

УДК 612

Заварухина С. А., Бикметов А. В.

Уральский государственный университет физической культуры

Челябинск, Россия

svezava@yandex.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ ПОРОГОВ ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ МЕТОДОМ DMOD АНАЛИЗА СТЕПЕННОЙ ФУНКЦИИ ЛАКТАТНОЙ КРИВОЙ, ПОЛУЧЕННОЙ В СТУПЕНЧАТОМ НАГРУЗОЧНОМ ТЕСТЕ

Аннотация. Определение физиологических порогов энергообеспечения при физических нагрузках является важной составляющей для контроля интенсивности физических упражнений при проведении качественного тренировочного процесса. Исследован алгоритм проведения ступенчатого нагрузочного тестирования и построения лактатной кривой по значениям концентрации лактата в капиллярной крови, определены показатели физиологических порогов энергообеспечения методом Dmod анализа степенной функции лактатной кривой. Метод Dmod, наиболее близкий к эталонному, имеет персонализированный подход в оценке полученных показателей концентрации лактата в капиллярной крови. Полученные данные позволяют правильно дозировать физическую нагрузку в тренировочном процессе для развития функциональных возможностей организма спортсмена.

Ключевые слова: *LT1, LT2, аэробный и анаэробный физиологические пороги энергообеспечения при физических нагрузках, лактатная кривая, функция лактатной кривой, методы определения физиологических порогов энергообеспечения, метод Dmod.*

Заварухина С. А., Бикметов А. В.

Ural State University of Physical Education

Chelyabinsk, Russia

svezava@yandex.ru

DETERMINATION OF PHYSIOLOGICAL THRESHOLDS OF ENERGY SUPPLY BY DMOD ANALYSIS OF THE POWER FUNCTION OF THE LACTATE CURVE OBTAINED IN A STEPWISE LOAD TEST

Annotation. Determining the physiological thresholds of energy supply during physical exertion is an important component for monitoring the intensity of physical exercise during a high-quality training process. The algorithm of stepwise stress testing and the construction of a lactate curve based on the values of lactate concentration in capillary blood is investigated, the indicators of physiological thresholds of energy supply are determined by Dmod analysis of the power function of the lactate curve. The Dmod method,

which is closest to the reference method, has a personalized approach in assessing the obtained lactate concentration in capillary blood. The data obtained make it possible to correctly dose physical activity in the training process to develop the functional capabilities of the athlete's body.

Keywords: *LT1, LT2, aerobic and anaerobic physiological thresholds of energy supply during physical exertion, lactate curve, lactate curve function, methods for determining physiological thresholds of energy supply, Dmod method.*

Актуальность. Определение концентрации лактата в капиллярной крови позволяет оценить соответствие интенсивности физической нагрузки и индивидуального физиологического ответа на эту нагрузку, определить метаболические пороги энергообеспечения, а также провести оценку срочного восстановления с использованием параметра скорости утилизации лактата. Скорость утилизации (клиренс) лактата зависит от большого количества факторов: величина накопления, продолжительность гликолитической работы, характер восстановительной деятельности, индивидуальные особенности организма, уровень спортивной квалификации [2].

Лактат – продукт клеточного метаболизма, соль молочной кислоты, образуется в результате диссоциации 99 % молочной кислоты (слабая кислота) на ион водорода (H^+) и остатка связанный с ионами натрия (Na^+) или калия (K^+), при pH среды нейтральной или слабощелочной. Образование молочной кислоты происходит в результате ферментативной реакции при недостатке O_2 из продукта гликолиза пирувата, под действием фермента лактатдегидрогеназа (ЛДГ), реакция требует присутствия восстановленной формы никотинамидадениндинуклеотида (NADH) и положительного иона водорода (H^+), при снижении pH среды. Продукция молочной кислоты замедляет снижение pH [4]. Часть мо-

