

**Методические рекомендации по исследованию аэробного и анаэробного  
способов энергообеспечения мышечной работы у спортсменов во время  
соревнований в видах спорта на выносливость с применением методов  
математического моделирования**

**Москва 2013**

## Содержание

Введение.....	3
1. Основные экспериментальные процедуры, а также способы организации экспериментальных данных.....	4
2. Процедуры калибровки математических моделей.....	16
3. Рекомендации по выявлению биоэнергетических детерминантов соревновательных результатов в видах на выносливость.....	22
4. Рекомендации по использованию информации, полученной в ходе математического моделирования, для оптимизации программ спортивной подготовки.....	33
4. Рекомендации по использованию информации, полученной в ходе математического моделирования, для оптимизации программ спортивной подготовки.....	33

## Введение

Актуальность разработки методических рекомендаций по исследованию аэробного и анаэробного способов энергообеспечения мышечной работы у спортсменов во время соревнований обусловлена необходимостью оптимизации тренировочных нагрузок у элитных спортсменов группы выносливости. В настоящее время тренировочные нагрузки близки к максимуму человеческих возможностей. Принцип специфичности подготовки требует проработки специфических механизмов производства энергии. Моделирование процессов энергоснабжения мышечных сокращений в конкретных дисциплинах легкой атлетики, плавания, велоспорта и других видах на выносливость оказывает существенную помощь в разработке оптимальных программ спортивной подготовки с учетом особенностей специализации. Применение методов математического моделирования способствует повышению эффективности тренировочного процесса за счет нескольких факторов, среди которых количественная оценка анаэробной и аэробной емкости мышечных групп и организма спортсмена в целом, характеристики динамических процессов адаптации в соответствующих энергетических системах, оценок вклада анаэробного метаболизма в конкретных соревновательных дисциплинах, а также оптимизации программ интервальных тренировок.

## 1. Основные экспериментальные процедуры, а также способы организации экспериментальных данных

Для осуществления модельных расчетов требуется организовать тестирование спортсменов, а также обработать полученные тестовые данные. В разделе эти вопросы рассматриваются на примере легкой атлетики (Billat et al., 2009; Billat et al., 2004; de Lucas et al., 2012; Tharp et al., 1997), плавания (Prampetro et al., 2008), велогонок (Burnley et al., 2006; Hawley and Noakes, 1992; Vanhatalo et al., 2007).

В легкой атлетике спортсмены участвуют в официальных или тестовых соревнованиях на смежных дисциплинах. Задача спортсмена – бежать на результат, а не проводить тактическую гонку. Результаты, показанные в ходе соревнований, вводятся в модель в качестве переменных, например,  $t_{800}$ ,  $t_{1500}$ ,  $t_{3000}$  – для результатов на 800, 1500 и 3000 м соответственно (Billat et al., 2009; Billat et al., 1999b). Для получения информации о потреблении кислорода (и последующих расчетов о накопленном дефиците потребления кислорода) используются портативные газоанализаторные системы (например, Cosmed K4b2, Cosmed, Rome, Italy).

Кроме того, спортсменам необходимо участие в нагрузочном ступенчатом тесте для расчета показателей затрат энергии при различных скоростях. В качестве одного из таких протоколов в работе (Henriksson, 2008b) приводится такая процедура. В течение последний 6 минут из разминки на скорости 12 км в час (когда вклад анаэробных источников энергии пренебрежимо мал и когда вклад медленного компонента кинетики потребления кислорода отсутствует) осуществляется измерение кислородной стоимости бега ( $St$ ). После этого спортсмены начинают бежать со скоростью 14 км/час с прогрессивным повышением скорости на 1 км/час на каждой ступени. Продолжительность ступени – 3 минуты. Критерием достижения максимального потребления кислорода выступает (а) RER (отношение выдоха углекислого газа к величине потребления кислорода) становится

большим, чем 1,05; (б) концентрация лактата в крови становится больше, чем 8 ммол/л; (в) наступает отказ в выполнении ступенчатого теста. Скорость, ассоциирующаяся с максимальным потреблением кислорода, определяется как минимальная скорость, когда был достигнут максимальный уровень потребления кислорода.

Вычисление чистой кислородной стоимости бега производится по следующей формуле (Billat et al., 2009)

$$Cr = (\dot{V}O_2 - \dot{V}O_{2rest})/v$$

где  $\dot{V}O_2$  – потребление кислорода на средней скорости  $v$ ,  $\dot{V}O_{2rest}$  – это расчетная величина потребления кислорода в ненагруженном состоянии. Учитывая, что трудно измерить эту величину перед проведением нагрузочного теста, она принимается, как равная  $5 \text{ мл} \times \text{кг}^{-1} \times \text{мин}^{-1}$ .

Кислородный запрос, предъявляемый спортсменом в ходе легкоатлетических соревнований рассчитывается по следующей формуле:

$$\dot{V}O_{2demand} = v_{race} \times Cr$$

где  $v_{race}$  – средняя скорость, достигнутая в ходе соревнований на соответствующую дисциплину. Эта формула получена на основании допущения, что (Saunders et al., 2004) энергетические затраты бега не зависят от скорости. Вклад аэродинамического сопротивления воздуха, которое, как известно, возрастает с ростом скорости, на этих легкоатлетических дистанциях варьируются в пределах 5%, что находится в рамках погрешности экспериментального измерения (Busso and Chatagnon, 2006).

Накопленный кислородный дефицит (выражен в мл  $O_2$ /кг) в соответствующей гонке измеряется как разница между кислородным запросом и эффективным потреблением кислорода (см. рисунок 1).

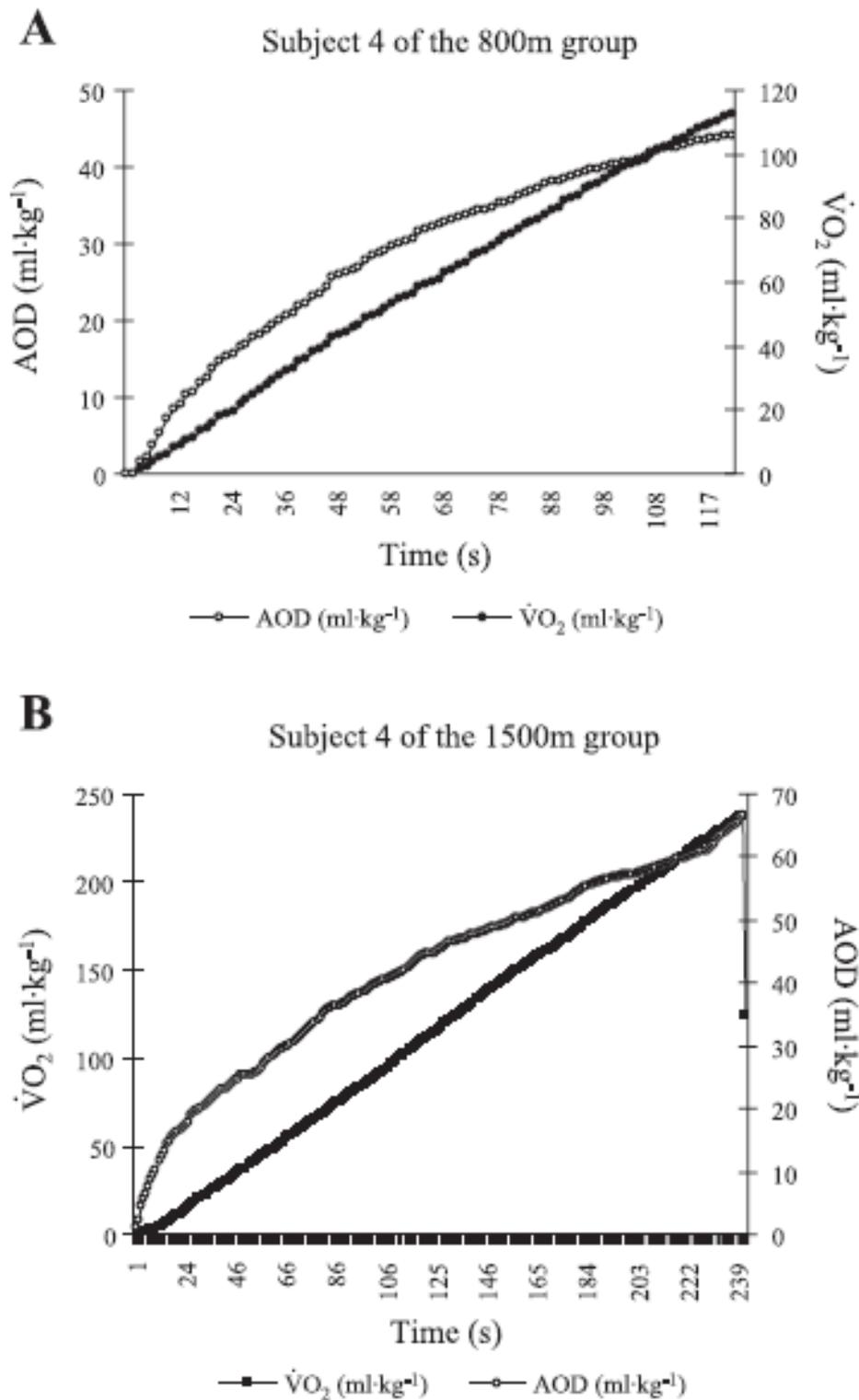


Рисунок 1 – пример накопленного дефицита кислорода и кислородного объема, полученных в ходе 800 и 1500 м соответственно (Billat et al., 2004)

Помимо указанной процедуры с тестами (прикидками, соревнованиями) до отказа существует так называемый трехступенчатый тест. Изначально разработанный для велосипедных видов спорта данный тест позволяет оценить объемы анаэробной емкости, а также величину критической скорости (мощности) по тесту, который длится 3 минуты.

Графическое представление методики, ориентированной на бегунов на выносливость, можно увидеть на рисунке 2.

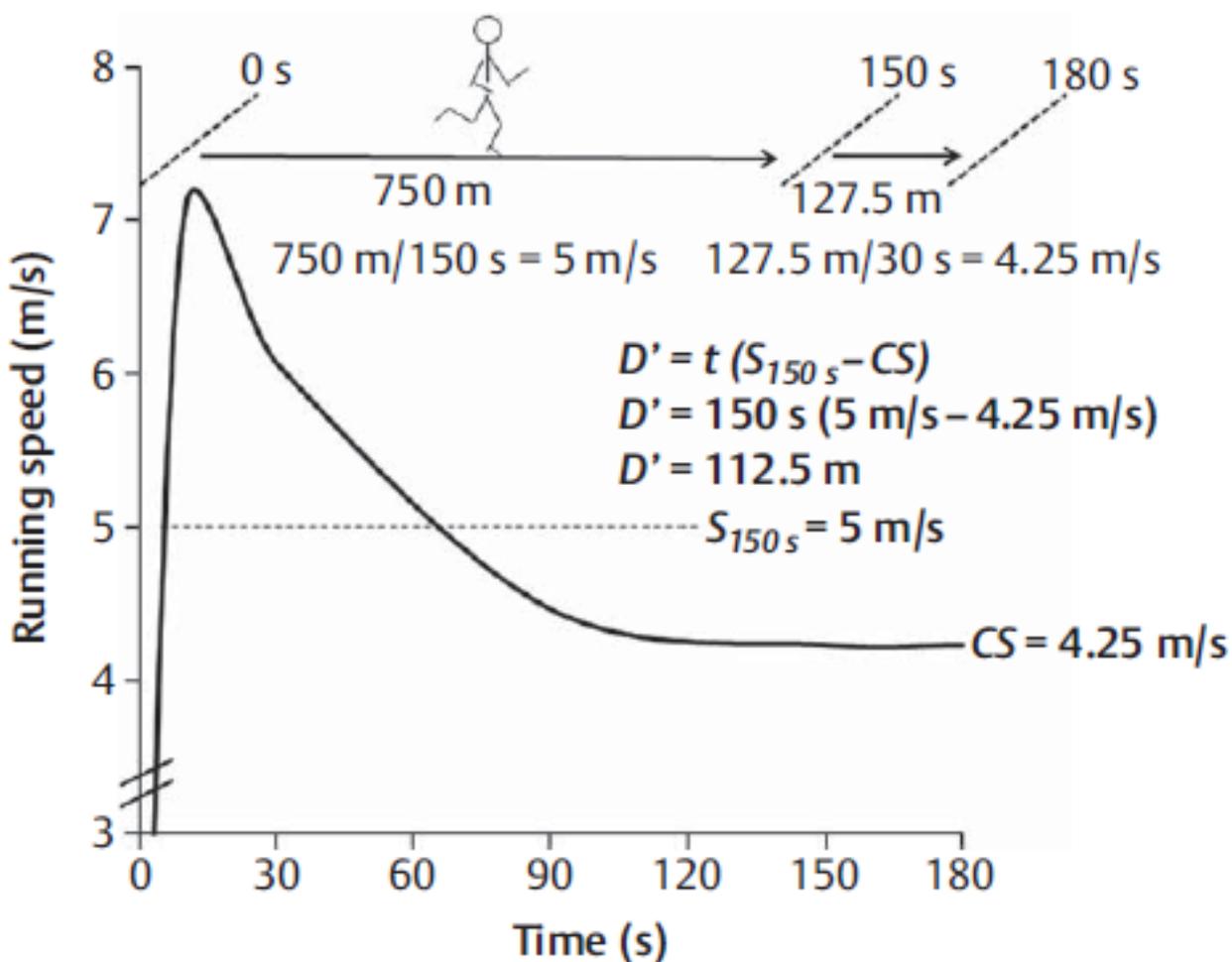


Рисунок 2 – Трехминутный тест для репрезентативного бегуна (Pettitt et al., 2012), time – время в секундах, Running speed – скорость бега, в м/с

Спортсмен для выполнения теста использует бег с GPS-устройством при беге по стандартному легкоатлетическому стадиону. Тест заключается в необходимости развить максимальную скорость с самого старта и стараться

поддерживать ее как можно дольше. При этом будет происходить постепенно снижение скорости бега, и после 2 минут 30 секунд скорость выйдет на уровень критической скорости. Замеренная GPS-устройством средняя скорость на последних тридцати секундах бега и составит искомую критическую скорость.

Для расчета анаэробной емкости следует воспользоваться формулой (Pettitt et al., 2012):

$$D' = t(S_{150s} - CS')$$

где  $S_{150}$  – это средняя скорость бега на первых 150 секундах бега, а  $t$  – это время, за которое измерена скорость (150 секунд).

В графическом примере критическая скорость спортсмена составила 4,25 м/с, а скорость бега на первых 150 секундах была 5,0 м/с. Подставив данные значения в приведенную выше формулу легко сосчитаем, что анаэробная емкость  $D' = 150 \times (5,00 - 4,25) = 112,5$  м

Существует и метод вычисления критической скорости и анаэробной емкости из данных трехминутного теста, основанный на линейном регрессионном анализе (см. рисунок 3). Полученные в результате тестирования две точки, одна из которых получена на отсечке 150 секунд от начала теста (вертикальная ось обозначает преодоленное расстояние, а горизонтальная ось – время от начала теста). Вторая точка берется в конце теста.

