выделение углекислого газа, легочную вентиляцию с помощью газоанализатора *Cosmed Qark* (Италия), который калибровали перед проведением каждого исследования. Данные усреднялись в пятисекундных интервалах.

Для определения пульсовой стоимости упражнения рассчитывали пульсовые суммы за время

выполнения упражнения и за 5 мин восстановления.

Концентрацию лактата определяли автоматическим анализатором *Biosen C–Line* (*EKF–diagnostic GmbH.*, Германия) перед упражнением, сразу по окончанию работы и далее на 3, 5, 7, 10 мин после окончания работы. Максимальная концентрация лактата в крови (La_{max}) обычно фиксировалась на третьей или пятой минутах восстановления.

Статистический анализ данных проводили в среде *R* (версия 3.5.1) и с помощью *MS Excel*. Для исследования силы связи между показателями использовали корреляционный анализ по методу Спирмена. Нормальность распределения проверяли методом Шапиро-Уилка и с помощью визуальной оценки гистограмм распределения и их квантиль-квантиль графиков.

Вычисляемые показатели:

$minVO_2$ – потребление кислорода в состоянии относительного покоя перед стартом (л/мин).

$\sum RO_2$ – кислородный запрос упражнения (л), рассчитывался как сумма кислородного прихода и кислородного долга:

$$\sum RO_2 = \sum O_2 + \sum O_2d, \quad (1)$$

где $\sum O_2$ – кислородный приход (л) – объем потребленного кислорода сверх предстартового уровня, рассчитанный за время выполнения упражнения; $\sum O_2d$ – кислородный долг упражнения (л) – объем потребленного кислорода сверх предстартового уровня, рассчитанный за 10 мин восстановления.

VRO_2 – скорость образования кислородного запроса (л/мин), рассчитывалась как отношение кислородного запроса ко времени работы:

$$VRO_2 = \sum RO_2/t, \quad (2)$$

где $\sum RO_2$ – кислородный запрос упражнения (л); t – время работы (мин).

$УИФЗ_{O_2}$ – удельная интенсивность физиологических затрат по кислороду, рассчитывалась как отношение скорости образования кислородного запроса к индивидуальному уровню максимального потребления кислорода сверх исходного уровня. Одна единица $УИФЗ_{O_2}$ соответствует уровню кислородного запроса, равного величине индивидуального МПК за вычетом предстартового уровня потребления кислорода (2):

$$УИФЗ_{O_2} = VRO_2/\Delta VO_2max, \quad (3)$$

где VRO_2 – скорость образования кислородного запроса в упражнении (л/мин); ΔVO_2max – индивидуальный максимум потребления кислорода за вычетом исходного уровня: разница между максимальным потреблением кислорода и $minVO_2$ (л/мин).

$V\Delta La_{max}$ – скорость накопления лактата (ммоль/л/мин), рассчитывалась как отношение разницы между зафиксированной максимальной и предстартовой концентрацией лактата, ко времени работы:

$$V\Delta La_{max} = \Delta La_{max}/t. \quad (4)$$

$\sum\Delta fh_{tot}$ – суммарная пульсовая стоимость упражнения (уд.), рассчитывалась как сумма пульсового прихода за время работы и пульсового долга за 5 мин восстановления:

$$\sum \Delta fh_{tot} = \sum \Delta fh_p + \sum \Delta fh_в, \quad (5)$$

где $\sum\Delta fh_p$ – пульсовой приход (уд.) – пульсовая сумма сверх предстартового уровня, рассчитанная за время выполнения упражнения; $\sum\Delta fh_в$ – пульсовой долг (уд.) – пульсовая сумма сверх предстартового уровня, рассчитанная за 5 мин восстановления.

$V\Delta fh_{tot}$ – скорость накопления пульсовой стоимости упражнения (уд./мин), рассчитывалась как отношение суммарной пульсовой стоимости упражнения ко времени работы:

$$V\Delta fh_{tot} = \sum \Delta fh_{tot}/t, \quad (6)$$

где $\sum\Delta fh_{tot}$ – суммарная пульсовая стоимость упражнения (уд.).