лочной кислоты и H^+ утилизируется в митохондриях (за счёт переноса от NADH), H^+ нейтрализуются буферными системами (фосфатная система состоит из гидрофосфата и дигидрофосфата; белковая система состоит из дипептидов карнозин и ансерин содержащие гистидин) в самой мышечной клетке, при истощении буферных систем происходит снижение внутриклеточного pH [4]. Перенос лактата (молочной кислоты) из клетки в межклеточное пространство (интерстиций), митохондрии и в клетки потребители обеспечивается белками монокарбоксилатного транспорта (МСТ – переносчики, MCT1-MCT4), вывод H^+ из клетки выполняет натрий-водородный обменник (белок NHE1 Na^+/H^+) и белок MCT1. Белок MCT1 – экспорт лактата из клеток и H^+ в равных количествах, синтезируется во всех тканях организма; белок MCT2 – импорт лактата внутрь клетки, синтезируется в тканях, активно использующих лактат в качестве энергетического субстрата (головной мозг, сердце, почки, печень, красные мышечные волокна); белок MCT3 – мало изучен, экспорт лактата; белок MCT4 – экспорт лактата из клеток синтезируется в тканях с высоким уровнем гликолитических процессов (белые мышечные волокна поперечно-полосатой мышечной ткани, лейкоциты, астроциты) [1]. При снижении pH активность транспортеров усиливается. Скорость вывода лактата (молочной

кислоты) и H^+ в интерстиции зависит от разницы концентраций, количества транспортных белков на мемbrane клетки. Увеличение концентрации в интерстиции приводит к диффузии лактата и H^+ в кровоток, лактат переносится к другим тканям способным его утилизировать, а H^+ нейтрализуются буферными системами крови (бикарбонатная, фосфатная, белковая, гемоглобиновая) и выводится легкими и почками. Концентрация в крови лак-

тата отражает равновесие между его образованием, утилизацией и выведением. В норме концентрация в венозной крови в спокойном состоянии 0,5-2 ммоль/л [1]. Клиренс осуществляется печенью (60 %), почками (30 %), сердечной (потребление лактата составляет 10-15 % метаболизма сердечной мышцы в покое и до 30 % во время физической нагрузки) и скелетной мышечной тканями [1], рисунок 1.