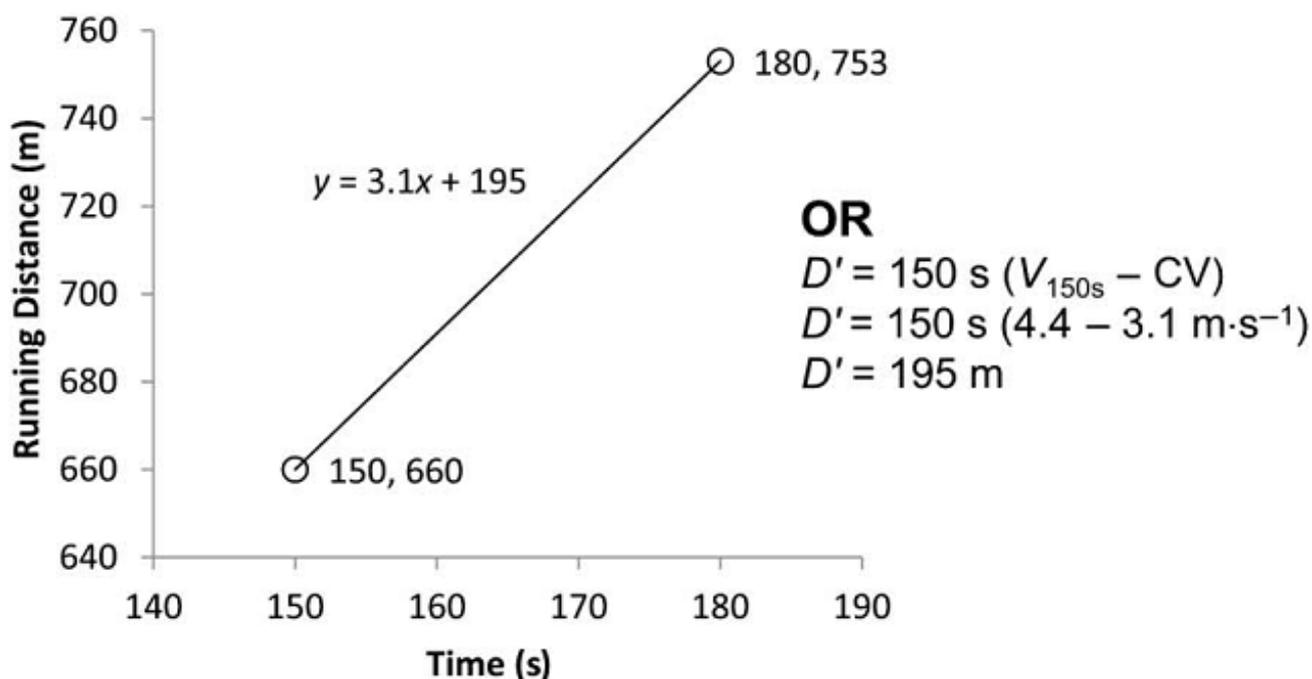


Рисунок 3 – Пример использования методов линейного регрессионного анализа для (Clark et al., 2013)

Модель критической скорости с тремя параметрами также позволяет использовать протокол трехминутного теста для измерения ключевых переменных. Максимальная скорость (новый параметр модели критической скорости) измеряется посредством GPS-устройства. В указанном выше графическом примере максимальная скорость, развитая спортсменом, приблизительно равна 7,2 м/с. Критическая скорость также берется как средняя скорость на последних 30 секундах бега. Формула для расчета анаэробной емкости выглядит следующим образом:

$$D' = \frac{T(S - S_c)(S_c - S_m)}{S - S_m}$$

Использование данной формулы для приведенного выше примера дает нам следующую величину анаэробной емкости ~ 151 м.

Данная методика измерения критической скорости и анаэробной емкости может проводиться в полевых условиях без сложного оборудования. От спортсменов лишь требуется необходимость развить максимальные усилия с самого старта.

Для велосипедистов методика трехминутного теста требует использования велоэргометра с рассчитываемой величиной мощности или же использование привычных тренировочных или соревновательных условий (шоссе, велотрек) с использованием специальных датчиков мощности. Оригинальная методика (Burnley et al., 2006) была разработана для теста с использованием велоэргометра.

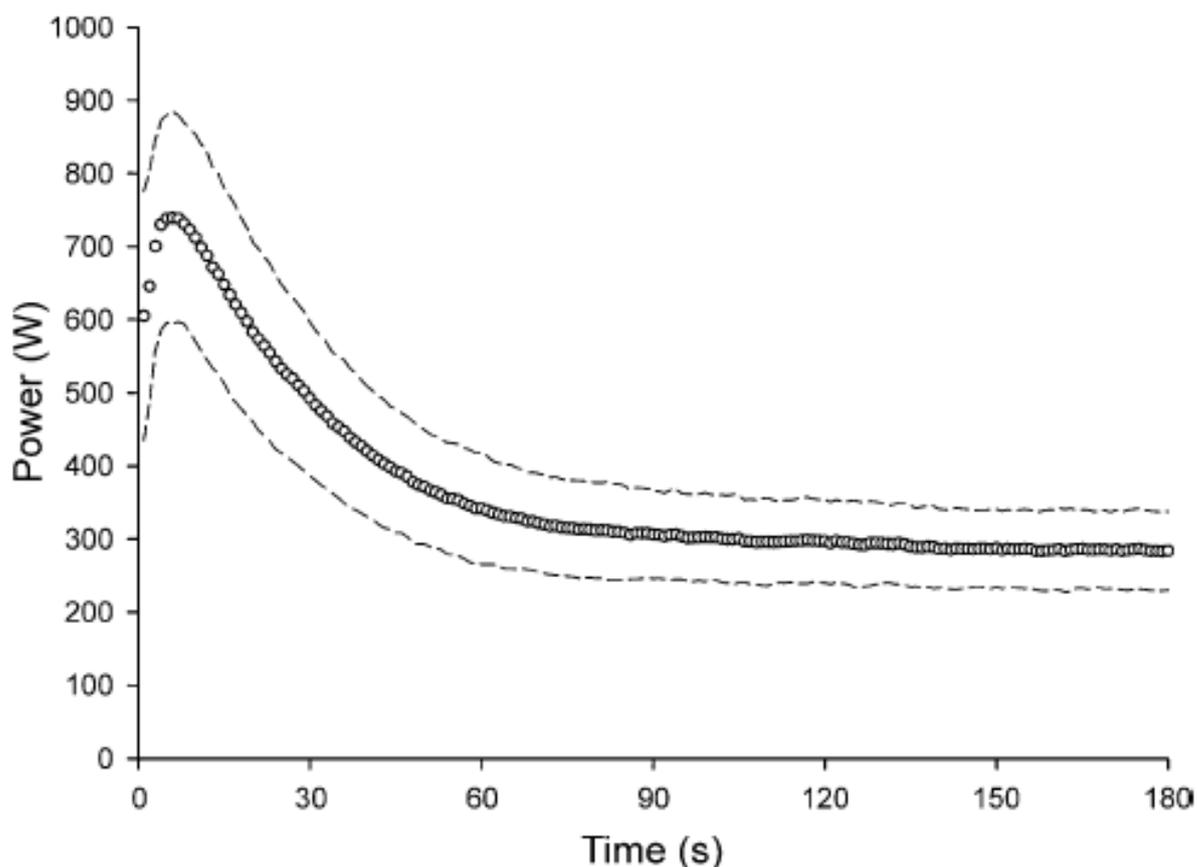


Рисунок 4 – Полученный в ходе трехминутного теста средний по группе профиль мощности обозначен сплошной линией, пунктирные линии обозначают среднеквадратическое отклонение (Vanhatalo et al., 2007)

Тест начинается с 3 минут педалирования без нагрузки со свободно выбранной частотой. После чего начинается тест до отказа. Субъектам дается инструкция нарастить частоту до приблизительно 110 оборотов в минуту в течение последних 5 секунд безнагрузочной фазы. Сопротивление на педали подбирается таким образом, чтобы спортсмен мог достичь интенсивности соответствующей уровню 50% между МПК и вентиляционным порогом 2. Для того, чтобы достичь предельных усилий, спортсмены инструктируются поддерживать настолько высокую частоту педалирования, насколько они могут в течение всего теста. Результаты теста графически имеют сходную форму, что и в трехминутном тесте до отказа (см. рисунок 4).

Критическая мощность в данном трехминутном тесте оценивается, как средняя мощность за последние тридцать секунд теста. А анаэробная емкость вычисляется как определенный интеграл на кривой мощность-время (интегрирование по времени с начальной точкой «0» и конечной точкой в 180 секунд) – см. рисунок 5.

При этом полученные результаты имеют сходные значения с вычислениями критической мощности и анаэробной емкости при традиционной методике (с тестами до отказа на разных уровнях мощности). Различие в вычисленных величинах присутствует (см. рисунок 6). Следует отметить, что на рисунке 6 для репрезентативного субъекта (панель А) значения практически совпадают, но для репрезентативного субъекта (панель В) анаэробная емкость была несколько недооценена в трехминутном тесте, а критическая мощность немного переоценена. Однако в целом по группе испытуемых расчетные значения анаэробной емкости и критической мощности были практически идентичными без статистически значимых различий (см. таблица 1).

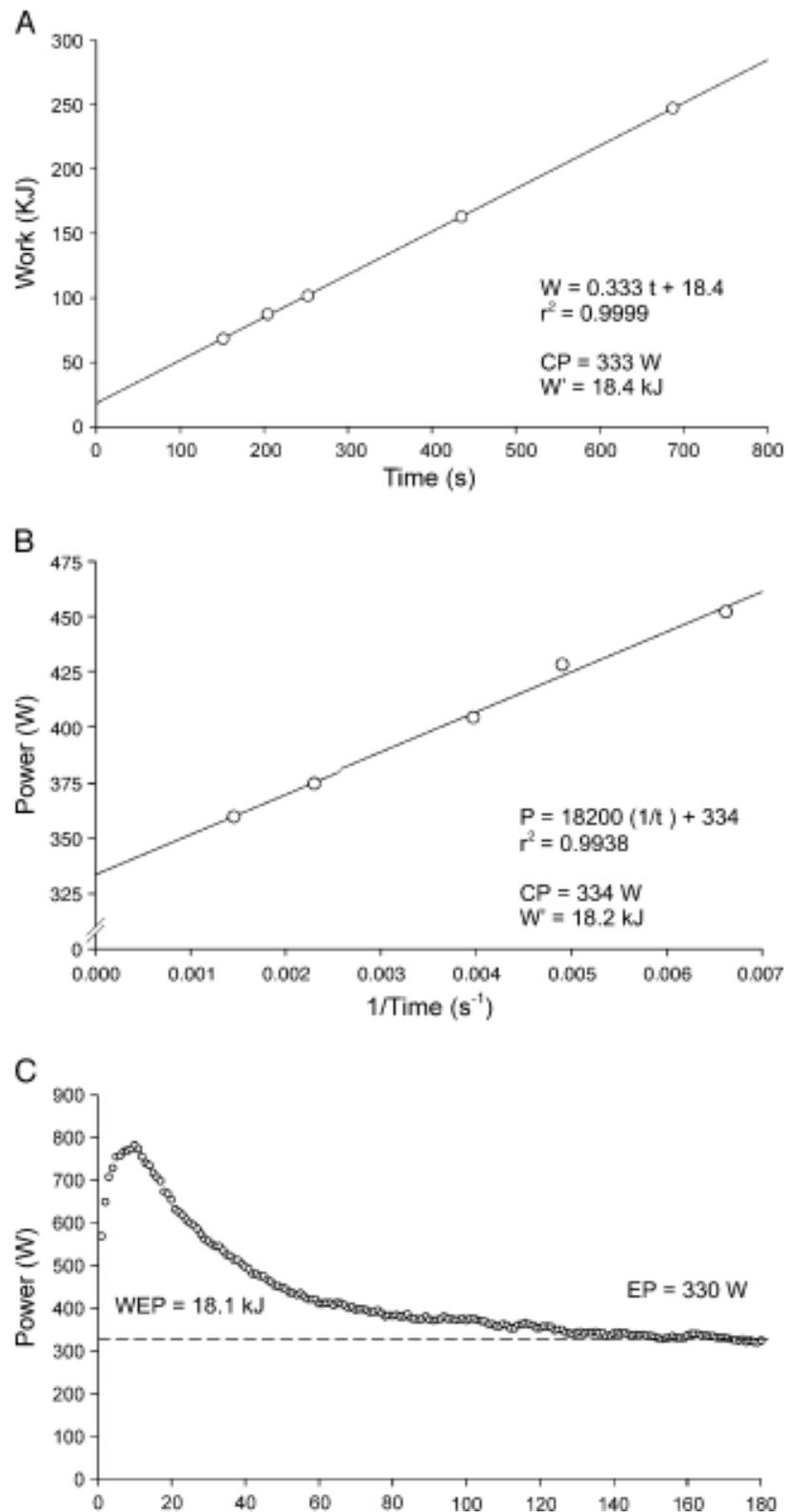


Рисунок 5 – Вывод критической мощности через мощность в конце трехминутного теста (EP) и анаэробной емкости через работу, выполненную с мощностью выше, чем мощность в конце теста (WEP) для репрезентативного субъекта в трехминутном тесте с велоэргометрией (Vanhatalo et al., 2007)

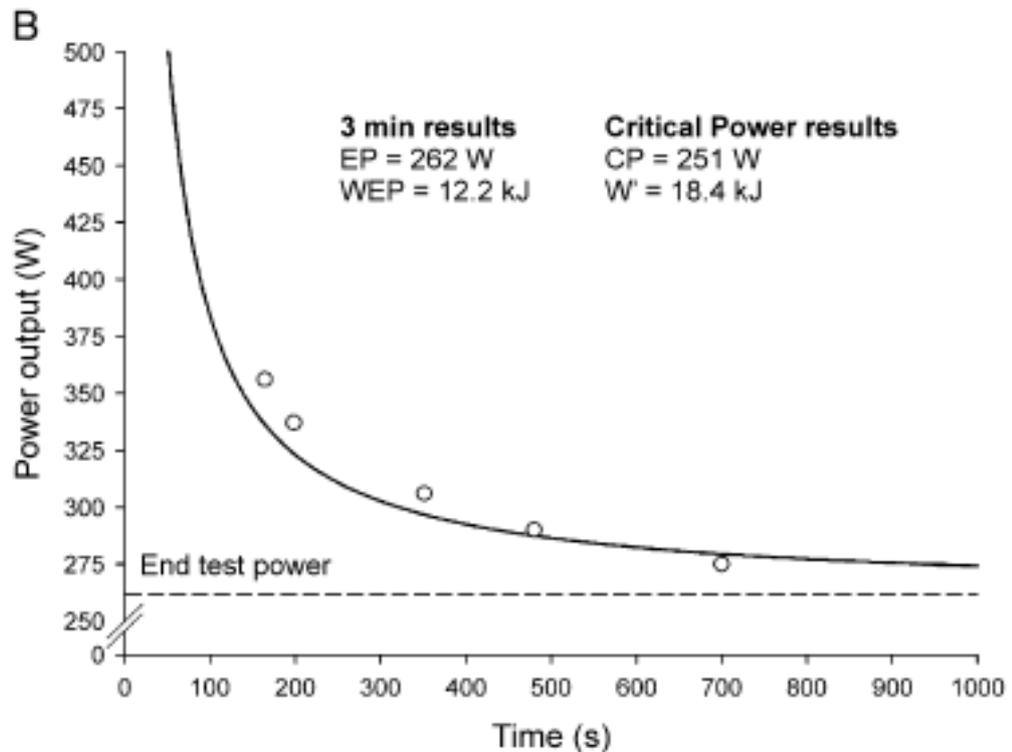
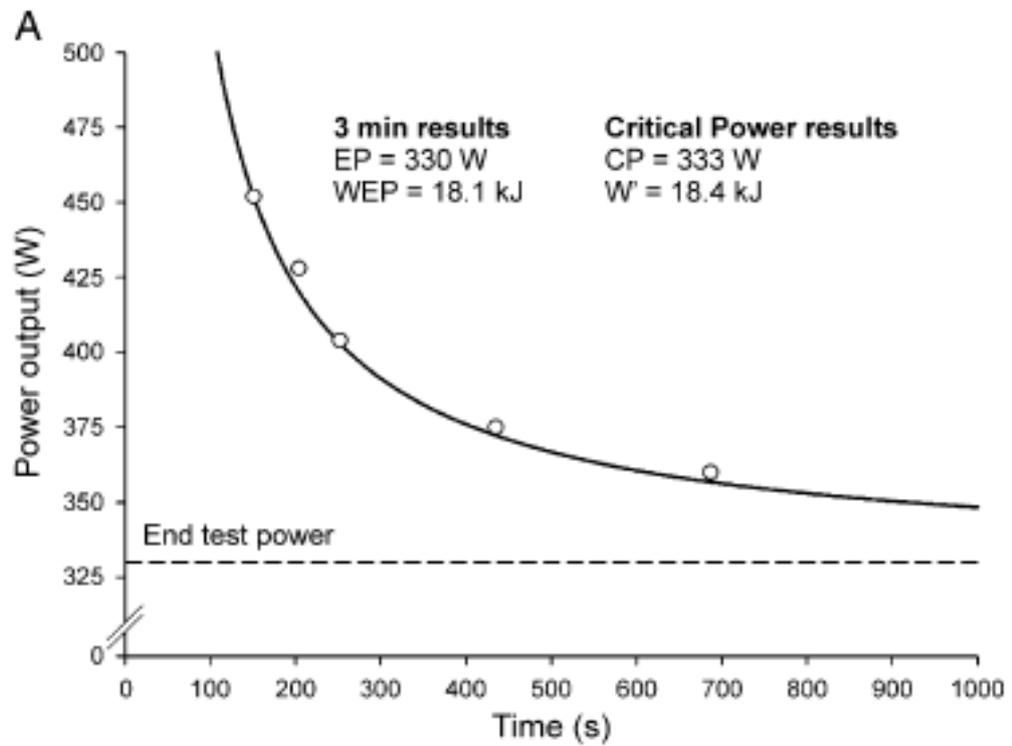