$УИФЗ_{fh}$ – удельная интенсивность физиологических затрат по пульсу за время работы в упражнении (у. е.), рассчитывалась как отношение скорости образования пульсовой стоимости упражнения к максимальному приросту ЧСС (пульсовому резерву):

$$УИФЗ_{fh} = V\Delta fh_{tot}/\Delta ЧСС_{max}, \quad (7)$$

где $V\Delta fh_{tot}$ – скорость накопления пульсовой стоимости упражнения (уд./мин); $\Delta ЧСС_{max}$ – пульсовой резерв (уд./мин): разница между $ЧСС_{max}$, установленной в рамптесте и предстартовым уровнем ЧСС в тестировании.

В нашем исследовании во многих случаях мощность упражнений была выше критической. После окончания работы ЧСС восстанавливалась значительно дольше 5 мин, но наиболее быстрые изменения ЧСС после окончания нагрузки завершались к пятой минуте восстановления, поэтому сумма пульсового долга рассчитывалась за 5 мин. В случае, если спортсмен во время восстановления достигал предстартового уровня раньше, чем за 5 мин по динамике ЧСС или 10 мин по динамике потребления кислорода, то кислородный и пульсовой долг рассчитывали за реальное время восстановления.

Таблица 1. Антропометрические и максимальные функциональные показатели участников 1 и 2 серий исследований по результатам рамптеста

Параметр	1 серия исследований	2 серия исследований
	$M \pm \sigma$, $n = 9$	$M \pm \sigma$, $n = 8$
Возраст, лет	18.3 ± 1.5	21.3 ± 3.4
Масса тела, кг	72.2 ± 8.04	72.9 ± 11.3
Длина тела, см	177 ± 12	181 ± 11
$МПК_{абс}$, л/мин	3.29 ± 0.49	4.136 ± 0.61
$МПК_{отн}$, мл/мин/кг	45.9 ± 7.00	57.01 ± 6.84
$ЧСС_{max}$, уд./мин	188 ± 11	188 ± 6
Абс. W_{max}, Вт	296 ± 33	371 ± 53
Отн. W_{max}, Вт/кг	4.11 ± 0.35	5.14 ± 0.66

Примечание: $МПК_{отн}$ – максимальное потребление кислорода, относительные значения; $МПК_{абс}$ – максимальное потребление кислорода, абсолютные значения; $ЧСС_{max}$ – значение максимальной ЧСС, зафиксированной в тесте; Абс. W_{max} – абсолютная максимальная мощность, достигнутая в тесте; Отн. W_{max} – относительная максимальная мощность, достигнутая в тесте.

Таблица 2. Эргометрические и физиологические показатели, полученные в упражнениях с предельной мощностью различной продолжительности ($M \pm \sigma$, $n = 9$)

Показатели	Предельная продолжительность упражнения, с				
	10	30	60	120	360
$W_{ср}$, Вт	775 ± 111	722 ± 92	561 ± 62	414 ± 53	305 ± 39
Отн. $W_{ср}$, Вт/кг	10.72 ± 0.57	10.00 ± 0.61	7.78 ± 0.50	5.55 ± 0.58	4.43 ± 0.82
$УИФЗ_{O_2}$, у. е.	10.81 ± 1.52	4.41 ± 0.65	3.12 ± 0.59	2.04 ± 0.37	1.40 ± 0.24
$УИФЗ_{fh}$, у. е.	10.10 ± 2.75	4.81 ± 1.08	3.23 ± 0.44	1.94 ± 0.20	1.29 ± 0.10
$\sum O_2$, л	0.11 ± 0.07	0.63 ± 0.32	1.94 ± 0.31	4.79 ± 0.49	16.95 ± 1.22
$\sum O_2d$, л	5.31 ± 0.86	6.08 ± 1.52	7.34 ± 0.82	7.15 ± 1.36	8.18 ± 2.05
$\sum RO_2$, л	5.42 ± 0.85	6.71 ± 1.40	9.28 ± 0.86	11.94 ± 1.80	25.14 ± 2.35
$\sum \Delta fh_р$, уд.	5 ± 2	24 ± 14	66 ± 15	131 ± 30	483 ± 60
$\sum \Delta fh_в$, уд.	159 ± 44	213 ± 71	247 ± 61	232 ± 40	238 ± 49
$\sum \Delta fh_{tot}$, уд.	164 ± 44	237 ± 75	313 ± 69	357 ± 34	721 ± 93
La_{max}, ммоль/л	8.83 ± 3.26	15.97 ± 2.70	17.56 ± 2.5	16.31 ± 2.94	14.59 ± 2.61