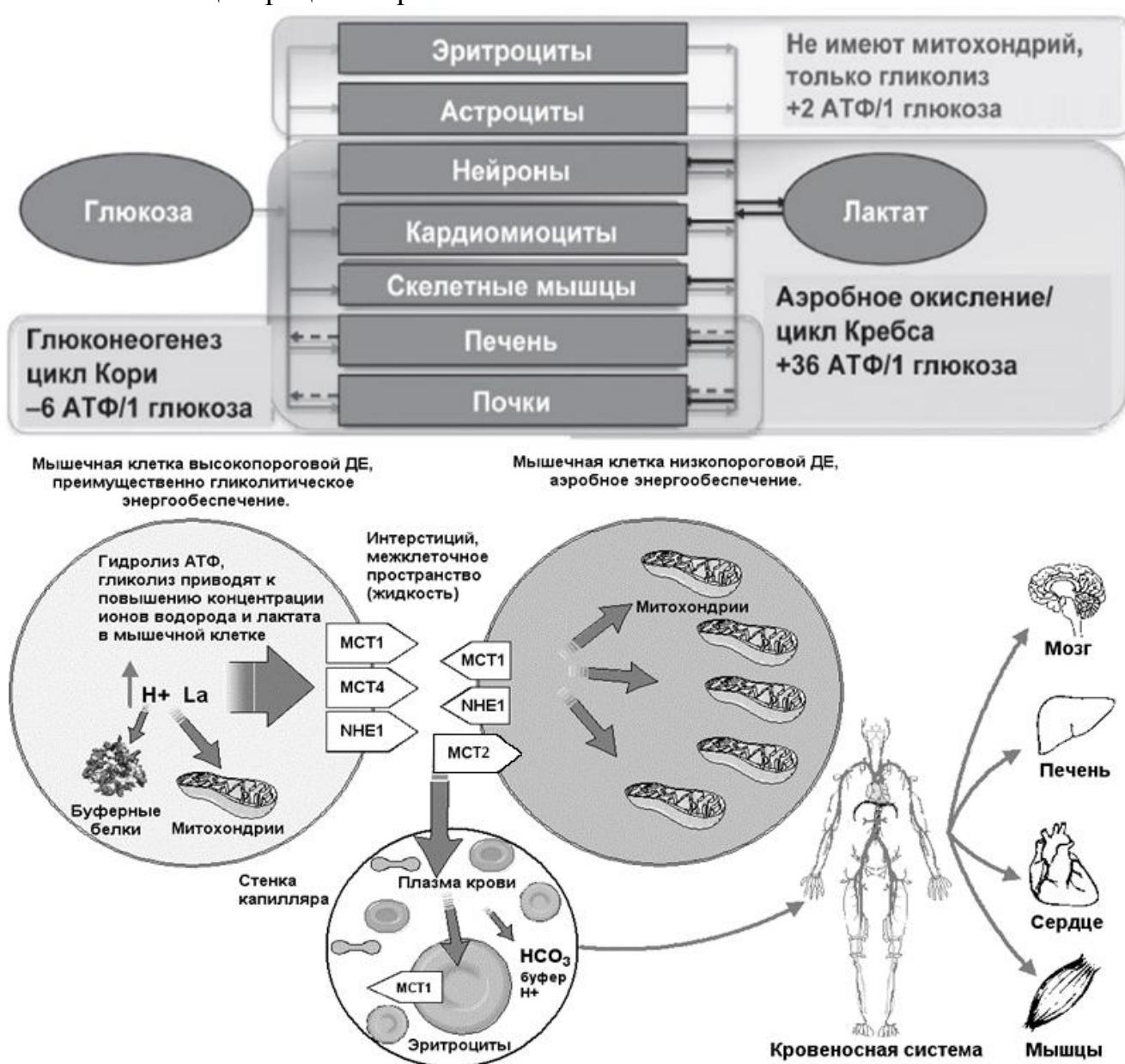


Рисунок 1 – Выведение, утилизация лактата и ионов водорода H^+

Скелетные мышцы состоят из мышечных волокон (МВ) разного типа рассредоточенных по всей мышце: окислительные МВ (OMB, классификация по активности АТФ-азы миозина I-тип), гликогенитические МВ (ГМВ, Па, IIb - тип), генетика определяет исходное соотношение ОМВ и ГМВ. Активация двигательных единиц (ДЕ) при физической нагрузке происходит в соответствии с принципом величины Ханнемана: при низкой нагрузке первыми активируются ДЕ иннервирующие медленные мышечные волокна (I-тип), при увеличении нагрузки подключаются ДЕ с быстрыми волокнами (Па и IIb типы), а при высоких нагрузках наблюдается синхронная активация большинства мышечных волокон [5]. Значительное увеличение лактата (молочной кислоты) в крови при повышении интенсивности связано с включением в работу большого количества ГМВ.

Для определения физиологических порогов энергообеспечения при выполнении физической работы используют методы нагрузочного тестирования. Традиционно верхняя граница диапазона низкой интенсивности (в модели с тремя зонами) для дозирования физической нагрузки считается

аэробным или первым лактатным порогом (LT1), граница анаэробного порога вторым лактатным порогом (LT2) физиологическая сущность которого – это наибольшая мощность работы, во время которой скорость выделения лактата не превышает скорости его утилизации [7]. Эталонным методом определения LT2 считается MLSS (maximal lactate steady state), суть метода заключается в выполнении испытуемым упражнения с постоянной интенсивностью 30 минут, достижение MLSS определяется интенсивностью упражнения при которой концентрация лактата в капиллярной крови возрастает не более 1 ммоль/л в промежутке времени между 10 и 30 минутой теста [6], рисунок 2. Если концентрация лактата повышалась более 1 ммоль/л, то нагрузка в следующем тесте снижается на 3%, в противном случае повышается на 3% и так, пока не будет установлен MLSS. Серьёзный недостаток этого метода в необходимости проведения нескольких тестов в разные дни, этого недостатка лишены методы ступенчатого нагрузочного тестирования. Во время таких тестов можно наблюдать экспоненциальный рост концентрации лактата в капиллярной крови [6], рисунок 3.