Рисунок 6 – Сравнение параметров модели критической мощности, полученных в результате трехминутного теста (3 min results), а также традиционных тестов до отказа (Critical Power results) для двух репрезентативных субъектов (Vanhatalo et al., 2007)

Таблица 1

Сравнение пиковых значений потребления кислорода ( $VO_{2peak}$ ), а также параметров мощность-время, выведенных с помощью традиционных методов, а также в трехминутном тесте (Vanhatalo et al., 2007)

Subject	$VO_{2peak}$		Critical Power Estimates			$W'$ Estimates		
	Ramp $VO_{2peak}$ ( $L \cdot min^{-1}$ )	3-min Test $VO_{2peak}$ ( $L \cdot min^{-1}$ )	3-min Test EP (W)	Work-Time Model CP (W)	1/Time Model CP (W)	3-min Test Model WEP (kJ)	Work-Time Model $W'$ (kJ)	1/Time Model $W'$ (kJ)
1	2.69	2.73	173	177	176	9.3	9.7	9.9
2	4.53	4.23	286	287	296	16.0	18.9	16.7
3	4.79	4.83	325	337	343	25.3	22.1	20.5
4	4.89	4.60	351	347	347	12.2	11.2	11.3
5	3.70	3.63	252	247	245	18.0	16.7	17.1
6	3.80	3.57	262	251	254	12.2	18.1	16.9
7	4.20	4.21	316	317	320	16.2	17.4	16.5
8	4.71	4.30	334	334	332	11.5	14.9	15.6
9	4.50	4.51	330	333	334	18.1	18.4	18.2
10	4.03	3.90	240	242	247	11.3	12.7	11.0
Mean	4.18	4.05*	287	287	289	15.0	16.0	15.4
SD	0.66	0.61	55	56	57	4.7	3.8	3.5

\* - статистически значимое различие между трехминутным тестом и прогрессивным нагрузочным тестом (Ramp),  $p < 0.05$ ; не выявлено статистически значимых отличий между данными трехминутного теста и традиционных тестов для расчетов критической мощности; Subject – субъект, Critical Power Estimations – оценки критической мощности, 3-min Test EP – оценки критической мощности на основе теста в конце трехминутного теста, Work-Time Model CP – оценки критической мощности, исходя из соотношения работа-время в тестах до отказа, 1/Time Model CP – оценка критической мощности, исходя из традиционных тестов до отказа с использованием переменной, обратной времени,  $W'$  Estimates – оценки анаэробной емкости, 3-min Test Model WEP – оценки анаэробной емкости в трехминутном тесте через работу, выполненную с мощностью, большей, чем мощность в конце теста, Work-Time Model  $W'$  и 1/Time Model  $W'$  – вычисленные величины анаэробной емкости в традиционных тестах до отказа, Mean- средняя величина, SD – среднеквадратичное отклонение.

Важным моментом, определяющим достоверность данных для элитных спортсменов, получаемых в трехминутных тестах, является необходимость держать их в неведении относительно оставшегося времени теста. Дело в том, что соревновательная практика спортсменов группы

выносливости дает информацию о том, что практически каждый атлет к концу гонки перед финишем усиливает темп (наращивает скорость) (Abbiss and Laursen, 2008; Foster et al., 2012; Lima-Silva et al., 2010; Noakes, 2002; Noakes, 2008; Noakes, 2012; Noakes et al., 2009; Noakes et al., 2005; Nummela et al., 2008; Rauch et al., 2013; Reardon, 2013; Sundström et al., 2011; Tucker et al., 2006). Наличие подобной ситуации в тесте может дать значения скорости на последних тридцати секундах теста выше, чем на первых 150 секундах. Это сделает невозможным использование приведенных выше формул для оценок анаэробной емкости и критической скорости. Наличие тактической раскладки сил, при которой спортсмен «добавляет» к финишу следует оценивать по данным GPS-скорости (для бега) или же по детальным данным по мощности педалирования (в случае трехминутного теста с велоэргометрией).

Таким образом, надлежащая организация физиологических тестов и прикидок, а также математическая обработка получаемых экспериментальных данных позволяет получить важные для тренера прикладные математические модели.

## 2. Процедуры калибровки математических моделей

Согласно изложенным в разделе 1 допущениям выходит, что критическая мощность (CP) является аэробной, а AWC анаэробной по своей природе. Однако верификация данного подхода (критичная с точки зрения использования моделей в практических целях) представляется не такой простой задачей. В ряде исследований (Green and Dawson, 1993; Green et al., 1994; Housh et al., 1991; Jenkins and Quigley, 1991; Moritani et al., 1981) была найдена высокая корреляция между CP и вентиляционным анаэробным порогом, а также факт, что AWC не подвержено влиянию гипоксии.

Для того, чтобы оценить параметры CP и AWC для конкретных спортсменов необходимо осуществить минимум два тестирования до отказа с постоянной мощностью. Однако лучше получить 6 или более точек.

В случае двух тестирований до отказа (или двух результатов с контрольных соревнований или прикидок) для вычисления критической скорости по модели с тремя параметрами следует воспользоваться такой формулой:

$$S_c = \frac{S_m \left( \frac{T_1}{T_2} S_1 - S_2 \right) - S_1 S_2 \left( \frac{T_1}{T_2} - 1 \right)}{S_m \left( \frac{T_1}{T_2} - 1 \right) - \frac{T_1}{T_2} S_2 + S_1},$$

где  $S_c$  – критическая скорость,  $S_1$  – средняя скорость, достигнутая в первой прикидке (тесте до отказа при заданной скорости),  $S_2$  – средняя скорость, достигнутая во второй прикидке (тесте),  $S_m$  – максимальная скорость спортсмена, все скоростные показатели выражены в м/с,  $T_1$  – время первой прикидки в секундах,  $T_2$  – время второй прикидки в секундах.

Для измерения максимальной скорости обычно используется бег с ходу на 20-50 метров с электронной или ручной секундометрией. Рекомендуется провести тест на максимальную скорость 2-3 раза для достижения достоверных результатов.

Для модели критической скорости с двумя параметрами не требуется измерений максимальной скорости (мощности). Достаточно обработать данные двух тестов до отказа (соревнований на результат) по следующей формуле:

$$S_c = \frac{T_1 S_1 - T_2 S_2}{T_1 - T_2}$$

Измерение анаэробной емкости (в случае бега на выносливость в легкой атлетике) подставляется найденное значение критической скорости в формулу:

$$D' = \frac{T_i (S_i - S_c)(S_c - S_m)}{S_i - S_m},$$

где  $i = \overline{1,2}$  - номер прикидки (соревнования).

Модель с двумя параметрами позволяет использовать более простую формулу:

$$D' = T_i (S_i - S_c)$$

Путь для оценки параметров модели аналогичен приведенным выше примерам и в случае других видов спорта (плавание, велосипедные виды спорта, конькобежный спорт и т.п.). В случае велоэргометрии вместо показателей скорости, используются показатели мощности, а полученное

значение переменной «анаэробная емкость» измеряется не в метрах, а в джоулях.

Новые полученные значения дают возможность калибровать модель, т.е. подобрать более точные параметры, характеризующие модельные характеристики спортсмена. Если предыдущие тестирования (соревнования) отстают по времени далеко от текущих результатов, то имеет смысл использовать описанную выше процедуру заново (поскольку произошедшие адаптационные перестройки делают несопоставимыми результаты двух отстоящих друг от друга по времени результатов). Если же результаты получены в течение ограниченного времени (короткого соревновательного периода, серии контрольных соревнований или тестов), то в данном случае методы наименьших квадратов дают возможность численного подбора параметров модели (методику см. ниже).

При наличии нескольких контрольных точек для оценки начальных параметров модели, а также последующей ее калибровки (для обнаружения сдвигов, происходящих в результате изменения уровня тренированности или детренированности спортсмена) используются стандартные методы наименьших квадратов.

Разберем процедуру на примере спортсменки-представительницы бега на выносливость. Начальные данные результатов с результатами контрольных соревнований и прикидок (без до отказа) представлены в таблице 2.

Таблица 2

Исходные данные спортсменки-представительницы бега на выносливость для последующей математической обработки

Результат мин.,сек	Время, сек	Дистанция, м	Скорость, м/сек	Обозначение	T расчетное, сек	Квадрат отклонения
16,58	1018	5000	4,91	S1	-2142,2	9987004,5
9,426	582,6	2952	5,07	S2	3107,7	6376091,2
2,59	179	1000	5,59	S3	461,0	79497,2

Для вычисления расчетного времени были использованы исходные параметры  $D' = 200$ , критическая скорость  $5,0$  метров в секунду. Максимальная скорость спортсменки была получена в результате бега с ходу на  $40$  метров и составила  $6,67$  метров в секунду. Сумма квадратов отклонений (суммарные значения последней колонки в таблице) является целевой функцией, которая минимизируется численными методами путем изменений значений анаэробной емкости и критической скорости. Известны ограничения на диапазон значений данных параметров – анаэробная емкость и критическая скорость величины неотрицательные. Кроме того, критическая скорость меньше, чем величина полученной в ходе тестирования максимальной скорости спортсмена.

Метод наименьших квадратов позволил минимизировать сумму квадратов отклонений (до величины  $6389$  с исходной суммы в  $16445292$ ) и получить такие значения искомых параметров:  $D' = 140$  метров, а  $Sc = 4,76$  метров в секунду или  $3,30$  мин/км. Последнее значение хорошо соотносится с результатами физиологического тестирования с использованием газоанализаторного оборудования.

Аналогичная процедура используется в случае модели критической скорости с двумя параметрами (без максимальной скорости). При этом полученные в результате численного решения параметры модели несколько отличаются.  $D' = 188$  метров, а  $Sc = 4,73$  метров в секунду или  $3,32$  мин/км. Отметим, что для модели с тремя параметрами всегда характерно получение больших значений анаэробной емкости и меньшей критической скорости.

Наконец, представленные в данном разделе модели позволяют строить прогнозы будущих спортивных результатов. Полученные в результате математической обработки данных значения дают важную возможность подставив их в соответствующие формулы тех или иных модификаций моделей критической мощности (скорости) получить величины соревновательной готовности спортсмена на смежных дистанциях.

Для вычисления времени (в секундах) будущего спортивного результата на заданной дистанции в модели критической скорости с двумя параметрами следует воспользоваться формулой:

$$T = \frac{D - D'}{S_c},$$

где  $D$  – дистанция в метрах, прогнозное время прохождения которой требуется найти.

Для модели с тремя параметрами требуется другая формула:

$$S = \frac{-D(S_m - S_c) - D'S_m \pm \sqrt{(D(S_m - S_c) - D'S_m)^2 - 4D'DS_c(S_c - S_m)}}{2D'},$$

где  $S$  – это расчетная скорость прохождения дистанции (получается как результат решения квадратного уравнения, из двух корней выбирается лежащее в области определения ( $0 < S < S_m$ )).

Для расчета прогнозного времени (в секундах) достаточно разделить величину дистанцию ( $D$ ) на полученное значение  $S$ :

$$T = \frac{2DD'}{-D(S_m - S_c) - D'S_m \pm \sqrt{(D(S_m - S_c) - D'S_m)^2 - 4D'DS_c(S_c - S_m)}}$$

Реализация данных расчетов возможна и при помощи компьютера (автоматизировано - на том или ином программном языке, или же в программе MS Excel – см. рисунок 7).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Результат мин.,с	Время, сек	Дистанция	Скорость, м/с	Обозначения					
2	6,1939	379,39	2000	5,27	S1					
3	16,560	1016	5000	4,92	S2					
4										
5	T1/T2	0,3734154								
6	Sc (критическая скорость)	4,7124613	3,32	мин/км						
7	D' (анаэробная емкость)	212	м							
8	D' (анаэробная емкость)	212	м							
9										
10										
11	D	800	1011,5	1500	2000	3000	5000	10000	15000	21097,5
12	T pred, min	2,0791	2,8271168	4,554805556	6,323166667	9,859889	16,93333	34,61694	52,30056	73,86572
13	T pred, min.sec	2,05	2,50	4,33	6,19	9,52	16,56	34,37	52,18	73,52
14										
15										
16										
17										
18										
19										
20										
21										
22										

Рисунок 7 – пример использования программы MS Excel для автоматизированной обработки данных тестов (контрольных соревнований) и прогноза результатов будущих выступлений

В этом случае математическая обработка данных будет занимать сравнительно малое время, и позволять осуществить расчеты для большого круга спортсменов. Полученные модельные параметры для каждого из спортсменов, в свою очередь, дают возможность осуществить прогнозные расчеты результатов будущих соревнований, а также осуществлять мониторинг текущего тренировочного процесса с точки зрения оценки воздействия тренировок на переменные критической скорости (мощности), а также анаэробной емкости.

### **3. Рекомендации по выявлению биоэнергетических детерминантов соревновательных результатов в видах на выносливость**

В разных видах спорта разные системы энергоснабжения вносят свой вклад. Корректное понимание вклада той или иной системы с спортивный результат является залогом правильно выстроенной программы спортивной подготовки. Данная программа совершенствования спортивного мастерства должна способствовать повышению эффективности механизма, ответственного за соответствующий результат. Соответственно задача тренера заключается в идентификации подобных систем и организации тренировочного процесса, направленного на усиление мощности доминирующей системы энергоснабжения. При этом исследование вклада подобных систем возможно по различным методикам (Vompa and Haff, 2009. С. 28-29)

В работе (Gastin, 2001) был произведен обзор исследовательских статей, в которых сделана попытка выявить вклад различных энергетических систем в результаты спортсменов в различных видах спорта и на различных дистанциях по несколько иным видам спорта и методикам (см. таблица 3). В отличие от предыдущей таблице акцент сделан на видах, требующих преимущественного проявления выносливости. В данной таблице используются следующие обозначения: DM = прямые измерения, ET = тренированные на выносливость; MD = средние дистанции; MM = математическая модель; ODA = метод дефицита кислорода, используемый при предположении о постоянной механической эффективности; ODI = метод дефицита кислорода, используемый при предположении об индивидуальной механической эффективности; SMD = спринт и средние дистанции; ST = тренированные для спринта; T = тренированные ; UT = нетренированные. В «шапочке» таблице *study* означает исследования, где

получен данный результат, exercise – дисциплина в определенном виде спорта, participants – характеристики субъектов, участников исследования, method – метод определения доли аэробного энергоснабжения, duration – продолжительность упражнения в секундах, %aerobic – вклад аэробной системы энергоснабжения в процентах.

