

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования**

«РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ СПОРТА «ГЦОЛИФК»

На правах рукописи

Козлов Андрей Владимирович

**НЕИНВАЗИВНЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ
ПАРАМЕТРОВ ФИЗИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ ДЛЯ СПОРТСМЕНОВ
ЦИКЛИЧЕСКИХ ВИДОВ СПОРТА**

1.5.5. – Физиология человека и животных

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Научный руководитель –
доктор биологических наук, профессор
Сонькин Валентин Дмитриевич

Москва—2024

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	6
ГЛАВА I. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ	15
1.1. Характеристика физической нагрузки для тестирования и тренировки в циклических видах спорта	
1.1.1. Биоэнергетические параметры работоспособности.....	15
1.1.2. Кислородный запрос и его составляющие.....	17
1.1.3. Режимы предельной нагрузки для определения биоэнергетических параметров работоспособности.....	18
1.1.4. Классификация и характеристики циклической соревновательной нагрузки	19
1.1.5. Основные режимы тренировочной работы в циклических видах спорта.....	21
1.2. Контроль интенсивности физической нагрузки	22
1.2.2. Относительная (метаболическая) мощность упражнения.....	24
1.2.3. Скорость образования вентиляционного запроса	25
1.2.4. Скорость накопления лактата	26
1.3. Контроль интенсивности физической нагрузки с помощью пульсометрических методов.....	27
1.3.1. Скорость образования пульсового запроса.....	27
1.3.2. Интенсивность накопления пульсового долга (ИНПД)	29
1.3.3. «Относительный рабочий прирост ЧСС»	30
1.3.4. «Доза физической нагрузки».....	31
1.3.5. «Метод обобщенных тренировочных зон».....	32
1.3.6. TRIMPs	33
1.4. Контроль интенсивности физической нагрузки с помощью оценки RPE	34
1.4.1. Уровень воспринимаемого напряжения (RPE).....	34
1.4.2. sRPE - сессионный RPE.....	36
1.5. Анаэробный порог.....	36
1.5.1. Основные методы определения АнП с измерением лактата крови.....	37
1.5.1.2. АнП, соответствующий уровню концентрации лактата 4.0 ммол/л.....	38
1.5.1.3. Метод «касательной»	39
1.5.1.4. Метод «Dmax»	40
1.5.2. Основные традиционные неинвазивные методы для определения АнП, распространенные в практике тестирования спортсменов	41
1.5.2.1. Определение АнП по показателям газообмена и легочной вентиляции.....	41
1.5.3. Основные альтернативные неинвазивные методы для определения АнП, применяемые в практике тестирования спортсменов.....	43
1.5.3.1. Определение АнП с помощью измерения ЭМГ- активности.....	43
1.5.3.2. Определение АнП с помощью спектроскопии ближнего инфракрасного диапазона ...	45
1.5.3.3. Методы определения АнП по вариабельности ритма сердца	47
1.5.3.4. Термографический метод определения АнП.....	49
1.5.3.5. Метод определения АнП по динамике ЧСС (метод Конкони)	51
1.5.3.6. Критическая мощность	53
1.5.3.7. Определение АнП с помощью RPE	55

1.6. Заключение по разделу	56
ГЛАВА II. ОРГАНИЗАЦИЯ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ	58
2.1. Организация исследования и общий план проведения экспериментальных исследований ...	58
2.2. Испытуемые	59
2.3. Измерительные методы экспериментальных исследований	60
2.3.1. Антропометрические измерения.....	60
2.3.2. Эргометрические измерения	60
2.3.3. Термографические измерения	61
2.3.4. Методы физиологических измерений	62
2.3.5. Методы биохимических измерений в крови.....	62
2.4. Расчетные и вычислительные методы	63
2.4.1. Эргометрические расчеты	63
2.4.2. Расчеты по данным газообмена, ЧСС и лактата.....	64
2.4.2.1. Определение момента достижения АнП и соответствующих эргометрических и физиологических показателей по данным газообмена и лактата	64
2.4.2.2. Расчеты по параметрам кислородного запроса.....	64
2.4.2.3. Расчеты по параметрам пульсового запроса	66
2.4.2.4. Расчет скорости накопления лактата	69
2.4.3. Статистические методы	69
ГЛАВА III. УДЕЛЬНАЯ ИНТЕНСИВНОСТЬ ФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ ЗАТРАТ И СТРУКТУРА ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОЙ РАБОТЕ РАЗЛИЧНОЙ МОЩНОСТИ	70
3.1. Предпосылки	70
3.2. Результаты исследования.....	71
3.3. Заключение по разделу	90
ГЛАВА IV. НЕИНВАЗИВНЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ АНАЭРОБНОГО ПОРОГА	93
4.1. Предпосылки	93
4.2. Результаты исследования.....	94
4.2.1. Термографический способ определения АнП	94
4.2.2. Графический метод расчета анаэробного порога у спортсменов по динамике ЧСС в работе и восстановительном периоде в тесте с повышением нагрузки до отказа	98
4.3. Заключение по разделу	108
ВЫВОДЫ	110
Практические рекомендации.....	112
Литература	114