Примечание: здесь и в табл. 3–5 обозначения см. в разделе “Методика” (вычисляемые показатели).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В табл. 1 представлены антропометрические и максимальные функциональные показатели испытуемых, полученные в рамптесте на велоэргометре.

Показатели УИФЗ, рассчитанные по пульсовым суммам и по потреблению кислорода в упражнениях с предельной мощностью различной продолжительности, представлены в табл. 2.

Показатели УИФЗ в упражнениях с предельной мощностью различной продолжительности, рассчитанные как по пульсовым суммам, так и по потреблению кислорода, тесно взаимосвязаны с мощностью упражнения, скоростью максималь-

Таблица 3. Корреляционная матрица расчетных показателей ($p < 0.05$, $n = 45$)

Показатели	$W_{ср}$	$W_{ср/кг}$	VRO_2	$V\Delta La_{max}$	$УИФЗ_{O_2}$	$УИФЗ_{fh}$
$УИФЗ_{O_2}$	0.92	0.93	0.97	0.95	1.00	0.94
$УИФЗ_{fh}$	0.92	0.95	0.95	0.97	0.94	1.00

ного накопления лактата, скоростью образования кислородного запроса, и между собой (табл. 3).

Показатели УИФЗ, рассчитанные по пульсовым суммам и по потреблению кислорода в серии непредельных упражнений с фиксированной продолжительностью (30 мин), с различной мощностью – на уровне аэробного порога (WАэП) и анаэробного порога (WАнП) – представлены в табл. 4.

Показатели в непредельных упражнениях, рассчитанные как по пульсовым суммам, так и по потреблению кислорода, тесно взаимосвязаны с мощностью упражнения, скоростью максимального накопления лактата, скоростью образования кислородного запроса, и между собой (табл. 5).

Таблица 4. Эргометрические и физиологические показатели, полученные в серии из двух непредельных упражнений в аэробном диапазоне мощности ($M \pm \sigma$, $n = 8$)

Показатели	WАэП	WАнП
$W_{ср}$, Вт	153 ± 29	250 ± 27
Отн. $W_{ср}$, Вт/кг	2.09 ± 0.23	3.47 ± 0.44
УИФЗ$_{O_2}$, у. е.	0.52 ± 0.04	0.80 ± 0.08
УИФЗ$_{fh}$, у. е.	0.51 ± 0.06	0.82 ± 0.09
$\sum O_2$, л	58.0 ± 8.7	88.4 ± 10.4
$\sum O_2d$, л	2.47 ± 1.33	4.51 ± 1.14
$\sum RO_2$, л	60.5 ± 9.2	92.9 ± 10.9
$\sum \Delta fh_p$, уд.	1744 ± 297	2412 ± 353
$\sum \Delta fh_в$, уд.	138 ± 53	219 ± 42
$\sum \Delta fh_{tot}$, уд.	1882 ± 344	2631 ± 381
La_{max}, ммоль/л	0.90 ± 0.29	4.78 ± 2.19

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Как известно, пульсовая стоимость упражнения и ее составляющие тесно взаимосвязаны с O_2-запросом, O_2-приходом и O_2-долгом соответственно [23]. Графики, построенные по данным потребления кислорода и ЧСС, одинаково отражают скорость метаболических процессов во время выполнения упражнений предельной мощности (данные усреднены по группе, $n = 9$, рис. 1).