В данной таблице приведен перечень методик, используемых для оценок вклада аэробной системы энергоснабжения в обеспечение двигательной активности в соответствующих видах спорта:

- 1) прямые измерения,
- 2) метод дефицита кислорода, используемый при предположении о постоянной механической эффективности;
- 3) метод дефицита кислорода, используемый при предположении об индивидуальной механической эффективности;
- 4) математическое моделирование (Di Prampero et al., 1993; Peronnet and Thibault, 1989; Ward-Smith, 1985).

Охарактеризуем основные методы.

Оценки относительного вклада аэробной энергетической системы в течение  
отдельного высокоинтенсивного упражнения (Gastin, 2001)

Study	Exercise	Participants	Method	Duration (sec)	% Aerobic
Bangsbo et al. <sup>[73]</sup>	Cycle	3 ST cyclists	ODI	179	74
	Run	14 ET runners		181	78
	Run	15 T soccer		205	78
	Run	5 T oarsmen		243	83
Calbet et al. <sup>[66]</sup>	Cycle <sup>a</sup>	19 UT	ODI	30	23
				45	31
				148	59
Craig et al. <sup>[74]</sup>	Cycle	6 ST cyclists	ODI	70	50
		6 ET cyclists		70	55
		6 ST cyclists		120	63
		6 ET cyclists		120	67
		6 ST cyclists		300	86
		6 ET cyclists		300	85
Di Prampero et al. <sup>[75]</sup>	Run	MD runners	MM	102	62
				132	69
				209	78
				452	89
				778	93
Faina et al. <sup>[56]</sup>	Cycle	8 T cyclists	ODI	225	85
	Swim flume	8 T swimmers		302	82
	Kayak	7 T kayakists		356	88
Gastin & Lawson <sup>[62]</sup>	Cycle <sup>a</sup>	8 UT	ODI	15	19
				30	29
				45	39
				60	46
				75	52
Gastin & Lawson <sup>[76]</sup>	Cycle <sup>a</sup>	6 ST cyclists	ODI	90	53
		8 ET triathletes		90	56
		8 UT		90	58
Gastin et al. <sup>[40]</sup>	Cycle <sup>a</sup>	9 UT	ODI	62	51
		6 UT/6 ET		90	57
		9 UT		94	59
		186		76	
Green et al. <sup>[77]</sup>	Cycle	6 UT/6 ET	ODI	208	74
		10 T cyclists		173	76
Hermansen & Medbo <sup>[67]</sup>	Run	1 ST	ODI	15	22
				30	29
				60	43
				60	51
				60	46
Hill <sup>[78]</sup>	Run	6 MD runners	DM	120	59
		7 MD <sup>b</sup> runners		240	75
		5 MD runners		49	37
		9 MD <sup>b</sup> runners		61	38
		120		61	
		146		67	
				246	80
				309	83

продолжение таблицы 3

Study	Exercise	Participants	Method	Duration (sec)	% Aerobic
Kavanagh & Jacobs <sup>[64]</sup>	Cycle <sup>a</sup>	5 UT	ODA	30	18
Locatelli & Arsac <sup>[79]</sup>	Run <sup>a</sup>	4/4 <sup>b</sup> ST runners	DM	11	3
Medbø & Sejersted <sup>[80]</sup>	Run	6 ET	ODI	55	50
		6 ST		57	44
Medbø & Tabata <sup>[25]</sup>	Cycle	14 UT	ODI	34	30
		13 UT		75	47
				156	65
Morton & Gastin <sup>[81]</sup>	Swim bench <sup>a</sup>	7 UT	ODI	60	40
		7 ST		60	46
Morton <sup>[82]</sup>	Swim bench <sup>a</sup>	UT	ODI	45	50
				60	44
Nummela & Rusko <sup>[83]</sup>	Run	8 ET	ODI	49	46
		8 ST runners		50	37
O'Brien et al. <sup>[88]</sup>	Cycle <sup>a</sup>	9 UT	ODI	30	30
				30	33
				60	46
				60	48
Olesen et al. <sup>[84]</sup>	Run	6 runners	ODI	62	37
		8 SMD runners		64	44
				139	60
				146	72
		6 runners		148	57
				148	68
Péronnet & Thibault <sup>[85]</sup>	Run	ST runners	MM	6	5
				10	8
		MD runners		20	14
				44	30
				102	57
				132	65
				209	76
				226	78
				291	82
		ET runners		452	88
				778	94
				1654	98
Ramsbottom et al. <sup>[86]</sup>	Run	11/1 <sup>b</sup> runners	ODI	171	69
				182	71
Ramsbottom et al. <sup>[87]</sup>	Run	32/17 <sup>b</sup> UT	ODI	173	68
				178	70
Serresse et al. <sup>[88]</sup>	Cycle <sup>a</sup>	23 T	DM	10	3
		21 T		30	28
		20 T		90	46
Smith & Hill <sup>[65]</sup>	Cycle <sup>a</sup>	6 UT	DM	30	16
Spencer & Gastin <sup>[89]</sup>	Run	3 ST runners	ODI	22	29
		6 MD runners		49	43
		5 MD runners		113	66
		6 MD runners		235	84

Study	Exercise	Participants	Method	Duration (sec)	% Aerobic
Spencer et al. <sup>[90]</sup>	Run	4 ST runners	ODI	52	46
		5 MD runners		118	69
				242	83
van Ingen Schenau et al. <sup>[91]</sup>	Run	ST runners	MM	10	4
				20	8
		MD runners		44	17
Ward-Smith <sup>[92]</sup>	Run	ST runners	MM	10	7
				20	14
		MD runners		45	28
				105	52
				218	72
		ET runners		816	92
Withers et al. <sup>[28]</sup>	Cycle <sup>a</sup>	3 UT	ODI	30	28
				60	49
				90	61
Withers et al. <sup>[93]</sup>	Cycle <sup>a</sup>	12 ET	ODI	45	40
				60	47
				75	54
				90	60

a – тесты до отказа, b – количество спортсменок-женщин.

Прямые измерения заключаются в использовании методов газоанализа. Данный метод использует измерения объема вдыхаемого кислорода и аэробное производство АТФ всем телом. Каждый литр кислорода, утилизируемый в дыхательной системе, приносит приблизительно 20 килоджоулей энергии. Определение метаболического дыхательного коэффициента (отношение объема выдыхаемого углекислого газа к объему вдыхаемого кислорода) дает возможность количественно определить долю жиров и углеводов в производстве энергии (см. таблица 4).

Таблица 4

Таблица процессов смешанного окисления жиров и углеводов (Цит. по: Peronnet and Massicotte, 1991)

R.Q.	Percentage of total oxygen consumed by:		Percentage of total heat produced by:		Calories per liter O <sub>2</sub> .	
	Carbo- hydrate (1)	Fat (2)	Carbo- hydrate (3)	Fat (4)	Number (5)	Logarithm. (6)
0.707	0	100.0	0	100.0	4.686	0.67080
0.71	1.02	99.0	1.10	98.9	4.690	0.67114
0.72	4.44	95.6	4.76	95.2	4.702	0.67228
0.73	7.85	92.2	8.40	91.6	4.714	0.67342
0.74	11.3	88.7	12.0	88.0	4.727	0.67456
0.75	14.7	85.3	15.6	84.4	4.739	0.67569
0.76	18.1	81.9	19.2	80.8	4.751	0.67682
0.77	21.5	78.5	22.8	77.2	4.764	0.67794
0.78	24.9	75.1	26.3	73.7	4.776	0.67906
0.79	28.3	71.7	29.9	70.1	4.788	0.68018
0.80	31.7	68.3	33.4	66.6	4.801	0.68129
0.81	35.2	64.8	36.9	63.1	4.813	0.68241
0.82	38.6	61.4	40.3	59.7	4.825	0.68352
0.83	42.0	58.0	43.8	56.2	4.838	0.68463
0.84	45.4	54.6	47.2	52.8	4.850	0.68573
0.85	48.8	51.2	50.7	49.3	4.862	0.68683
0.86	52.2	47.8	54.1	45.9	4.875	0.68793
0.87	55.6	44.4	57.5	42.5	4.887	0.68903
0.88	59.0	41.0	60.8	39.2	4.899	0.69012
0.89	62.5	37.5	64.2	35.8	4.911	0.69121
0.90	65.9	34.1	67.5	32.5	4.924	0.69230
0.91	69.3	30.7	70.8	29.2	4.936	0.69339
0.92	72.7	27.3	74.1	25.9	4.948	0.69447
0.93	76.1	23.9	77.4	22.6	4.961	0.69555
0.94	79.5	20.5	80.7	19.3	4.973	0.69663
0.95	82.9	17.1	84.0	16.0	4.985	0.69770
0.96	86.3	13.7	87.2	12.8	4.998	0.69877
0.97	89.8	10.2	90.4	9.58	5.010	0.69984
0.98	93.2	6.83	93.6	6.37	5.022	0.70091
0.99	96.6	3.41	96.8	3.18	5.035	0.70197
1.00	100.0	0	100.0	0	5.047	0.70303

В указанной таблице R.Q. обозначает дыхательный коэффициент (современное обозначение RER), percentage of total oxygen consumed by carbohydrates/fat – процент кислорода, использованного для окисления углеводов/жиров, percentage of total heat produced by carbohydrates/fat – процент тепла, произведенного с помощью углеводов/жиров, calories per liter

O<sub>2</sub> – калории, получаемые в результате потребления литра кислорода (в единицах, numbers, и в логарифмической шкале – lagariphms). Данная таблица было получена в 20-е годы и хрестоматийна в том смысле, что используется для научных исследований, а также обработки результатов тестирования в лабораториях по всему миру. Обработка результатов ступенчатого тестирования с газоанализом позволяет тренеру получить информацию о зонах интенсивности, в которых энергоснабжение идет почти исключительно за счет жировых источников (а, следовательно, построить тренировочных процесс, направленный на совершенствование данных механизмов), а также оценить энергоэффективность заданной скорости (мощности) передвижения спортсмена.

Использование современных математических методов позволило получить более точные оценки вклада различных источников энергии при разных значениях дыхательного коэффициента (см. таблица 5). В данной таблице было уточнены значения соответствующих энергетических эквивалентов (energy equivalent of oxygen) для каждого дыхательного коэффициента (как в калориях, так и в джоулях). Glucose – означает глюкозу, Fatty acids – жирные кислоты.

Таблица небелковых дыхательных коэффициентов (Peronnet and Massicotte, 1991), STPD – стандартные условия

RQ	Percentages of energy from		Energy equivalent of oxygen		RQ	Percentages of energy from		Energy equivalent of oxygen	
	Glucose	Fatty acids	kcal/l (STPD)	kJ/l (STPD)		Glucose	Fatty acids	kcal/l (STPD)	kJ/l (STPD)
.7036	0	100	4.851	20.287	.855	53.4	46.6	5.026	21.019
.705	0.5	99.5	4.852	20.291	.86	55.1	44.9	5.032	21.044
.71	2.3	97.7	4.858	20.316	.865	56.8	43.2	5.037	21.065
.715	4.2	95.8	4.864	20.341	.87	58.5	41.5	5.043	21.090
.72	6.0	94.0	4.870	20.366	.875	60.2	39.8	5.049	21.115
.725	7.8	92.2	4.875	20.387	.88	61.9	38.1	5.055	21.140
.73	9.6	90.4	4.881	20.412	.885	63.6	36.4	5.060	21.161
.735	11.4	88.6	4.887	20.437	.89	65.3	34.7	5.066	21.186
.74	13.2	86.8	4.893	20.463	.895	66.9	33.1	5.072	21.211
.745	15.0	85.0	4.899	20.488	.9	68.6	31.4	5.078	21.236
.75	16.8	83.2	4.904	20.509	.905	70.3	29.7	5.084	21.261
.755	18.6	81.4	4.910	20.534	.91	71.9	28.1	5.089	21.282
.76	20.4	79.6	4.916	20.559	.915	73.6	26.4	5.095	21.307
.765	22.1	77.9	4.922	20.584	.92	75.3	24.7	5.101	21.332
.77	23.9	76.1	4.927	20.605	.925	76.9	23.1	5.107	21.357
.775	25.7	74.3	4.933	20.630	.93	78.6	21.4	5.112	21.378
.78	27.4	72.6	4.939	20.655	.935	80.2	19.8	5.118	21.403
.785	29.2	70.8	4.945	20.680	.94	81.8	18.2	5.124	21.429
.79	31.0	69.0	4.951	20.705	.945	83.5	16.5	5.130	21.454
.795	32.7	67.3	4.956	20.726	.95	85.1	14.9	5.136	21.479
.8	34.5	65.5	4.962	20.751	.955	86.7	13.3	5.141	21.500
.805	36.2	63.8	4.968	20.776	.96	88.4	11.6	5.147	21.525
.81	38.0	62.0	4.974	20.801	.965	90.0	10.0	5.153	21.550
.815	39.7	60.3	4.980	20.826	.97	91.6	8.4	5.159	21.575
.82	41.4	58.6	4.985	20.847	.975	93.2	6.8	5.164	21.596
.825	43.2	56.8	4.991	20.872	.98	94.8	5.2	5.170	21.621
.83	44.9	55.1	4.997	20.897	.985	96.4	3.6	5.176	21.646
.835	46.6	53.4	5.003	20.923	.99	98.0	2.0	5.182	21.671
.84	48.3	51.7	5.008	20.943	.995	99.6	0.4	5.188	21.696
.845	50.0	50.0	5.014	20.969	.996	100	0	5.189	21.700
.85	51.7	48.3	5.020	20.994					

Однако прямые методы оценок анаэробной энергии, к сожалению, не отличаются подобной точностью. Причина заключается в том, что данные процессы разворачиваются локально в скелетных мышцах и слабо влияют на центральные процессы. Существует несколько методов прямого измерения, однако ни один из них не может считаться универсальным.

Традиционно пиковая концентрация лактата в крови используется для измерения производства энергии анаэробным способом (Billat, 1996; Jacobs, 1986). Появления лактата в крови свидетельствует о разворачивании процессов гликолиза, однако это не дает численной оценки производства лактата в мышцах, а также объеме задействованных высокоэнергетических фосфатов для производства энергии. Кроме того, концентрация лактата в крови существенно ниже, чем концентрация лактата в работающих скелетных мышцах (Jacobs and Kaiser, 1982; Tesch et al., 1982). Наконец, тот факт, что концентрация лактата в крови достигает пиковых значений уже после прекращения высокоинтенсивной нагрузки, также свидетельствует о том, что лактат в крови и лактат в мышцах не находятся в состоянии равновесия (Gollnick et al., 1986).

Количество кислорода, потребленного после завершения нагрузки и превосходящего уровень величины потребления кислорода в процессе отдыха, рассматривается как инструмент для оценки анаэробного производства энергии, и называется кислородный долг (или дефицит). Классическая гипотеза говорит о том, что размер кислородного долга после завершения нагрузки связан с метаболизмом лактата в состоянии покоя (Gastin, 2001). Данная гипотеза была модифицирована путем предположения о том, что кислородный дефицит частично связан как с алактатными компонентами, так и с лактатными (Gastin, 2001). В дальнейшем данный метод подвергся критике (Bangsbo et al., 1990; Vandewalle et al., 1987). В частности, было обнаружено, что метод дефицита кислорода приводит к переоценке вклада анаэробного источника энергии для исследуемых

дисциплины спорта. Общая логика критики заключается в том, что время после завершения нагрузки уходит не только на то, чтобы восполнить кислородный долг. Ряд метаболических сдвигов способствуют активации митохондриального респрирования, а следовательно, повышают уровень потребления кислорода после нагрузки.

Среди математических методов следует выделить работу (Peronnet and Thibault, 1989), в которой изложен изящный математический аппарат идентификации вклада различных источников энергии в энергообеспечение различных беговых дисциплин легкой атлетики.