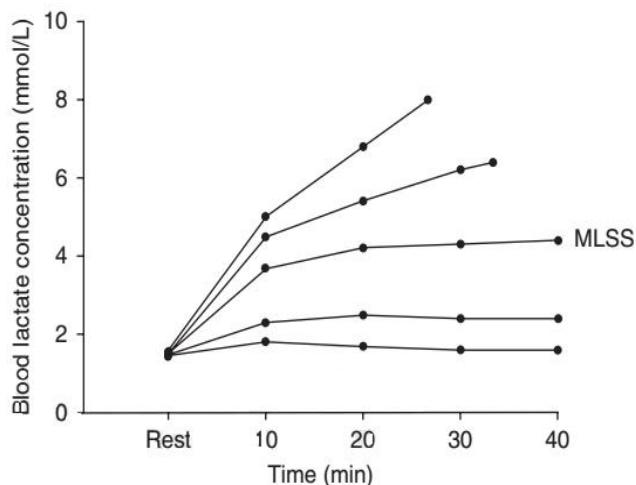


Рисунок 2 – Метод MLSS

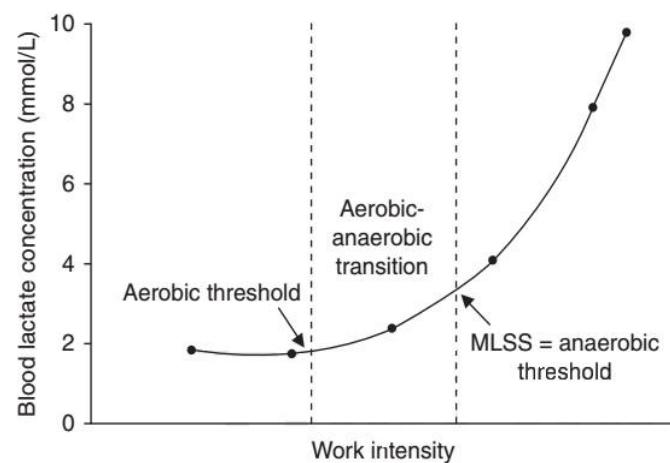


Рисунок 3 – Ступенчатый метод

Протокол таких тестов может значительно меняться в отношении продолжительности этапов, начальной и дальнейшей рабочих нагрузок. Для интерпретации полученных значений лактатной кривой могут быть применены различные методы. В исследовании методов определения LT1 и LT2 Т. С. Спирин с соавторами (2023) провели сравнительный анализ разных методов с эталонным MLSS и пришли к выводу в оптимальной близости полученных показателей метода Dmod к эталонному [3].

Цель исследования. Определение физиологических порогов энергобеспечения методом Dmod анализа степенной функции, полученной в ступенчатом нагрузочном тестировании лактатной кривой. Оценить удобство практического применения данного метода в интерпретации полученных показателей лактата в капиллярной крови.

Организация и методы исследования. В исследовании принимало участие 10 спортсменов циклических видов спорта, мужского пола, возраст $48,7 \pm 1,4$ лет, спортивная квалификация не ниже 1 разряда. Протокол нагрузочного функционального тестирования состоял в последовательном увеличении нагрузки на каждом этапе и забором капиллярной крови в конце каждого временного этапа. Длительность этапа 4 минуты, этого времени достаточно для достижения устойчивого метаболического состояния при данной физической нагрузке. Предложенная физическая нагрузка соответствовала специализации и уровню квалификации спортсмена. Первый этап был разминочным (врабатывание), с нагрузкой умеренной интенсивности в течении 10 минут. В работе применялся следующий алгоритм: ступенчатое увеличение

ние мощности нагрузки с шагом ступени в 20 Вт (SkiErgC2) и увеличение скорости (BGt1300m) с шагом ступени 1 км/ч, тест проводился до отказа выполнения физической нагрузки спортсменом. Тренажер SkiErg Concept2 с компьютером PM5, максимально точно имитирует биомеханику движений рук и туловища в естественных условиях лыжной тренировки, имитация одновременного бесшажного хода на равнине (заслонка в положении 1). Тредмил Bronze Gym T1300M позволяет развивать скорость полотна до 22 км/ч, шаг ступени 0,1 км/ч. Для увеличения нагрузки можно воспользоваться электрически изменяемым углом наклона от 0 до 15%, угол наклона выбран в 1 %, имитация бега по равнине. Измерение концентрации лактата в капиллярной крови проводилось анализатором лактата Eaglenos (электрохимическая технология) с тестовыми полосами Lak-EN310 (измерения 0,5-28 mmol/L, SD $<0,5$ mmol/L), контроль ЧСС нагрудным пульсометром Polar H10.