Таким образом, интенсивность энергозатрат упражнения можно оценивать по пульсовым суммам работы и восстановления. Н.И. Волков и др. [23], в диапазоне мощности от критической до максимальной аназробной, в упражнениях разной фиксированной продолжительности и предельной мощности, сопоставили скорость образования пульсового запроса с мощностью упражнения, скоростью образования лактата, скоростью образования кислородного запроса и показателем интенсивности нагрузки, выраженном в единицах *MMR*. Далее авторы вывели регрессионную зависимость скорости образования пульсового запроса от этих показателей, и сделали вывод, что на основе этой зависимости "...становится возможной строгая количественная оценка применяемых тренировочных нагрузок и их строгая классификация".

Это полностью подтверждается в нашем исследовании. Но у разных спортсменов при выполнении одинаковой работы пульсовые запросы могут сильно отличаться по величине (и это не обязательно связано с работоспособностью). Чтобы понимать на каком уровне интенсивности выполняется работа, и оценивать физиологический отклик каждого спортсмена индивидуально в ответ на стандартную нагрузку в диапазоне мощности от АэП до максимальной анаэробной мощности, мы применили показатель УИФЗ$_{fh}$ (формула 8), который представляет собой нормированную по величине пульсового резерва ($\Delta ЧСС_{max}$) скорость накопления пульсового запроса.

По сути, УИФЗ$_{fh}$ является точным аналогом показателя, предложенного Н.И. Волковым и др. [19], выражаемым в единицах *MMR* (формула 3): показатель УИФЗ$_{fh}$ представляет собой отношение уровня пульсового запроса упражнения к пульсовому резерву спортсмена. Пульсовой запрос тесно связан с O_2 – запросом упражнения [23], а величина пульсового резерва, по мнению *N. Uth et al.* [24], взаимосвязана с МПК. Показатель УИФЗ$_{fh}$ объединяет подходы *M.J. Karvonen* [3] (оценка интенсивности аэробных процессов) и ИНПД [2] (оценка интенсивности анаэробных процессов), и является числовым выражением *удельной* интенсивности физиологических затрат (поскольку он нормирован по индивидуальной величине пульсового резерва) при выполнении практически любого циклического упражнения.

Таблица 5. Корреляционная матрица расчетных показателей в серии из двух непредельных аэробных упражнений ($p < 0.05$, $n = 16$)

Показатели	$W_{ср}$	$W_{ср/кг}$	VRO_2	La	УИФЗ$_{O_2}$	УИФЗ$_{fh}$
УИФЗ$_{O_2}$	0.75	0.87	0.75	0.79	1.00	0.91
УИФЗ$_{fh}$	0.83	0.81	0.80	0.86	0.91	1.00