Ключевая формула такова:

$$P_T = [S/T(1 - e^{-T/k_2})] + \frac{1}{T} \int_0^T [BMR + B(1 - e^{-t/k_1})]dt$$

где  $P_T$  – средняя мощность, поддерживаемая во времени  $T$ , ватт/кг;  $T$  – продолжительность гонки;  $S$  – энергия, получаемая из анаэробных источников энергии для  $T$ , джоулей/кг;  $k_1$  – временная константа кинетики аэробного метаболизма с начала физической нагрузки, 30 сек;  $k_2$  – временная константа кинетики анаэробного метаболизма с начала физической нагрузки, 20 сек;  $BMR$  – базальный метаболический уровень, ватт/кг;  $B$  – разница между максимальной аэробной мощностью и базальным метаболическим уровнем, ватт/кг.

Обработка данных мировых рекордов в беговых дисциплинах легкой атлетики с помощью методов математического моделирования позволила выявить следующий вклад анаэробного и аэробного метаболизма для каждой из дисциплин (см. таблица 6). Таблица ценна и сама по себе, как источник информации о вкладе различных систем энергообеспечения на разных дистанциях. Для тренера наличие подобной информации означает правильно расставленные приоритеты в подготовке. Однако и разработанная методика

математического моделирования позволяет предпринять самостоятельные исследования энергетических детерминантов в разных видах спорта.

Таблица 6

Анализ мужских мировых рекордов по легкой атлетике по состоянию на 1987 год (Peronnet and Thibault, 1989)

D, m	$T_{act}$ (sexagesimal)*	$T_{est}$ (sexagesimal)	$T_{err}$ , %	$P_{O_2}$ , W/kg	$P_{est}$ , W/kg	$P_{max}$		$P_{max}$		$P_{CT}$	
						W/kg	% $P_{max}$	W/kg	% $P_{max}$	W/kg	%MAP
60	6.41	6.33	-1.31	73.09	75.02	71.06	94.7	3.96	5.3	6.51	22.4
100	9.83	9.95	1.26	72.33	70.67	65.30	92.4	5.37	7.6	9.08	31.2
200	19.75	19.75	0.00	61.34	61.34	52.67	85.9	8.67	14.1	14.66	50.4
400	44.10	43.83	-0.62	47.61	48.04	33.60	69.9	14.44	30.1	22.62	77.8
800	1:41.73	1:42.81	1.05	37.76	37.26	16.03	43.0	21.23	57.0	28.18	96.9
1,000	2:12.18	2:13.39	0.89	35.12	35.32	12.42	35.2	22.90	64.8	28.76	98.9
1,500	3:29.46	3:29.96	0.22	33.10	33.01	7.90	23.9	25.12	76.1	29.06	99.9
1,609	3:46.32	3:46.72	0.16	32.79	32.73	7.31	22.3	25.41	77.7	29.07	100.0
2,000	4:50.81	4:46.67	-1.45	31.41	31.97	5.78	18.1	26.18	81.9	29.08	100.0
3,000	7:32.10	7:21.89	-2.28	30.01	30.84	3.71	12.0	27.13	88.0	29.00	99.7
5,000	12:58.39	12:57.41	-0.15	28.82	28.87	1.83	6.3	27.05	93.7	28.07	96.5
10,000	27:13.81	27:22.68	0.53	27.23	27.06	0.69	2.5	26.38	97.5	26.84	92.3
20,994	1:00:00.00	1:00:17.04	0.47	25.70	25.57	0.23	0.9	25.34	99.1	25.53	87.8
21,100	1:00:55.00	1:00:45.78	-0.26	25.48	25.55	0.23	0.9	25.33	99.1	25.52	87.7
30,000	1:29:18.80	1:28:24.94	-1.01	24.62	24.90	0.13	0.5	24.77	99.5	24.90	85.6
42,195	2:07:12.00	2:07:12.24	0.01	24.28	24.28	0.07	0.3	24.21	99.7	24.30	83.5

#### 4. Рекомендации по использованию информации, полученной в ходе математического моделирования, для оптимизации программ спортивной подготовки

Развитие подходов к математической обработке тренировочных и соревновательных данных, а также разработки в области математического моделирования позволяют оптимизировать тренировочные программы за счет нескольких направлений. Прежде всего, наилучшие возможности дает математическое моделирование для разработки программы интервальных тренировок.

В работе (Morton and Billat, 2004) был предложен подход по использованию моделей критической мощности (скорости) для разработки программ интервальных тренировок. В данном исследовании было сделано допущение, что расходование анаэробной емкости ( $n(P_w - \beta)t_w$ ) и ее восстановление ( $n(\beta - P_r)t_r$ ) происходит линейным образом. Символы, используемые в данных формулах имеют следующее значение:  $n$  – число повторов,  $P_w$  – мощность, соответствующая нагрузочному интервалу,  $\beta$  – критическая мощность,  $t_w$  – время выполнения одного нагрузочного интервала,  $P_r$  – мощность педалирования во время восстановления (может быть равна и нулю),  $t_r$  – время восстановительного интервала.

При этом должны быть выполнены следующие условия (Morton and Billat, 2004):

$$0 \leq P_r < \beta < P_w < \beta + \alpha/t_w$$

$$(\beta - P_r)t_r < (P_w - \beta)t_w$$

Последнее условие важно, так как восстановление анаэробной емкости не может превзойти ее расход. С точки зрения долгосрочной адаптации выполнение тренировочной программы, приводящей в стрессовое состояние буферные системы организма, может привести к росту анаэробной емкости (Bishop et al., 2004; Sporis et al., 2008; Weston et al., 1996). Однако в рамках отдельной интервальной тренировки подобное допущение представляется вполне уместным. Эквивалентно последняя формула может быть записана следующим образом:

$$(P_w t_w + P_r t_r) / (t_w + t_r) > \beta$$

Анаэробная емкость ( $\alpha$ ), остающаяся на начало последнего интервала, может быть выражена следующим выражением (Morton and Billat, 2004):

$$\alpha - n[(P_w - \beta)t_w - (\beta - P_r)t_r]$$

Соответственно общее время интервальной тренировки будет выражено следующим выражением:

$$t = n(t_w + t_r) + \frac{\alpha - n[(P_w - \beta)t_w - (\beta - P_r)t_r]}{P_w - \beta}$$

Графически данные математические зависимости выглядят следующим образом (см. рисунок 8).

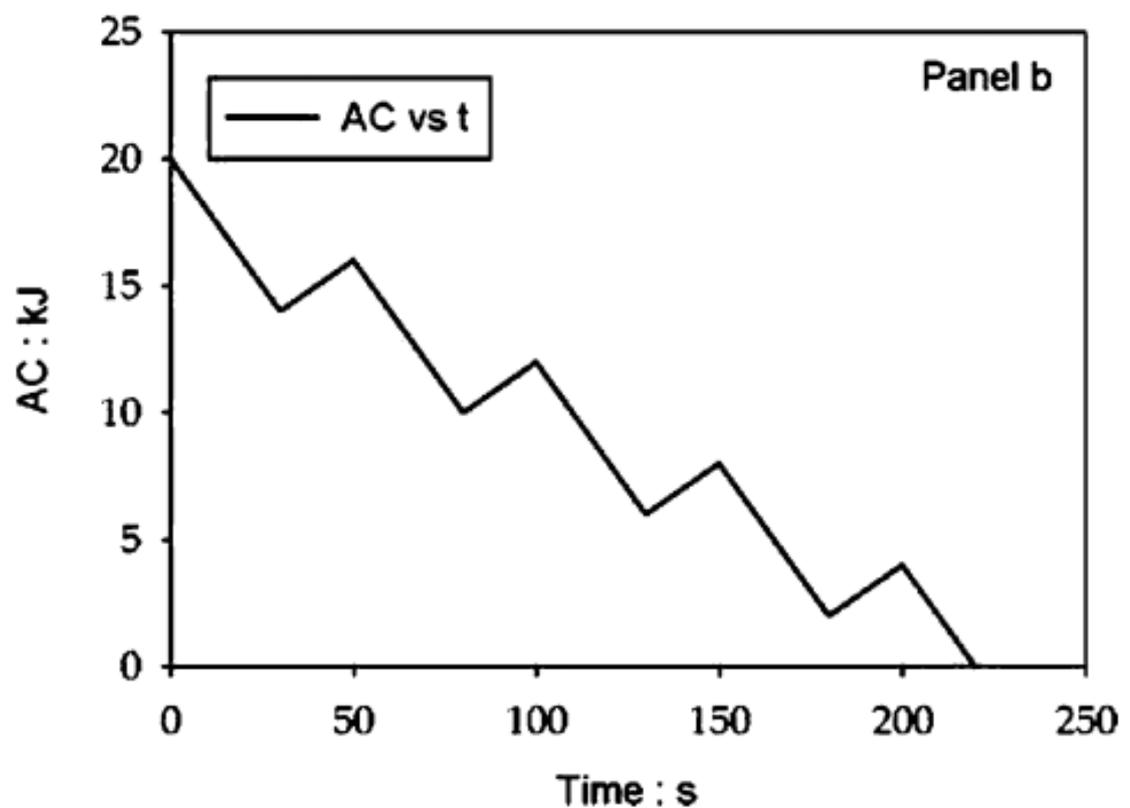
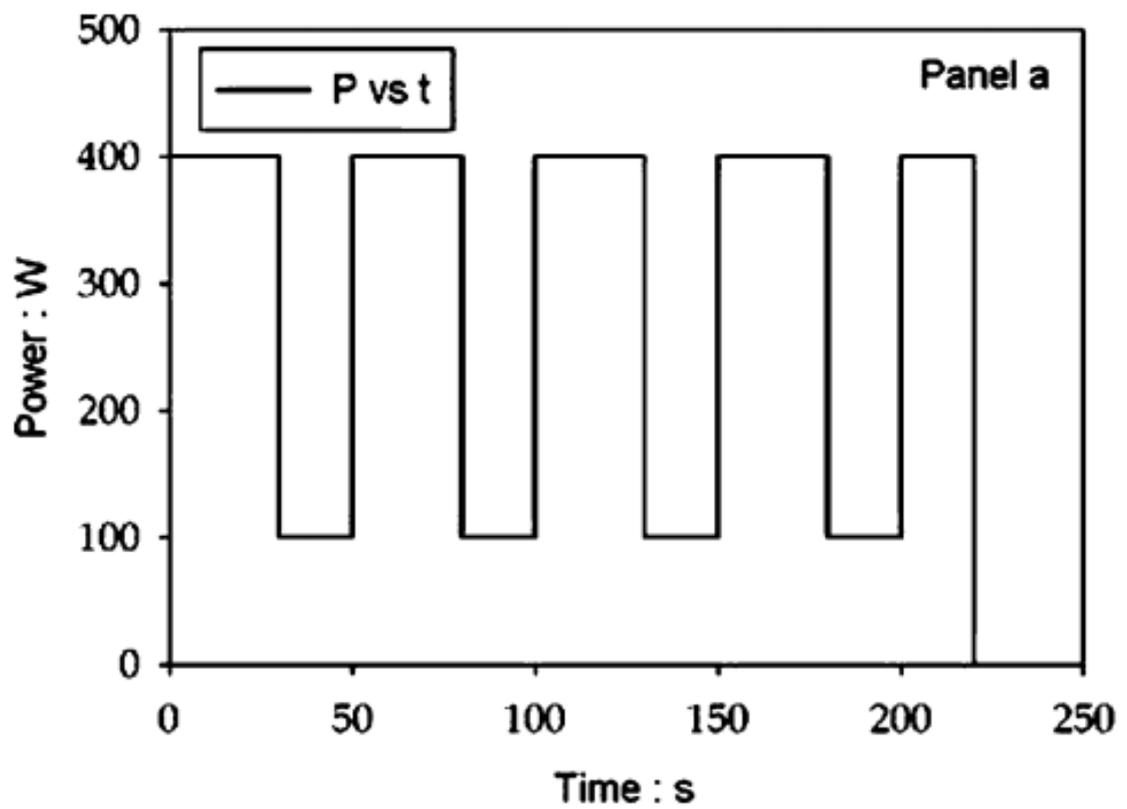


Рисунок 8 – Мощность выполнения физической нагрузки (верхний график) и запас анаэробной емкости (нижний график) во время выполнения интервальной тренировки (Morton and Billat, 2004)

Следует заметить, что ключевую формулу можно преобразовать таким образом, что совокупное время интервальной тренировки ( $t$ ) не будет фигурировать в качестве аргумента функции (Morton and Billat, 2004):

$$\begin{aligned}
 t &= n(t_w + t_r) + \frac{\alpha - n[(P_w - \beta)t_w - (\beta - P_r)t_r]}{P_w - \beta} \\
 &= \frac{n(P_w - \beta)t_w + n(P_w - \beta)t_r + \alpha - n(P_w - \beta)t_w + n(\beta - P_r)t_r}{P_w - \beta} \\
 &= \frac{\alpha + n(P_w - P_r)t_r}{P_w - \beta}
 \end{aligned}$$

В случае, когда мощность выполнения нагрузочного и восстановительного интервала совпадают ( $P_w = P_r$ ) или же время отдыха отсутствует ( $t_r = 0$ ), т.е. тренировка из интервального протокола преобразуется в равномерную, мы получаем формулу классической модели критической мощности:

$$t = \frac{\alpha}{P_w - \beta}$$

При этом общее время выполнения интервальной тренировки оказывается связано с другими параметрами тренировочного занятия (см. рисунок 9). Для построения этих графиков исследователи исходили из допущения о том, что одна из исследуемых величин является переменной, а остальные численные характеристики интервальной программы являются параметрами. Полученные графики показательны с точки зрения логики построения интервальных тренировок, в частности на рисунке можно увидеть асимптоты (asymptote), к которым стремятся графики функций.

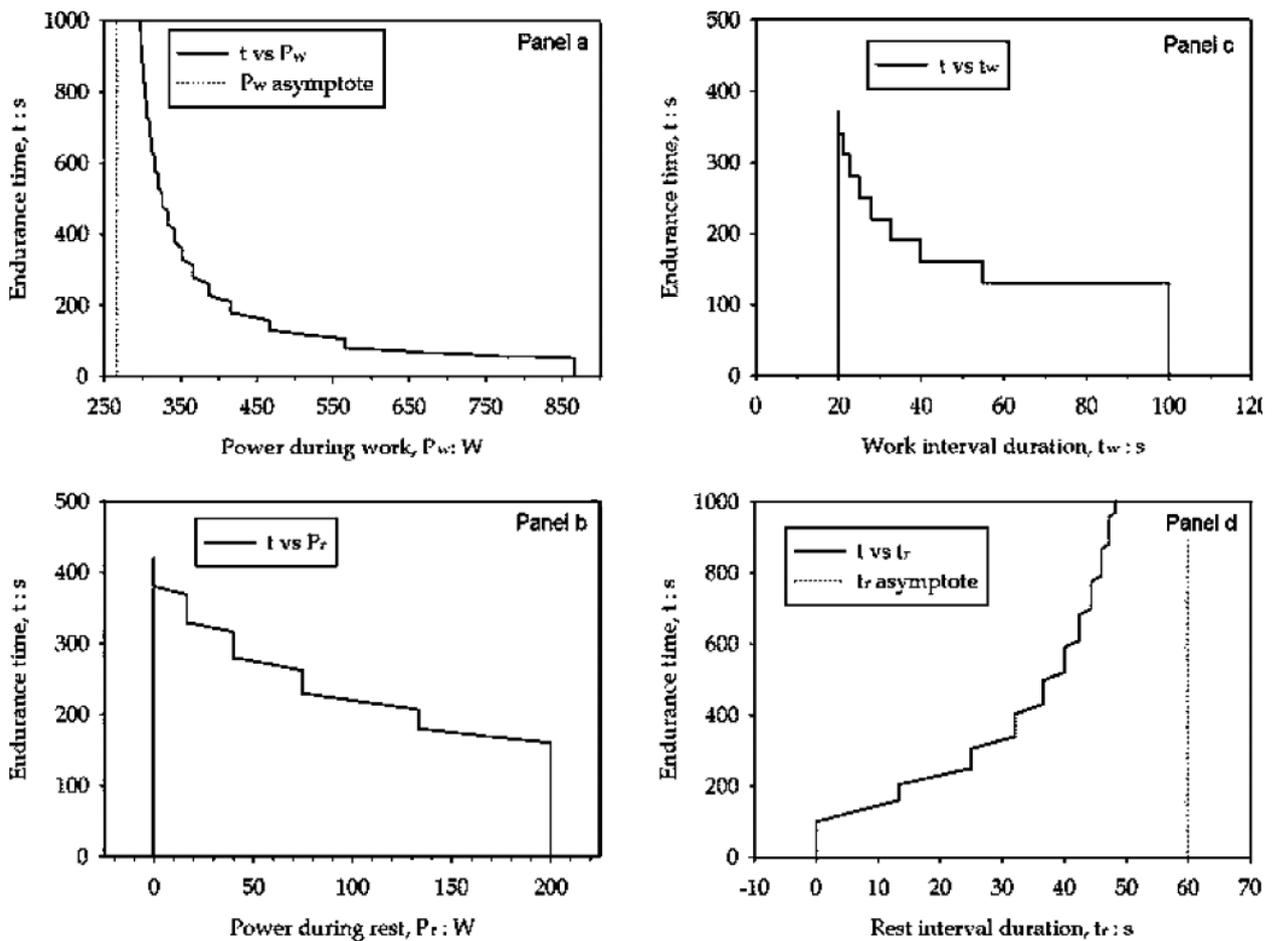


Рисунок 9 – Время выполнения нагрузки на выносливость как функции от мощности во время нагрузочного интервала (а), времени нагрузочного интервала (б), мощности восстановительного интервала (с), времени интервала отдыха (д) (Morton and Billat, 2004)

Использование интервальной тренировки со скоростью (мощностью) выше критической запускает расходование ограниченного запаса анаэробной емкости, выраженного в джоулях или же в метрах (в зависимости от вида спорта и метода тестирования). Чем выше величина превышения, тем выше тем расходования данного запаса. Геометрически расходование анаэробной емкости выражается как площадь прямоугольника, одна сторона которого является разница между фактической скоростью (мощностью) нагрузочного интервала ( $P_w - CP$ ), а вторая сторона – время интервала ( $t_w$ ), см. рисунок 10.