Суть метода Dmod в определении интенсивности LT2 как точки пересечения перпендикуляра, имеющего наибольшую длину, от прямой к функции лактатной кривой, полученной аппроксимацией до полинома третьей степени. Построение графика функции лактатной кривой осуществляется в электронных таблицах MS Exel, формат линии тренда лактатной кривой – полиномиальная 3 степени. Прямая соединяет точку, после которой концентрация лактата возрастает более чем на сумму минимального значения измерения, цены деления ($n = 0,1$ mmol/L), стандартного отклонения измерения ($SD <0,5$ mmol/L) используемого лактометра (аэробный порог LT1, рисунок 4) и конечную точку лактатной кривой

значение которой отражает отказ испытуемого от работы [8], на графике также строится степенная функция кривой ЧСС в том же масштабе с дополнительной осью ординат - значения ЧСС, рисунок 5.

Результаты исследования и их обсуждение. Пример протокола тестирования и полученных значений методом Dmod, рисунок 6.

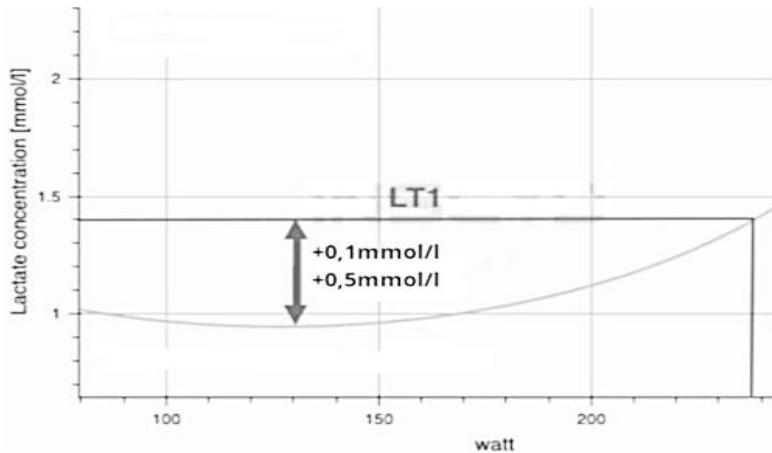


Рисунок 4 – Определение точки LT1 (LT1=Lmin+SD+n)