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

АнП – анаэробный порог;

АнП-La – анаэробный порог, установленный по динамике концентрации лактата в крови;

АнП-t°C – анаэробный порог, установленный по динамике температуры кожи;

АнП-t_{cr} – анаэробный порог, установленный графическим методом;

АнП-M – анаэробный порог, установленный с помощью эргометрической модели;

АнV_{O2} – вклад анаэробных процессов (%) в энергообеспечении работы, рассчитанный по O₂;

АнV_{чсс} – вклад анаэробных процессов (%) в энергообеспечение работы, рассчитанный по ЧСС;

АэП – аэробный порог;

ВН – объем выполненной внешней физической нагрузки в упражнении, кДж/кг;

ДН_{O2} – доза воздействия физической нагрузки, рассчитанная по потреблению O₂, кДж/кг;

ДН_{чсс} – доза воздействия физической нагрузки рассчитанная по динамике ЧСС, кДж/кг;

ДН_{анO2} – анаэробная часть дозы нагрузки, рассчитанная по потреблению O₂, кДж/кг;

ДН_{анчсс} – анаэробная часть дозы нагрузки, рассчитанная по динамике ЧСС, кДж/кг;

ДК – дыхательный коэффициент, у.е.;

ИНПД – интенсивность накопления пульсового долга (уд/с);

ИУ_{O2} – исходного уровень потребления O₂ в состоянии относительного покоя перед стартом (л/мин);

ИУ_{чсс} – исходного уровень ЧСС в состоянии относительного покоя перед стартом (уд/мин);

КЗ – кислородный запрос упражнения (л);

КП – кислородный приход (л);

КД – кислородный долг (л);

МAM – максимальная анаэробная мощность, Вт;

МПК_{абс} – максимальное потребление кислорода, л/мин;

МПК_{отн} – относительное максимальное потребление кислорода, мл/мин/кг;

НЭ_{O2} – нагрузочная экспозиция в упражнении, рассчитанная по потреблению O₂, мин.;

НЭ_{чсс} – нагрузочная экспозиция в упражнении, рассчитанная по динамике ЧСС, мин.;

НЭ_{анO2} – анаэробная часть нагрузочной экспозиции в упражнении, рассчитанная по O₂, мин.;

$NЭан_{чсс}$ – анаэробная часть нагрузочной экспозиции в упражнении, рассчитанная по ЧСС, мин.;

$максЛа$ – максимальная концентрация лактата в крови, ммоль/л;

$ПЗ$ – пульсовой запрос (уд);

$ПП$ – пульсовой приход (уд);

$ПД$ – пульсовой долг (уд);

$СОПЗ$ – скорость образования пульсового запроса упражнения (уд/мин),

$СОКЗ$ – скорость образования кислородного запроса (л/мин);

$САЛа$ – скорость накопления лактата (ммоль/л/мин);

$УИФЗ_{O_2}$ – удельная интенсивность физиологических затрат, рассчитанная по O_2 (у.е.);

$УИФЗ_{чсс}$ – удельная интенсивность физиологических затрат, рассчитанная по ЧСС (у.е.);

$ЧСС_{макс}$ – максимальная частота сердечных сокращений, уд/мин;

$ЕхсСО_2$ – скорость выделения неметаболического излишка углекислого газа (л/мин);

La – концентрация лактата в крови, ммоль/л;

m – масса тела, кг;

$t_{упр}$ – время работы в упражнении, мин;

V_{max} – максимальная скорость, км/ч;

V_{O_2} – скорость потребления кислорода (л/мин);

V_{CO_2} – скорость выделения углекислого газа (л/мин);