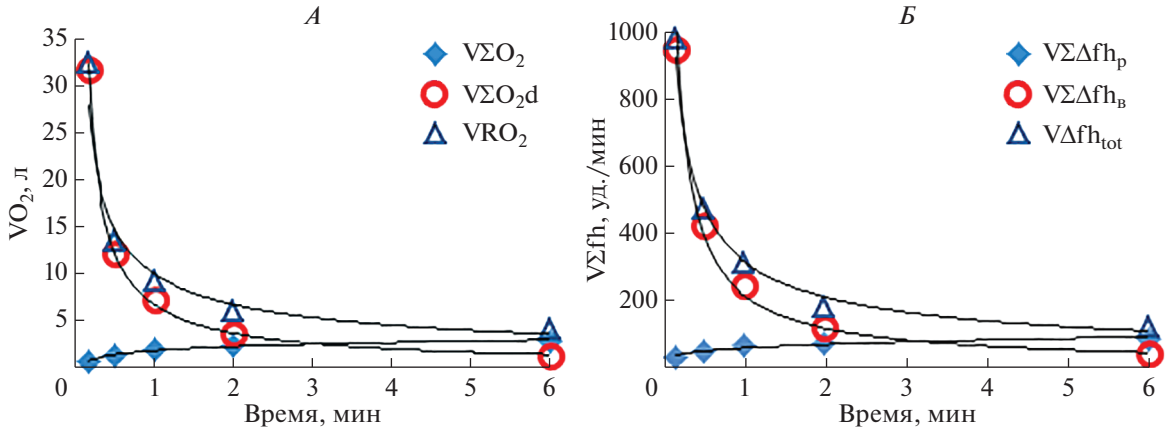

Рис. 1. Зависимость скорости образования кислородного запроса и его составляющих (*А*), скорости образования пульсового запроса и его составляющих (*Б*), от времени выполнения упражнения предельной мощности.
По оси абсцисс – предельное время выполнения упражнения, мин; по оси ординат – газометрические (*А*) и пульсометрические (*Б*) составляющие кислородного и пульсового запроса при выполнении предельного упражнения.

Это подтверждается результатами нашего исследования: как в упражнениях в диапазоне от критической (соответствующей МПК) до максимальной анаэробной мощности, так и в аэробных упражнениях на уровне АэП и АнП.

Используя данные, полученные во второй серии исследований, в непредельных упражнениях продолжительностью 30 мин, которые выполняли спортсмены–велошоссейники, при мощности на уровне АэП и АнП, мы построили графики зависимости УИФЗ$_{fh}$ и УИФЗ$_{O_2}$ (рис. 2) и диаграмму зависимости УИФЗ$_{fh}$ (рис. 3) от мощности нагрузки по всем измерениям (n = 61) в диапазоне нагрузок от АэП до максимальной анаэробной мощности.

Как показано на рис. 2, во всем диапазоне нагрузок от АэП до максимальной анаэробной мощности, величины УИФЗ$_{fh}$ и УИФЗ$_{O_2}$ имеют весьма высокую экспоненциальную зависимость

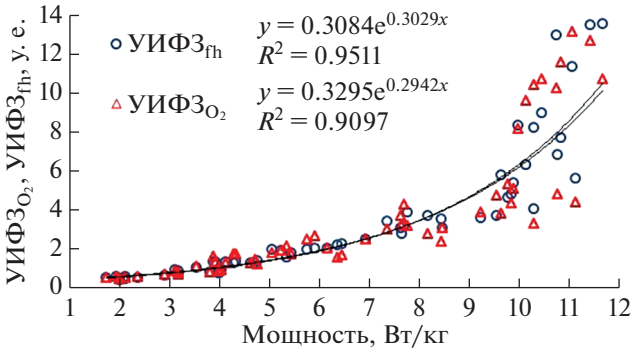

Рис. 2. Зависимость величин УИФЗ$_{fh}$ и УИФЗ$_{O_2}$ от мощности упражнений во всем диапазоне нагрузок от аэробного порога до максимальной анаэробной мощности.

от мощности. Между показателями УИФЗ$_{fh}$ и УИФЗ$_{O_2}$ во всем диапазоне нагрузок выявлена высокая линейная зависимость (n = 61, $p < 0.05$; $R^2 > 0.9$).

Результаты, представленные на рис. 3, позволяют оценить количественные характеристики различных зон мощности по величине УИФЗ$_{fh}$, что может иметь прямое прикладное значение для построения тренировочного процесса.

Таким образом, показана полная взаимозаменяемость пульсометрических и газометрических показателей интегральных функциональных затрат организма при выполнении упражнений в диапазоне от АэП до максимальной анаэробной мощности. Тем самым открываются широкие перспективы практического использования предложенного нами показателя УИФЗ$_{fh}$ в работе тренеров и спортивных врачей.