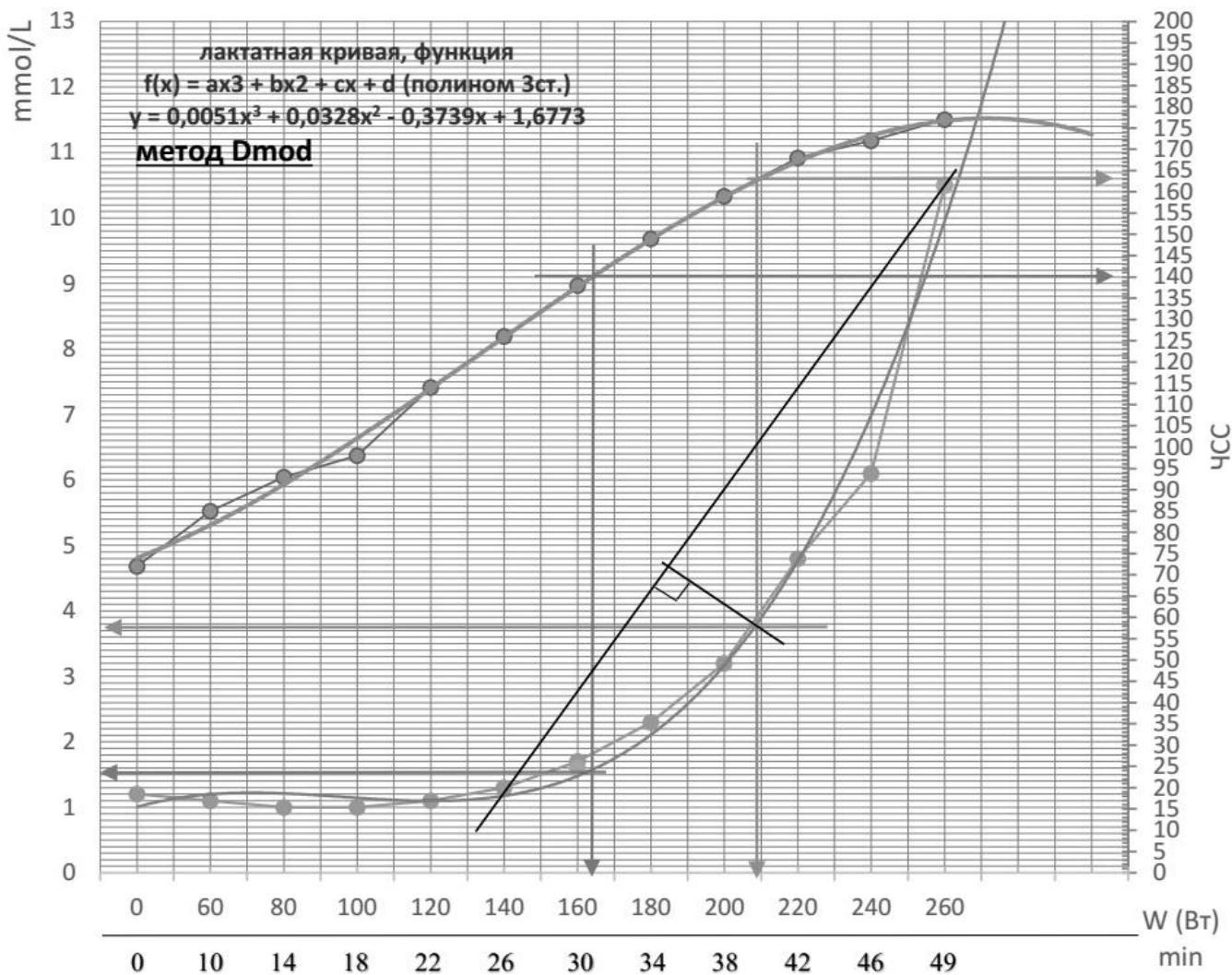


Рисунок 5 – График функции лактатной кривой и кривой ЧСС

№	Время мин.	ЧСС	W (Вт)	Лактат mmol/L	Клиренс mmol/L	Время мин.	ЧСС
1	0	72	0	1,2	10,5	0	177
2	10	85	60	1,1	6,9	3	115
3	14	93	80	1	6,5	6	111
4	18	98	100	1	4,8	9	111
5	22	114	120	1,1	4,4	12	114
6	26	126	140	1,3			
7	30	138	160	1,7			
8	34	149	180	2,3			
9	38	159	200	3,2			
10	42	168	220	4,8			
11	46	172	240	6,1			
12	49	177	260	10,5			
13							
14							
Метод Dmod				накопление лактата после АиП в мин. 0,95 mmol/L	накопление лактата после АэП в мин. 0,19 mmol/L		
АиП	163 уд/мин	209 Вт	3,8 mmol/L				
АэП	140 уд/мин	164 Вт	1,6 mmol/L	утилизация лактата при активном восстановлении в мин. 0,5 mmol/L			

Рисунок 6 – Протокол теста спортсмена и значения, полученные методом Dmod

Данные полученные методом анализа Dmod лактатной кривой дали возможность определить ЧСС АэП и АиП, величины пороговой мощности и скорости, таблица 1.

Показатели концентрации лактата в капиллярной крови, значения ЧСС АэП и АиП, пороговой скорости или мощности являются индивидуальными и меняются в зависимости от адаптационных процессов, важно это учитывать в оценке функционального состояния спортсмена. После отказа в teste исследовали клиренс лактата при нагрузке умеренной интенсивности продол-

жительностью 12 минут с забором капиллярной крови каждые 3 минуты. По полученным данным математически рассчитано увеличение концентрации лактата в минуту после каждого порогового значения, а также скорость утилизации лактата в минуту при активном восстановлении, таблица 2.

Данные результаты используются в планировании тренировочного процесса, например, в расчёте времени интервальной работы в различных режимах мощности и временных периодов восстановления между выполняемыми интервалами.