VE – скорость вентиляции (л/мин);

W_{max} – максимальная мощность, достигнутая в тесте, Вт;

W_{cp} – средняя мощность, достигнутая в тесте, Вт;

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследования: Как известно, нагрузки различной мощности вызывают разные по интенсивности и структуре физиологические затраты, что было постулировано В.С. Фарфелем в его концепции «зон относительной мощности» еще в 1939 г и подтверждено результатами многочисленных исследований (Фарфель В.С., 1939; Margaria R., 1976; Viru A., 1995, 1996; Волков Н.И. и др., 2002, 2011; Swanwick E., et al, 2018; Соськин В.Д., Тамбовцева Р.В., 2023). В каждой из этих зон относительной мощности (или в соответствующем временном диапазоне предельной работы) превалирует определенный механизм энергообеспечения. Зона умеренной мощности, является зоной аэробного энергообеспечения. Ее верхняя граница приблизительно соответствует анаэробному порогу (АнП). Зона большой мощности — это зона смешанного энергообеспечения с превалированием аэробного механизма. Ее верхняя граница приблизительно соответствует МПК. В зоне субмаксимальной мощности нагрузка может повышаться исключительно за счет активации анаэробного гликолиза. Ее верхняя граница приблизительно соответствует максимальной мощности гликолитического механизма энергообеспечения. В зоне максимальной мощности преобладает фосфагенное энергообеспечение. Ее верхняя граница является вершиной всего доступного человеку диапазона нагрузок и соответствует так называемой максимальной анаэробной мощности (МAM) (Margaria R., 1976; Spencer, et al., 2001; Gatin, P.V., 2001; Волков Н. И. и др., 2002, 2011; Swanwick E., et al., 2018; Kuijpers, et al, 2020).

Основные режимы тренировочной работы в циклических видах спорта ориентированы либо на максимальную анаэробную мощность (Fox E.L., 1973; Gollnick P., et al., 1973; Olek R.A., et al., 2018; Silva MLD, et al., 2019; Satiroglu R., et al., 2021), либо на мощность истощения (Simonson E., et al., 1942, 1971; Gollnick P., et al., 1973; Costill D.L., 1986; Волков Н.И. др., 2000, 2011; Cicchella A., 2022), либо на критическую мощность

(соответствующую МПК) (Lortie G., et al., 1984; Ekblom B., et al., 1986; Weerapong Chidnok, et al., 2020; James Breese, 2020), либо на анаэробный порог (Ghosh A.K., 2004; Friedmann B., et al., 2004, Skorski S., et al., 2004, Mo S., et al., 2018, Römer C., et al., 2018).

Для проявления у спортсмена специфических эффектов адаптации, эффективная мощность тренировочных упражнений может подбираться на основе интенсивности и структуры физиологических затрат, соответствующих зоне мощности, в которой проходит соревновательная нагрузка (Волков Н.И., и др., 2011; Swanwick E., et al., 2018; Kenney, W. L., et al., 2019; William McArdle, et al., 2022).

Методы определения физиологической интенсивности нагрузки по скорости потребления кислорода и ЧСС человека информативны в первых двух зонах нагрузки — умеренной и большой мощности, т. к. в этих зонах соответствующие характеристики изменяются пропорционально мощности работы. Но это всего лишь около 30% от всего диапазона нагрузок. Верхние границы зон умеренной и большой мощности имеют четкие эргометрические и физиологические ориентиры – АНП и МПК. Верхние границы зон субмаксимальной и максимальной мощности не имеют однозначных физиологических индикаторов — только эргометрические.

Между тем, в этих зонах спортсмены выполняют значительный объем тренировочной и соревновательной работы. При этом, скорость или мощность упражнения не всегда соответствуют физиологическим затратам в разных условиях работы, поэтому лучше ориентироваться на физиологические показатели упражнения.

Интенсивность и структуру физиологических затрат упражнения (в том числе анаэробный вклад в энергообеспечении работы) в субмаксимальной и максимальной зонах мощности возможно определять, измеряя концентрацию лактата в крови и потребление кислорода во время работы и восстановления (Волков Н.И., и др., 2002, 2005, 2011; Алексеев В. М., Акимов Е. Б., 2008; Bertuzzi R., et al., 2016; Matsuura H., et al., 2019; Beam W.C., et al., 2019).