ВЫВОДЫ

1. Показатель УИФЗ$_{fh}$ во всем диапазоне нагрузок от АэП до максимальной анаэробной мощности, имеет тесную экспоненциальную зависимость от мощности упражнений (n = 61, $p < 0.05$; $R^2 > 0.95$). Между показателями УИФЗ$_{O_2}$ и УИФЗ$_{fh}$, во всем изученном диапазоне значений от АэП до максимальной анаэробной мощности имеет место линейная зависимость с высокими коэффициентами детерминации ($p < 0.05$; $R^2 > 0.9$). Это свидетельствует о полной взаимозаменяемости пульсометрических и газометрических показателей для определения интенсивности функциональных затрат.

2. Показатель УИФЗ$_{fh}$ может быть использован для количественной оценки уровня энергети-

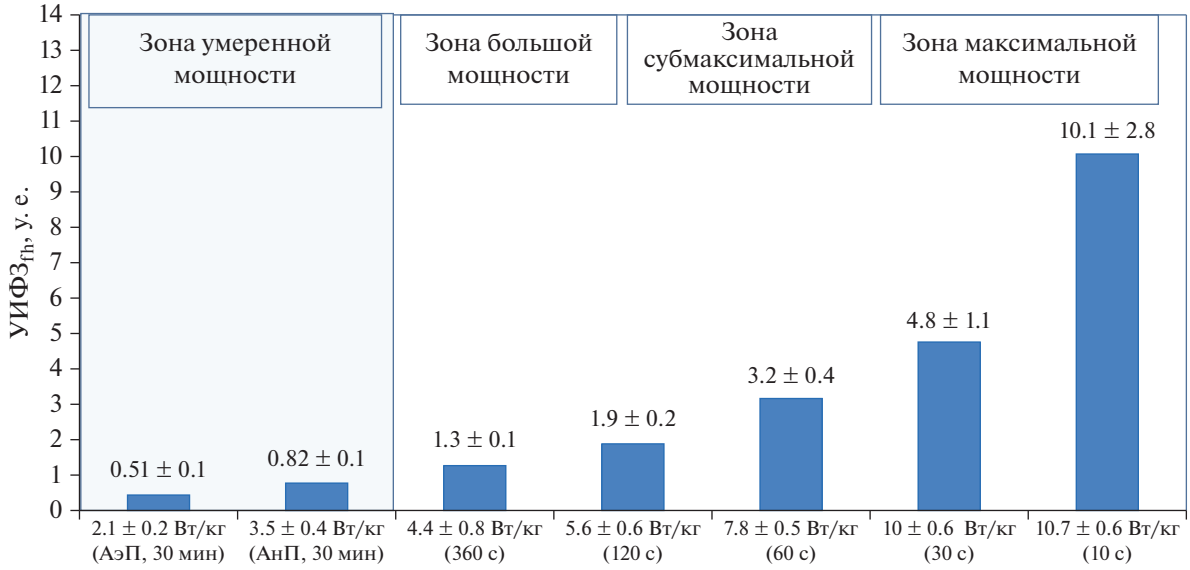

Рис. 3. Диаграмма зависимости величин УИФЗ$_{fh}$ от мощности упражнений во всем диапазоне нагрузок от аэробного порога до максимальной анаэробной мощности.

ческих затрат при выполнении спортсменами тренировочных нагрузок в диапазоне от АэП до максимальной анаэробной мощности.

Этические нормы. Все исследования проведены в соответствии с принципами биомедицинской этики, сформулированными в Хельсинкской декларации 1964 г. и ее последующих обновлениях, и одобрены локальным биоэтическим комитетом при Центре спортивных инновационных технологий и подготовки сборных команд Москомспорта (протокол № 12 от 27.01.2020 г. Москва).

Информированное согласие. Каждый участник исследования представил добровольное письменное информированное согласие, подписанное им после разъяснения ему потенциальных рисков и преимуществ, а также характера предстоящего исследования.