Таблица 1 – Показатели полученные методом анализа Dmod

№	Специализация спортсмена	Нагрузка	LT1 mmol/l	LT2 mmol/l	Лотк. mmol/l	АэП чсс, W _п ,V _п	АнП чсс W _п ,V _п	Макс чсс W _п ,V _п
1	лыжные гонки	SkiErgC ₂	1,6	3,9	8,5	145, 127Вт	178, 174Вт	194, 220Вт
2	лыжные гонки	SkiErgC ₂	1,7	3,5	9,1	137, 100Вт	164, 135Вт	197, 180Вт
3	лыжные гонки	SkiErgC ₂	1,6	3,8	10,5	140, 164Вт	163, 209Вт	177, 260Вт
4	лыжные гонки	SkiErgC ₂	1,8	4	8	142, 120Вт	178, 175Вт	184, 200Вт
5	лыжные гонки	SkiErgC ₂	1,6	4,3	9,5	138, 118Вт	172, 170Вт	198, 200Вт
6	триатлон	BGt _{1300m}	1,7	3	7,3	159, 13,5 км/ч	163, 14,7 км/ч	177, 16,5 км/ч
7	триатлон	Bgt _{1300m}	1,6	3,9	7,9	157, 12,5 км/ч	180, 13,8 км/ч	195, 15,8 км/ч
8	лег.атлетика	BGt _{1300m}	1,9	4,2	9,6	143, 7,9 км/ч	157, 10,8 км/ч	171, 13,5 км/ч
9	лег.атлетика	BGt _{1300m}	2,4	3,9	10,2	163, 9,5 км/ч	173, 10,6 км/ч	195, 13,5 км/ч
10	лег.атлетика	BGt _{1300m}	2	4,1	10	148, 10,5 км/ч	174, 14 км/ч	190, 14,8 км/ч

Таблица 2 – Расчетные значения скорости накопления и утилизации лактата

№	Специализация спортсмена	Накопление лактата после АэП в мин. mmol/l	Накопление лактата после АнП в мин. mmol/l	Утилизация лактата восст. в мин. mmol/l
1	лыжные гонки	0,22	0,68	0,43
2	лыжные гонки	0,25	0,91	0,31
3	лыжные гонки	0,19	0,95	0,50
4	лыжные гонки	0,25	0,72	0,37
5	лыжные гонки	0,28	0,7	0,35
6	триатлон	0,17	0,86	0,44
7	триатлон	0,20	0,79	0,42
8	лег. атлетика	0,16	0,77	0,39
9	лег. атлетика	0,30	0,78	0,34
10	лег. атлетика	0,28	0,65	0,35

Заключение. Функциональное тестирование спортсмена, основанное на ступенчатом увеличении физической нагрузки и исследовании капиллярной крови на концентрацию лакта-

та, позволяет определить метаболические пороги энергообеспечения и соответствующие им пороговые значения мощности и скорости. Оценка срочного восстановления испытуемого про-

водится по скорости утилизации лактата при работе умеренной мощности. Показатели лактата в крови и его клиренс для каждого спортсмена индивидуальны. Эти показатели позволяют эффективно строить тренировочный процесс, с индивидуальным дозированием физической нагрузки для развития функциональных возможностей организма спортсмена. Получение значений LT1, LT2, ЧСС АэП и АнП ме-

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Список литературы

1. Кузьмичева, В. И. Структурно-функциональный потенциал лактата в регуляции межмолекулярных взаимодействий: автореферат дис. кандидата медицинских наук: 03.01.04 / Кузьмичева В.И.; [Место защиты: Кубанский государственный медицинский университет Министерства здравоохранения Российской Федерации]. – Краснодар, 2020. – 22 с.
2. Рыбина, И. Л. Лабораторные маркеры контроля и управления тренировочным процессом спортсменов: наука и практика: монография / И. Л. Рыбина, Л. М. Гунина; под общей редакцией Л. М. Гуниной. – Москва: Спорт, 2021. – 376 с.
3. Спирин, Т. С. Оптимальный метод определения второго лактатного (анаэробного) порога в циклических видах спорта / Т. С. Спирин, А. И. Чикуров, С. В. Радаева // Вестник Томского государственного университета. – 2023. – № 489. – С. 193–200.
4. Чепур, С. В Молочная кислота: динамика представлений о биологии лактата / С. В. Чепур, Н. Н. Плужников, О. В. Чубарь, И. В. Фатеев, Л. С. Бакулина, И. В. Литвиненко, А. И. Ширяева тодом Dmod анализа степенной функции, полученной в нагрузочном тестировании лактатной кривой, наиболее близкий к эталонному методу MLSS, имеет персонализированный подход в оценке показателей концентрации лактата в капиллярной крови, достаточно прост и удобен в применении, что делает его оптимальным выбором в функциональном тестировании спортсменов.
- // Успехи современной биологии. – 2021. – Т. 141, № 3. – С. 227–247.
5. Henneman, E. Relations between structure and function in the design of skeletal muscles / E. Henneman, CB. Olson // J Neurophysiol. – 1965. – 28. – Pp. 581–598.
6. Jones, A. M. The maximal metabolic steady state: redefining the “gold standard” / A. M. Jones, M. Burnley, M. I. Black, D. C. Poole, A. Vanhatalo // Physiological Reports. – 2019. – Vol. 7 (10). doi: 10.1481/phy2.14098.
7. Skinner, J. The Transition from Aerobic to Anaerobic Metabolism / J. Skinner, T. Mclellan // Research quarterly for exercise and sport. – 1980. – 51. – Pp. 234–248.
10.1080/02701367.1980.10609285.
8. Zwingmann, L. Modifications of the Dmax method in comparison to the MLSS in young male athletes / L. Zwingmann // The Physician and Sportsmedicine. – 2019 – 2 (47). – pp. 174–181. DOI: 10.1080/00913847.2018.1546103.