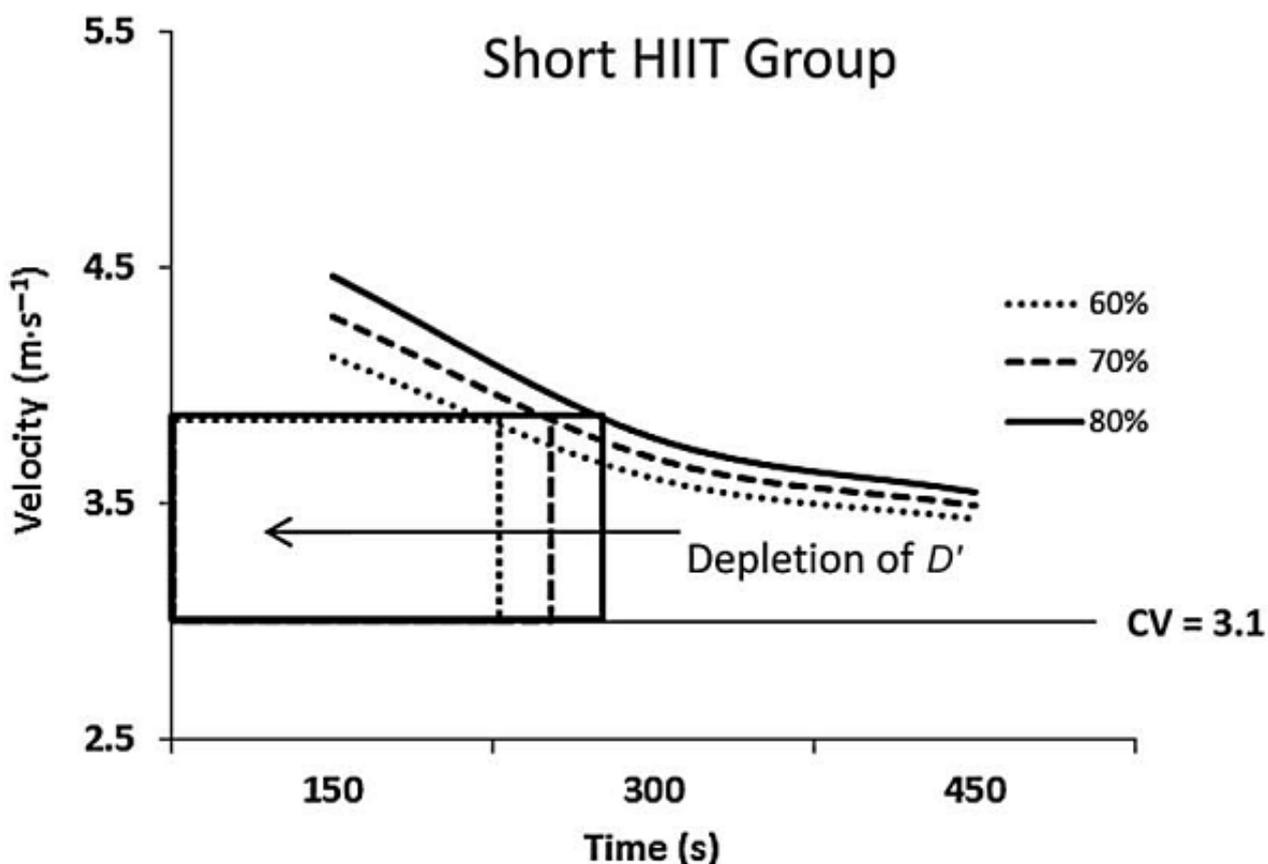


Рисунок 10 – Моделируемая кривая скорость-время (*velocity-time*) для субъекта, выполняющего высокоинтенсивную тренировку с длительными интервалами, а также графическая иллюстрация истощения анаэробной емкости (*Depletion of  $D'$* ) (Clark et al., 2013)

На сегодня использование моделей критической скорости (мощности) позволяет существенно упростить разработку программ интервальных тренировок. В частности, использование модели критической скорости (мощности) из двух компонентов позволяет вычислить значение одной из переменных при заданных значениях остальных переменных, описывающих тренировочный протокол.

1. Число повторений ( $n$ ).
2. Скорость (мощность) рабочего интервала ( $S_w$ ).
3. Скорость (мощность) отдыха ( $S_r$ ).
4. Период отдыха ( $t_r$ ).
5. Время выполнения высокоинтенсивной нагрузки ( $t_w$ ).

Можно представить обобщение указанных выше формул на случай сложной интервальной программы. Ведь далеко не всегда в тренировочных протоколах присутствуют высокоинтенсивные тренировки, в которых сохраняются неизменными величины рабочей скорости, скорости восстановительного интервала, время отдыха и время нагрузки. Кроме того, даже интервалы одинаковой интенсивности и продолжительности могут быть объединены в серии. И в данных случаях, отражающих реальную практику ведущих спортсменов, указанные выше формулы не могут быть использованы для расчетов (без соответствующей модификации).

Например, известный американский тренер Джек Даниелс предлагает такие протоколы интервальных тренировок для спортсменов, осуществляющих подготовку к бегу на длинные дистанции (Daniels, 2005):

- 1) Сеты 2 раза по 1000 м или 2 раза по 1 миле со скоростью  $T$  и отдыхом в 1 минуту + 4 раза по 200 м со скоростью  $R$  через 200 метров трусцы.
- 2) 2 раза по 600 м со скоростью  $(R+3)$  секунды через 600 минут трусцы + 3 раза по 400 м со скоростью  $R$  через 400 м трусцы + 4 раза по 300 м со скоростью  $R-1$  секунд через 300 м трусцы + 6 раз по 200 м со скоростью  $F$  через 200 м трусцы.
- 3) 2-3 серии: 1 раз 800 м с  $R$  скоростью через 800 м трусцы + 2 раза по 400 м со скоростью  $R$  через 400 м трусцы + 4 раза по 200 м со скоростью  $R$  через 200 м трусцы.

Используемые буквенные обозначения ( $R$ ,  $T$ ,  $F$ ) обозначают различные зоны интенсивности, выявляемые в результате специального тестирования или же обработки данных соревновательной практики спортсмена.

$$t = \sum_{j=1}^T (t_w + t_r) + \frac{D' - \sum_{j=1}^T (t_{wj} (S_{wj} - S_c)) - \sum_{j=1}^T (t_{rj} (S_c - S_{rj}))}{S_w - S_c}$$

Использование указанной формулы позволяет осуществлять детальные расчеты для сколь угодно сложных протоколов интервальных тренировок с разными продолжительностями и интенсивностями как нагрузочных интервалов, так и восстановительных, а также объединение набора интервалов в серии.

В анализируемых выше моделях присутствует один недостаток. Предполагается, что восстановление анаэробной емкости происходит линейным образом. Однако данное допущение не соответствует действительности (Ferguson et al., 2010). И в работе (Skiba et al., 2012) был предложен подход, который использует идею нелинейной динамики анаэробной емкости во время восстановления:

$$W'_{\text{bal}} = W' - \int_0^t (W'_{\text{exp}}) (e^{-(t-u) / \tau_{W'}})$$

где  $W'$  - равно анаэробной мощности спортсмена, измеренной ранее по той или иной методике;  $W'_{\text{exp}}$  - величина анаэробной емкости, которая пополняется в ходе выполнения высокоинтенсивной тренировки за счет восстановительных интервалов;  $t - u$  равняется времени в секундах между отдельными сегментами тренировочного занятия, приводящих к истощению запаса анаэробной энергии;  $\tau_{W'}$  - это временной параметр, отражающий процессы восстановления анаэробной энергии. Другими словами, величина анаэробной емкости остается в любой момент времени  $t$  равной разнице между полученной в результате тестов величины  $W'$  и общей суммой джоулей  $W'_{\text{exp}}$ , полученной за время тренировочного занятия  $t$ . Каждый джоуль, восстановленный в ходе пауз отдыха «перезаряжается» экспоненциальным образом во время восстановления.  $W'_{\text{bal}}$  достигает нулевого значения в случае полного истощения.

В случае нелинейного протекания процессов восстановления несколько видоизменится и график интервальной тренировки (см. рисунок 11).

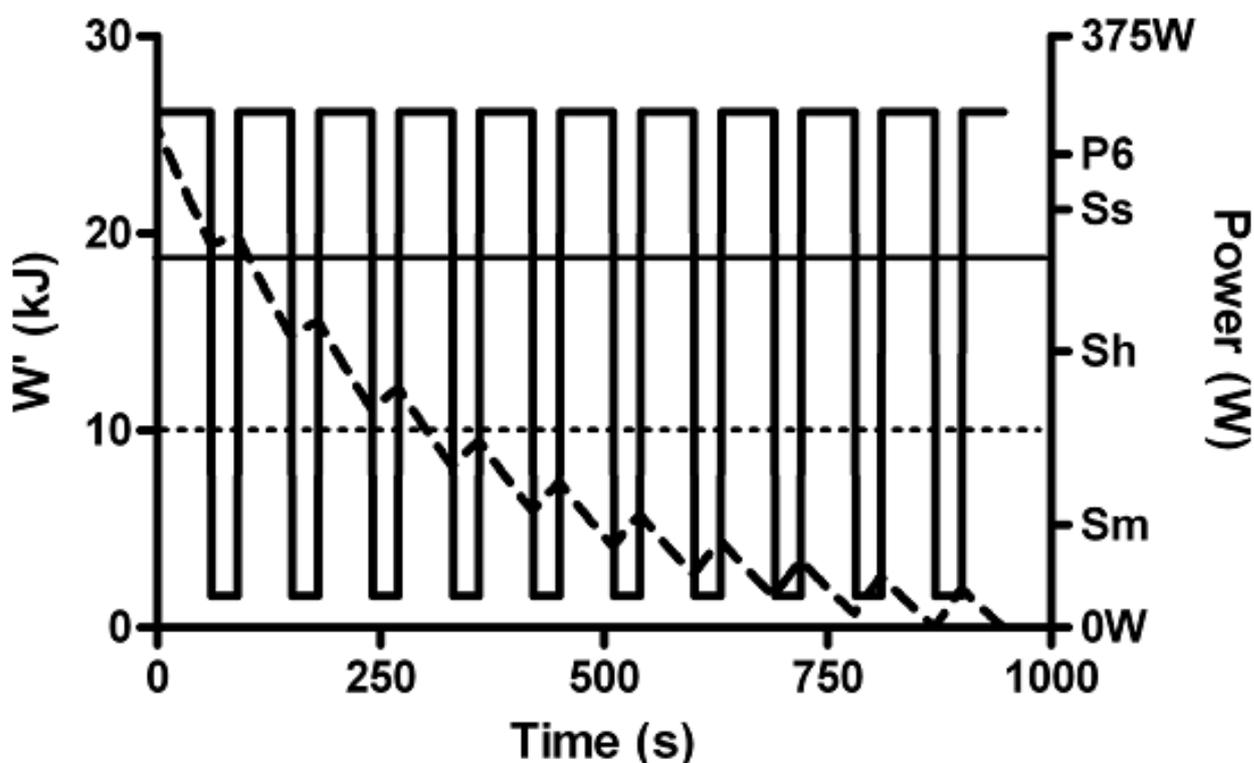


Рисунок 11 – Нелинейная модель динамики анаэробной емкости во время выполнения высокоинтенсивной интервальной тренировки (Skiba et al., 2012), Power – мощность, W' – анаэробная мощность, измеренная в килоджоулях, time – время тренировки в секундах

Однако для оценок параметров данной модели уже недостаточно использовать лишь основные параметры модели критической мощности (скорости). Необходимо выполнение протоколов интервальных тренировок, приводящих к истощению спортсмена и отказу от продолжения тренировки. В работе (Skiba et al., 2012) для этих целей использовались 60 секундные нагрузочные интервалы, выполняемые с интенсивностью, которая вычислялась по следующей процедуре. Из формулы основной модели критической мощности с двумя параметрами:  $T = W' / (P_w - CP)$  вычислялась мощность, соответствующая времени истощения в 6 минут ( $P_6$ ). К данной мощности добавлялась величина в 50% от разницы между  $P_6$  и критической

мощностью спортсмена. Восстановительные интервалы были 30 секундной продолжительностью и протекали в четырех тестах с одной из 4-х описанных ниже интенсивностей (Skiba et al., 2012):

- 1) 20 W ( $S_{20}$ );
- 2) мощность, соответствующая 90% от вентиляционного порога ( $S_m$ );
- 3) мощность, соответствующая мощности вентиляционного порога + 50% разницы между вентиляционным порогом и критической мощностью ( $S_H$ );
- 4) мощностью, равная  $P_6$  – 50% от разницы между критической мощностью и  $P_6$  ( $S_s$ ).

Проведенные четыре интервальные тестовые тренировки дали возможность рассчитать временные коэффициенты  $\tau$ . Данные коэффициенты были отложены на графике с разницей между критической мощностью и мощностью восстановительных интервалов,  $D_{cp}$  (см. рисунок 12). Индивидуальные значения коэффициентов представлены специальными символами:  $S_{20}$  – треугольники,  $S_m$  – кружки,  $S_H$  – ромбики.