Финансирование работы. Работа выполнена как исследовательский проект, поддержанный Научно-методическим советом “ЦСТиСК” Москомспорта (Москва). Работа также частично поддержана тематическим планом НИР Российского государственного университета физической культуры, спорта, молодежи и туризма (Москва) на 2019–2020 гг. (Раздел 03.00.12).

Благодарности. Авторы выражают благодарность к. ф.-м. н. А.В. Голову за помощь в статистическом анализе полученных данных.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией данной статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Фарфель В.С.* Физиологические особенности работ различной мощности / Исследования по физиологии выносливости. Труды ГЦНИИФК. Т. 7. Вып. 3. М.: ФиС, 1949. С. 13.
2. *Король В.М., Сонькин В.Д., Ратушная Л.И.* Мышечная работоспособность и частота сердечных сокращений у подростков в зависимости от уровня полового созревания // Теория и практика физической культуры. 1985. № 8. С. 27.
3. *Karvonen M.J., Kentala E., Mustala O.* The effects of training on heart rate: a longitudinal study // Ann. Med. Exp. Biol. Fenn. 1957. V. 35. № 3. P. 307.
4. *Davis A., Convertino V.* A comparison of heart rate methods for predicting endurance training intensity // Med. Sci. Sports. 1975. V. 7. № 4. P. 295.
5. *Banister E.W.* Modeling elite athletic performance / Physiological testing of the high-performance athlete. Champaign, IL: Human Kinetics, 1991. 403 p.
6. *Сонькин В.Д., Тамбовцева Р.В.* Развитие мышечной энергетики и работоспособности в онтогенезе. М.: Книжный дом “ЛИБРОКОМ”, 2011. 368 с.
7. *Pettitt R.W., Pettitt C., Cabrera C.A., Murray S.R.* A theoretical method of using heart rate to estimate energy expenditure during exercise // Int. J. Sports Sci. Coach. 2007. V. 2. № 3. P. 319.
8. *Gillespie B.D., McCormick J.J., Mermier C.M., Gibson A.L.* Talk test as a practical method to estimate exercise intensity in highly trained competitive male cyclists // J. Strength Cond. Res. 2015. V. 29. № 4. P. 894.
9. *Thomson E.A., Nuss K., Comstock A. et al.* Heart rate measures from the apple watch, Fitbit charge HR 2, and electrocardiogram across different exercise intensities // J. Sports Sci. 2019. V. 37. № 12. P. 1411.
10. *Shcherbina A., Mattsson C.M., Waggott D. et al.* Accuracy in wrist-worn, sensor-based measurements of heart

rate and energy expenditure in a diverse cohort // J. Pers. Med. 2017. V. 7. № 2. P. 3.

11. *Yang L., Lu K., Forsman M. et al.* Evaluation of physiological workload assessment methods using heart rate and accelerometry for a smart wearable system // Ergonomics. 2019. V. 62. № 5. P. 694.

12. *Hargreaves M., Spriet L.L.* Skeletal muscle energy metabolism during exercise // Nat. Metab. 2020. V. 2. № 9. P. 817.

13. *Matsuura H., Mukaino M., Otaka Y. et al.* Validity of simplified, calibration-less exercise intensity measurement using resting heart rate during sleep: a method-comparison study with respiratory gas analysis // BMC Sports Sci. Med. Rehabil. 2019. V. 11. P. 27.

14. *Beam W.C., Adams G.M.* Exercise physiology: Laboratory manual. 8th ed. N.Y.: McGraw-Hill, 2019. 338 p.

15. *Kenney W.L., Wilmore J.H., Costill D.L.* Physiology of sport and exercise. 7th ed. Champaign, IL: Human Kinetics, 2019. 648 p.

16. *Swanwick E., Matthews M.* Energy systems: a new look at aerobic metabolism in stressful exercise // MOJ Sports Med. 2018. V. 2. № 1. P. 15.