References

1. Kuz'micheva, V. I. Strukturno-funktional'nyj potencial laktata v regul'iacii mezhmolekulyarny'x vzaimodejstvij: avtoreferat dis. kandidata

medicinskix nauk: 03.01.04 / Kuz'micheva V.I.; [Mesto zashhity]: Kubanskij gosudarstvennyj medicinskij universitet Ministerstva zdravooxraneniya Rossijskoj Federacii]. – Krasnodar, 2020. – 22 s.

2. Ry'bina, I. L. Laboratornye markery kontrolya i upravleniya trenirovochnym processom sportsmenov: nauka i praktika: monografiya / I. L. Ry'bina, L. M. Gunina; pod obshhej redakcijej L. M. Guninoj. – Moskva: Sport, 2021. – 376 s.

3. Spirin, T. S. Optimal'nyj metod opredeleniya vtorogo laktatnogo (anae'robnogo) poroga v ciklicheskix vidax sporta / T. S. Spirin, A. I. Chikurov, S. V. Radaeva // Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. – 2023. – № 489. – S. 193–200.

4. Chepur, S. V Molochnaya kislota: dinamika predstavlenij o biologii laktata / S. V. Chepur, N. N. Pluzhnikov, O. V. Chubar', I. V. Fateev, L. S. Bakulina, I. V. Litvinenko, A. I. Shiryaeva //

Uspexi sovremennoj biologii. – 2021. – T. 141, № 3. – S. 227–247.

5. Henneman, E. Relations between structure and function in the design of skeletal muscles / E. Henneman, CB. Olson // J Neurophysiol. – 1965. – 28. – Pp. 581–598.

6. Jones, A. M. The maximal metabolic steady state: redefining the “gold standard” / A. M. Jones, M. Burnley, M. I. Black, D. C. Poole, A. Vanhatalo // Physiological Reports. – 2019. – Vol. 7 (10). doi: 10.14814/phy2.14098.

7. Skinner, J. The Transition from Aerobic to Anaerobic Metabolism / J. Skinner, T. Mclellan // Research quarterly for exercise and sport. – 1980. – 51. – Pp. 234–248.

10.1080/02701367.1980.10609285.

8. Zwingmann, L. Modifications of the Dmax method in comparison to the MLSS in young male athletes / L. Zwingmann // The Physician and Sportsmedicine. – 2019 – 2 (47). – pp. 174–181. DOI: 10.1080/00913847.2018.1546103.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Заварухина Светлана Александровна – кандидат биологических наук, доцент, доцент кафедры биохимии Уральского государственного университета физической культуры. Челябинск. Россия. 454091, г. Челябинск, ул. Орджоникидзе, д. 1. e-mail: svezava@yandex.ru

Бикметов Андрей Вахитович – обучающийся Уральского государственного университета физической культуры. г. Челябинск. Россия. 454091, г. Челябинск, ул. Орджоникидзе, д. 1. e-mail: andreyq76@gmail.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Zavarukhina Svetlana Aleksandrovna – Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Biochemistry of the Ural State University of Physical Culture. Chelyabinsk. Russia. 454091, Russia, Chelyabinsk, Ordzhonikidze str., 1. e-mail: svezava@yandex.ru

Bikmetov Andrey Vakhitovich – student Ural State University of Physical Culture. Chelyabinsk. Russia. 454091, Russia, Chelyabinsk, Ordzhonikidze str., 1. e-mail: andreyq76@gmail.com