Данные зависимости были аппроксимированы методами нелинейной регрессии к виду  $y = ae^{(-kx)} + b$ . Специфическая формула для обработанных данных приняла вид:

$$\tau_W = 546e^{(-0.01D_{cp})} + 316$$

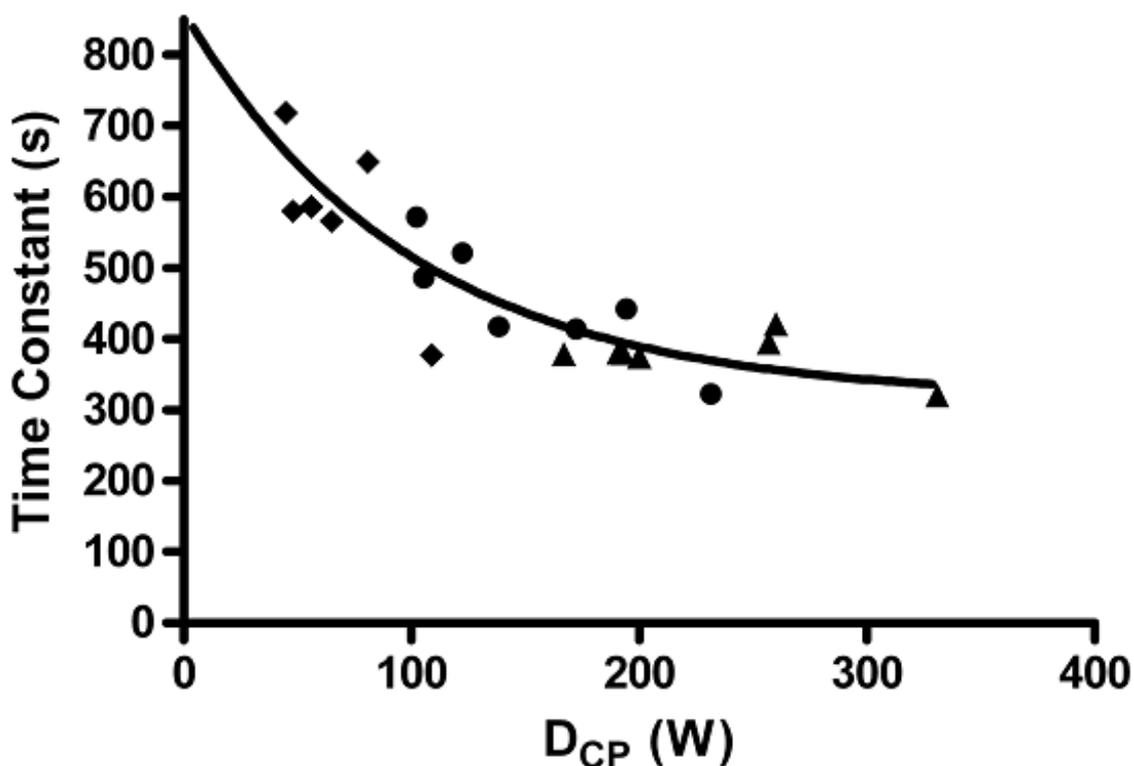


Рисунок 12 – Графическое отображение временных констант, иллюстрирующих время восстановления анаэробной емкости ( $\tau$ ) как функции от  $D_{CP}$  (Skiba et al., 2012)

Для использования данного подхода требуется проведение нескольких интервальных тренировок до достижения истощения, однако полученные в работе (Skiba et al., 2012) коэффициенты можно использовать как приближение для разработки программ интервальных тренировок спортсмена с отдыхом в паузах или низкой интенсивности. В частности, для интенсивности отдыха режима  $S_{20}$  значения временных констант лежат 370-380 секунд, что хорошо соотносится с другими исследованиями (Ferguson et al., 2010). Временные коэффициенты  $S_m$  и  $S_H$  продемонстрировали большую вариативность между субъектами, поэтому данные параметры нужно получать в ходе индивидуальных тестов и обрабатывать математическими методами. Наконец, для режима  $S_s$  временные коэффициенты были настолько велики, что подтвердили идею о том, что выполнения «отдыха» с

очень высокой интенсивностью не способствует восстановлению анаэробной емкости.

Фактически данный подход к математическому моделированию физиологических процессов в организме спортсмена при нагрузке с высокой интенсивностью связывает идеи критической мощности/анаэробной емкости и так называемого медленного компонента кинетики потребления кислорода (Berger and Jones, 2007; Billat et al., 1998; Borrani et al., 2001; Buchheit et al., 2012; Burnley and Jones, 2007; Cannon et al., 2011; Carter et al., 2002; Chidnok et al., 2012; Grassi et al., 2011; Jones et al., 2011; Jones and Poole, 2005; Murgatroyd et al., 2011; Poole and Jones, 2011; Xu and Rhodes, 1999; Zoladz et al., 2008). Взаимосвязь носит не только абсолютный характер, но и *временной*. Т.е. характер разворачивания данных процессов во времени носит сходный характер.

Наконец, величина анаэробной емкости может быть использована и для расчетов продолжительности интервальных работ. Такой подход был предложен в исследовании (Clark et al., 2013):

$$V_t = [(D' \times 0.8) / t_{\text{LIM}}] + CV,$$

$$\text{Int}_t = [D - (D' \times 0.8)] / CV,$$

$$\text{Int}_t = (D' \times 0.8) / (V - CV),$$

где  $V_t$  – скорость интервала,  $D'$  - анаэробная емкость,  $D$  – дистанция,  $CV$  – критическая скорость. Например, скорость бега спортсменки на дистанции 1000 м составила 4,16 м/с, а время 241 с. Если спортсменка пробежит дистанцию 800 м с аналогичной скоростью 4,16 м/с, то она выработает 80% запаса анаэробной емкости за 193 секунды (вторая формула выше). Либо спортсменка может выбрать 80% от скорости 4,16 м/с (это составит 3,1 м/с),

и тогда она сможет преодолеть дистанцию 1000 м со сходным 80% истощением анаэробной емкости.

Помимо использования концепции критической скорости для расчета параметров интервальных тренировок, перспективны также работы, которые используют модельные расчеты для оценки различных вариантов тактической раскладки сил по дистанции. Идея используется та же: превышение фактической скорости над скоростью критической приводит к истощению анаэробной емкости. Скорость истощения будет тем выше, чем выше величина превышения фактической скорости над критической.

Данная идея может быть проиллюстрирована графиком бега спортсменки на дистанции 3000 м (результат 9.41,10) в манеже (см. таблица 7).

Из таблицы мы видим, что разная скорость бега приводит к разному темпу истощения ограниченного запаса анаэробной емкости. В конце дистанции финишное ускорения привело к полному истощению анаэробной емкости (отрицательное значение – 1,4 метра свидетельствует о некоторых погрешностях в измерениях анаэробной емкости по предыдущим результатам соревнований). Полное истощение анаэробной емкости к последнему метру дистанции свидетельствует о эффективной тактической раскладке сил.

Пример тактической раскладки бега на 3000 м, обработанный с использованием моделей критической скорости

Номер круга	Время круга, с	Скорость, м/с	Расход анаэробной емкости, м	Остаток анаэробной емкости в конце круга, м
0				119,1
1	37,8	5,3	12,6	106,5
2	36,8	5,4	17,6	89,0
3	37,4	5,3	14,6	74,4
4	38,3	5,2	10,1	64,3
5	39,0	5,1	6,7	57,6
6	39,1	5,1	6,2	51,5
7	39,1	5,1	6,2	45,3
8	39,9	5,0	2,2	43,1
9	39,2	5,1	5,7	37,4
10	39,3	5,1	5,2	32,3
11	39,9	5,0	2,2	30,1
12	40,0	5,0	1,7	28,4
13	39,3	5,1	5,2	23,2
14	39,7	5,0	3,2	20,0
15	36,0	5,6	21,5	-1,5

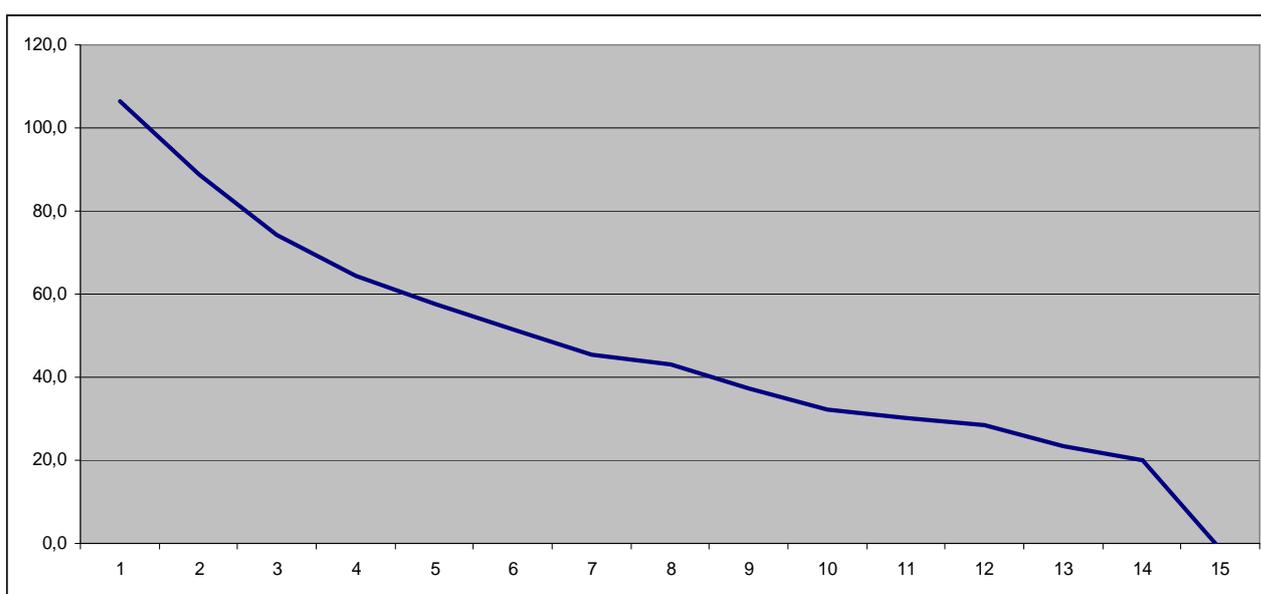


Рисунок 13 – График расхода анаэробной емкости во время

соревновательного бега на дистанции на 3000 м, который привел к полному  
исчерпанию анаэробной емкости к концу дистанции

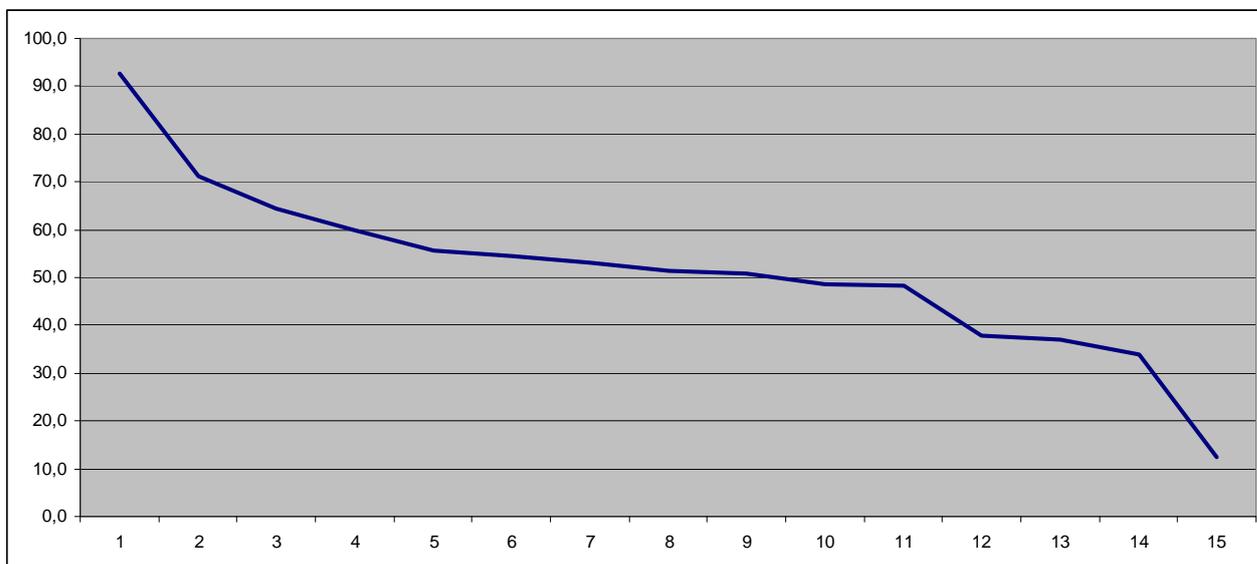


Рисунок 14 – График тактической раскладки бега на дистанции 3000 м,  
которая не привела к исчерпанию расхода анаэробной емкости к концу  
дистанции

Более того, проанализированная выше работа (Skiba et al., 2012) дает математический аппарат, который позволяет проектировать системы он-лайн мониторинга тренировочных и соревновательных нагрузок (Brzostowski et al., 2013; Cheng et al., 2008). Сочетания данных математических моделей и использование датчиков мощности (или GPS-устройств – зависит от вида спорта) дает возможность тренеру осуществлять мониторинг гонки он-лайн и давать оперативные советы спортсмену по моментам, где целесообразно начать атаку противников или же финишное ускорения (в видах спорта, где допускается взаимодействие спортсмена и тренера). Пример данного он-лайн мониторинга расхода мощности см. на рисунке 15 и 16.

## W' Balance and Power Output

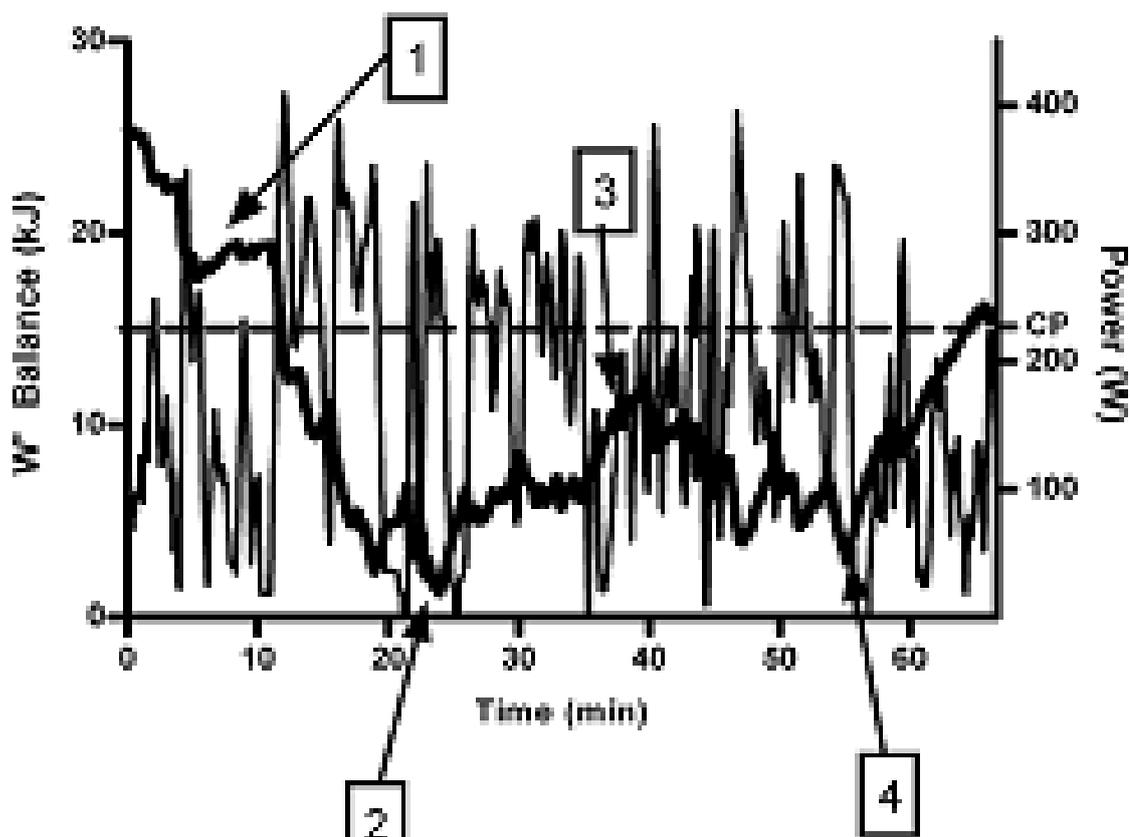


Рисунок 15 – Практическое использование модели критической мощности для спортсмена, представителя шоссейных велогонок (Skiba et al., 2012)

На рисунке 16 представлен пример использования модели критической мощности для оперативного анализа происходящих событий в гонке. Сплошная линия отображает расход анаэробной емкости спортсменом в процессе гонки (она восстанавливается в связи с тем, что часть гонки спортсмен преодолевает под спуск или же с интенсивностью, ниже, чем критическая мощность CP), тонкая линия отображает фактическую мощность передвижения спортсмена. Числа на графике идентифицируют определенные тактические ситуации:

1. Спортсмен занимает позицию в группе пелотоне.
2. Спортсмен атакует, но слишком истощает запасы анаэробной емкости и вынужден восстанавливать ее.
3. Спортсмен атакует снова.