17. *Bertuzzi R., Melegati J., Bueno S. et al.* GEDAE-LaB: A free software to calculate the energy system contributions during exercise // PLoS ONE. 2016. V. 11. № 1. P. e0145733.

18. *Волков Н.И., Олейников В.И.* Биоэнергетика спорта. М.: “Советский спорт”, 2011. 160 с.

19. *Волков Н.И., Савелев И.А.* Кислородный запрос и энергетическая стоимость напряженной мышечной деятельности человека // Физиология человека. 2002. Т. 28. № 4. С. 80.
Volkov N.I., Savel’ev I.A. Oxygen Demand and Energy Cost of Intense Muscular Activity in Humans // Human Physiology. 2002. V. 28. № 4. P. 454.

20. *Иссурин В.Б.* Подготовка спортсменов XXI в.: научные основы и построение тренировки. М.: “Спорт”, 2016. 464 с.

21. *Бреслав И.С. Волков Н. И. Тамбовцева Р.В.* Дыхание и мышечная активность в спорте. М.: Советский спорт, 2013. 334 с.

22. *Cheng B., Kuipers H., Snyder A.C. et al.* A New Approach for the Determination of Ventilatory and Lactate Thresholds // Int. J. Sports Med. 1992. V. 13. № 7. P. 518.

23. *Волков Н.И., Попов О.И., Габрысь Т., Шматлян-Габрысь У.* Физиологические критерии нормирования тренировочных и соревновательных нагрузок в спорте высоких достижений // Физиология человека. 2005. Т. 31. № 5. С. 125.
Volkov N.I., Popov O.I., Gabrys’ T., Shmatlyan-Gabrys’ U. Physiological Criteria in Defining the Standards for Training and Competition Loads in Elite Sports // Human Physiology. 2005. V. 31. № 5. P. 606.

24. *Uth N., Sørensen H., Overgaard K., Pedersen P.K.* Estimation of VO_{2max} from the ratio between HRmax and HRrest – the heart rate ratio method // Eur. J. Appl. Physiol. 2004. V. 91. № 1. P. 111.

Specific Intensity of Physiological Costs During Cyclic Operation of Different Power

A. V. Kozlov[a, *], A. V. Vavaev[a], A. V. Yakushkin[a], A. I. Laptev[b], R. V. Yurikov[b], V. D. Sonkin[a, b, c] **

[a] *Center for Sports Innovative Technologies and Training of National Teams of Moskomsport, Moscow, Russia*

[b] *Russian State University of Physical Culture, Sports, Youth and Tourism, Moscow, Russia*

[c] *Institute of Developmental Physiology, RAE, Moscow, Russia*

**E-mail: 89165363085a@mail.ru*

***E-mail: sonkin@mail.ru*

The aim of the study is the search of heart rate criteria of the rate of energy consumption during intense cyclic work. In the first part of the study, 9 athletes (qualified athletes, age 18.3 ± 1.5 years, weight 72.2 ± 8.04 kg), specializing in BMX (Bicycle MotoX), performed on different days a series of 5 all-out exercises on a cycle ergometer at maximal power output and fixed durations of 10, 30, 60, 120 and 360 s. In the second part of the study, 8 road racers (qualified athletes, age 21.3 ± 3.4 years, weight 72.9 ± 11.3 kg) performed two exercises on the cycle ergometer at the aerobic threshold and at the anaerobic threshold, each trial lasting 30 minutes. We observed a high correlation ($p < 0.05$, $R^2 > 0.9$) between the paired values of the specific intensity of physiological costs (SIFC), calculated from oxygen consumption $(SIFC_{O_2})$ and heart rate sums ($SIFC_{HR}$). This correlation was present through the whole range of exercise intensities – from aerobic threshold to the maximal anaerobic workload. Thus, it’s possible to use $SIFC_{HR}$ parameter in training practice for assessing the rate of energy consumption during exercise.

Keywords: limit and non-limit exercises, intensity of energy consumption, heart rate indicators, athletes cyclists.