4. Спортсмен снова истощил свои запасы анаэробной емкости и вынужден отказаться от борьбы за победу после того, как лидирующая группа предприняла успешную попытку создать отрыв.

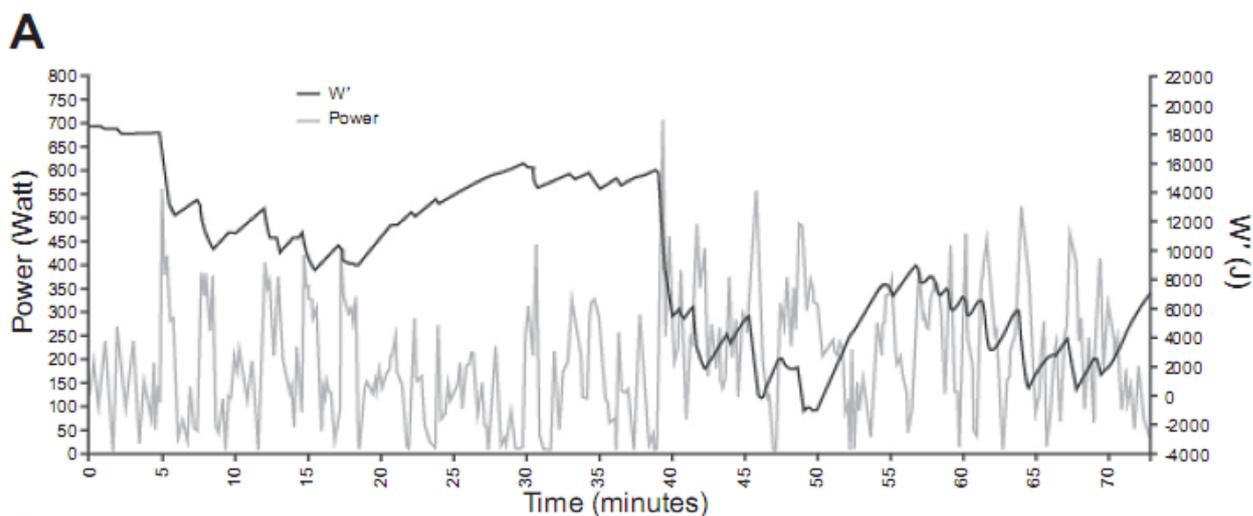


Рисунок 17 – Практическое использование модели критической скорости (Clarke and Skiba, 2013), жирная линия отражает расход/восстановление анаэробной емкости ( $W'$ ), а тонкая линия фактическую мощность ( $power$ )

Суммарно моделируемые явления можно описать для тренера следующим образом. Прежде всего, анаэробная емкость отражает рекрутирование особой группы скелетных мышц, т.е. пул волокон типа II. При этом (Skiba et al., 2012):

1. Истощение анаэробной емкости начинается в момент, когда интенсивность выполняемой нагрузки превосходит интенсивность, соответствующую критической скорости (мощности). Некоторый запас анаэробной емкости ассоциируется как с волокнами типа I, так и волокнами типа II, которые активируются одновременно.
2. Пропорции в механизме, который отвечают за восстановление анаэробной емкости, также различны для каждого пула волокон.

3. Существует и абсолютное различие во вкладе каждого из компонентов в разворачивание процессов истощения (восстановления) анаэробной емкости.
4. Сумма  $W'$  от компонентов I и II и равняется известной величине  $W'$ , которая получается в результате тестов в рамках подхода критической мощности (скорости).

Следовательно, в общем случае следует использовать такую формулу (Skiba et al., 2012):

$$W'_{\text{bal}} = W' - \int_0^t \left( k_1 e^{-(t-u)/\tau_1} + k_2 e^{-(t-u)/\tau_2} \right) w(u) du$$

где  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $\tau_1$ ,  $\tau_2$  – абсолютные коэффициенты и временные параметры, отображающие динамические процессы с анаэробной емкостью в каждом из двух компонентов.

Однако подбор параметров для этой более сложной и точной модели требует использования биопсии в отличие от формул, описанных выше, которые могут быть использованы лишь с привлечением неинвазивных методов. Тем не менее, использование данного подхода оправдано для высокотренированных спортсменов, у которых кинетика потребления кислорода существенно отличается от нетренированных людей.

Итак, методы критической скорости (мощности) перспективны для анализа тактического распределения сил в гонках на выносливость. Однако для дистанций, длительность соревновательного прохождения которых меньше 2 минут, модели данного класса работают не самым удовлетворительным образом. По всей видимости, это связано с тем, что в моделях критической скорости (мощности) анаэробная емкость описывается одним числом. Для большинства дистанций, где вклад анаэробной энергии не велик, такого приближения достаточно для высокого качества моделирования. Между тем, как мы видели, анаэробная емкость является комплексной характеристикой, и для более короткой дистанции требуются более проработанные концепции производства энергии.

Для подобных дистанций с высоким вкладом анаэробной энергии целесообразно использование моделей несколько иного типа. Проанализируем практически значимые разработки в этом направлении.

Математическая постановка задач тактического распределения сил была осуществлена достаточно давно, в 70-е годы (Keller, 1973, 1974):

$$\frac{dv}{dt} + \frac{v}{\tau} = f(t),$$

где  $v$  – это скорость бегуна как функция времени  $t$ ,  $\tau$  – это константа, которая характеризует сопротивление бегу, которое предполагается пропорциональным скорости бега, и  $f(t)$  – это пропульсивная сила на килограмм, ограниченная максимальной пропульсивной силой спортсмена  $F$ . Эмпирический материал позволил сформулировать зависимость между пропульсивной силой и расходом энергии:

$$\frac{dE}{dt} = \sigma - fv,$$

где  $E$  – представляет расход энергии спортсменом, с конечной начальной величиной  $E_0$ . Предполагается, что энергия истощается (принимает значение 0) к финишу гонки. Параметры модели находятся путем математической обработки данных по существующим мировым рекордам на 22 дистанциях от 50 ярдов до 10000 м.

В рамках данной модели было обнаружено, что для всех дистанций, меньших, чем 290 метров наилучшей стратегией является использование максимальной пропульсивной силы на протяжении всей дистанции. Для более длинных дистанции предполагается быстрый разгон на протяжении

~2 секунд и поддержание постоянной скорости на протяжении оставшейся гонки.

Данная базовая модель Келлера может быть усовершенствована несколькими способами, каждый из которых имеет практическую ценность с точки зрения выработки рекомендаций для тренеров.

Одна из таких модификаций работает сходным образом с моделями критической скорости и использует идеи гидравлики. Предполагается, что выполнение интенсивной мышечной работы вызывает активацию некоторого фактора  $X$  (который пока не специфицируется в терминах метаболитов и т.п.), который накапливается с темпом  $A(v)$  в процессе забегов на 400 или 800 м, и элиминируется -  $CX(t)$ . Основное допущение заключается в том, что выведение фактора  $X$  происходит пропорционально количеству  $X$ , которое уже накоплено. Динамика этой характеристики может быть описана следующим дифференциальным уравнением (Reardon, 2013):

$$\frac{dX(t)}{dt} = A(v) - CX(t),$$

где  $C$  – константа. Без потери общности можно сделать заключение о том, что в момент начала гонки количество  $X=0$  для  $t=0$ , а в конце дистанции  $X=1$  для  $t=T$ . Теперь разумно сформулировать задачу, при которой дистанция  $d$  будет преодолена за наименьшее время (Reardon, 2013):

$$s = \int_{\text{start}}^{\text{finish}} ds = \int_0^T v(t, X, \dot{X}) dt,$$

где  $v$  – рассматривается как функция  $X$ , а  $\dot{X} = \partial X / \partial t$  из предшествующей формулы. Используя уравнения Эйлера-Лагранжа:

$$\frac{\partial v}{\partial X} = \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial v}{\partial \dot{X}} \right)$$

поскольку  $X$  и  $\dot{X}$  связаны зависимостью  $\dot{X} + CX \equiv y$ , то можно записать следующую формулу:

$$C \frac{dv}{dy} = \frac{d}{dt} \frac{dv}{dy},$$

и проинтегрировав, получим:

$$\frac{dv}{dy} = ke^{Ct}, \tag{1}$$

где  $k$  – это константа интегрирования. Обозначим  $y=A(v)$  и умножим базовую формулу модели на  $e^{Ct}$ . Проинтегрировав от 0 до  $T$ , получим:

$$X(T)e^{CT} - X(0) = e^{CT} = \int_0^T A\{v(t;k)\}e^{Ct} dt. \tag{2}$$

Модель X-фактора не пытается смоделировать в деталях физиологических процессы, происходящие в организме спортсмена во время соревновательного бега, а пытается акцентировать внимание на определенной физической аналогии процессов усталости во время соревнований по легкой атлетике.

Если мы специфицируем функцию  $A(v) = A_n v^n$ , где  $n > 0$  и  $A_n$  – свободные параметры, то базовое уравнение модели X-фактора может быть переписано следующим образом:

$$v = \left( \frac{\dot{X} + CX}{A_n} \right)^{1/n} = \left( \frac{y}{A_n} \right)^{1/n}$$

из которой левая часть уравнения (1):

$$\frac{dv}{dy} = \frac{1}{nA_n} \left( \frac{y}{A_n} \right)^{(1-n)/n} = \frac{1}{nA_n} v^{1-n}.$$

Поставим в (1) и найдем оптимальную  $v$ :

$$v = (nA_n k)^{1/(1-n)} e^{-Ct/(n-1)}.$$

Найдем  $k$  из формулы (2):

$$v = \left\{ \frac{C e^{CT}}{A_n(n-1)[1 - e^{-CT/(n-1)}]} \right\}^{1/n} e^{-Ct/(n-1)}$$

$$X(t) = \frac{e^{CT}}{1 - e^{-CT/(n-1)}} [e^{-Ct} - e^{-nCt/(n-1)}]$$

Для  $n > 1$  оптимальная скорость монотонно снижается, что приводит к положительным отсечкам. И только для  $n < 1$  оптимальная скорость монотонно возрастает со временем, что приводит к отрицательному графику бега.

Для функции  $A$ , физиологические принципы требуют того, что не только первая производная будет больше нуля, но и вторая. Тогда оптимальная стратегия раскладки сил будет требовать отрицательного графика бега. Если разбить дистанцию на отрезки, то время прохождения

каждого последующего отрезка дистанции будет монотонно расти (а скорость – убывать).

Проанализированные модели были верифицированы для графиков мировых рекордов на 400 и 800 метров (см. рисунок 18). Модель X-фактора и модель энергетического истощения показали свою высокую объясняющую способность для мировых рекордов на этих дистанциях.

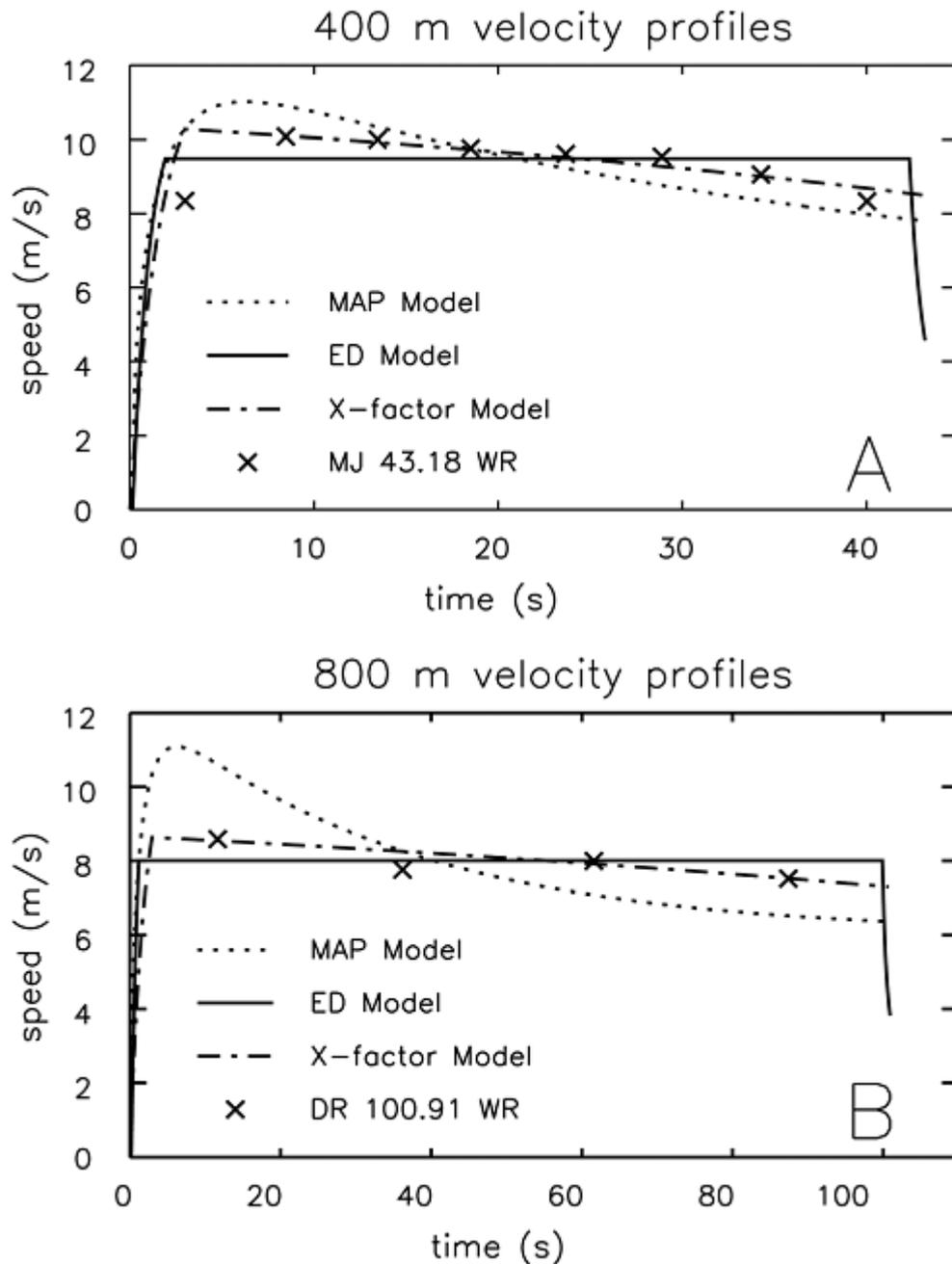


Рисунок 18 – Сравнение расчетов, сделанных в рамках различных математических моделей с графиками мировых рекордов на 400 и 800 м

(Reardon, 2013) Майкла Джонсона – 43,18 с и Давида Рудиши 100,91 с; MAP – модель максимально доступной мощности; ED – модель энергетического истощения; X-factor - модель X-фактора; крестики – график мировых рекордов

В данном разделе были сформулированы практические рекомендации для тренеров, работающих в сфере высшего спортивного мастерства, а также специалистов, осуществляющих комплексное научное и медико-биологическое обслуживание элитных спортсменов по вопросам оптимизации тренировочных программ на основе информации, полученной в ходе математического моделирования. В частности уделено внимание вопросам расчетов тактического распределения сил в напряженных тренировочных и соревновательных занятиях, а также в разработке программ интервальных тренировок.