АнП, который является базовым ориентиром для формирования режима подготовки спортсменов во многих циклических видах спорта (Мак-Дугалл Д.Д., 1998; Joyner M.J., et al., 2008; Tanner K. et al., 2013; Lundby C., et al., 2015; J. G. Pallarés, 2016; David L. et al., 2021), определяется обычно по динамике газообмена, легочной вентиляции и концентрации лактата в крови. Для тренировочной практики это слишком сложно, т.к. газоаналитические и инвазивные методы определения физиологических параметров физической нагрузки требуют дорогостоящего оборудования, специального программного обеспечения и специалистов–физиологов высокой квалификации. Это существенно сужает доступность этих методов контроля состояния спортсмена в тренировочном процессе. Разработка информативных пульсометрических и других неинвазивных методов определения физиологических параметров физической нагрузки во всем доступном человеку диапазоне нагрузок может существенно усовершенствовать контроль за ходом тренировочного процесса.

Степень разработанности проблемы: Наиболее универсальным методом оценки интенсивности энергозатрат является расчет единиц максимальной метаболической скорости (maximum metabolic rate, MMR) - показателя, выраженного отношением уровня кислородного запроса упражнения к максимальному потреблению кислорода (Волков Н.И. и др., 2002). Структуру энергозатрат (анаэробный вклад в общем энергообеспечении), также как и показатель MMR, рассчитывают по параметрам кислородного запроса. Эти показатели позволяют оценивать физиологическую направленность упражнения и работоспособность спортсмена во всем диапазоне физических нагрузок вплоть до максимальной анаэробной мощности. Но эти методы контроля не могут широко использоваться в тренировочной практике из-за сложности их применения.

В тренировочной практике для оценки интенсивности физиологических затрат упражнения и регламентации нагрузки, обычно используются абсолютные значения частоты сердечных сокращений (ЧСС), а

также разнообразные расчетные методы, основанные на относительных значениях ЧСС. Например, метод расчета относительного рабочего прироста ЧСС (Karvonen M.J., et al., 1957; Davis A., et al., 1975; Matsuura H., et al., 2019) позволяет оценить интенсивность физиологических затрат организма в аэробном диапазоне нагрузок, а метод расчета ИППД (Король В.М. и др., 1985) позволяет оценить интенсивность физиологических затрат организма в условиях активного анаэробного энергообеспечения. Однако, во всех этих случаях предлагаются инструменты, решающие частные проблемы оценки физиологических затрат в том или ином диапазоне мощности.

Одним из информативных методов оценки интенсивности упражнения во всем диапазоне нагрузок является расчет скорости образования пульсового запроса (Волков Н.И., et al., 2005). Метод не требует газоанализа, но сложен в расчетах и не позволяет оценивать, на каком уровне относительно своих максимальных возможностей спортсмен выполнял работу, или сравнивать работоспособность у разных спортсменов.

Для расчета момента достижения важнейшей характеристики работоспособности спортсмена-циклиста – анаэробного порога (АнП) используют динамические данные легочной вентиляции и газообмена, а также концентрации лактата в капиллярной крови (Anderson G.S., et al., 1989). С той или иной степенью точности АнП может определяться по другим физиологическим характеристикам – по электромиографическим показателям (Alejandro L., et al., 1999; Latasa I, et al., 2019; Попов Д. В. и др., 2019), по показателям пульсоксиметрии (Попов Д.В. и др., 2019; Abe, M., et al., 2022), по вариабельности сердечного ритма (Селуянов В.Н. и др., 2011; Saunoriene L, et al., 2019), по динамике ЧСС (Hnizdil Jan, et al., 2019), кожной температуре (Акимов Е.Б., Сонькин В.Д., 2011), или с помощью анализа эргометрических измерений в предельных упражнениях (Andrew M. Jones, 2018; Lipková L, et al., 2022). Все эти методы характеризуют АнП как физиологический феномен, но по разным причинам не пригодны для широкого применения в тренировочной практике. Информативность этих

методов обычно уступает классическим вентиляционно-газометрическим измерениям.

Поиск неинвазивных, удобных для применения в тренировочной практике, и в то же время информативных методов определения интенсивности и структуры энергозатрат, а также методов определения АП, ведется до сих пор. Этому посвящена и настоящая работа.

Гипотеза: Для определения физиологических параметров физической нагрузки, в том числе и АП, у спортсменов циклических видов спорта можно успешно использовать неинвазивные методы, базирующиеся на бесконтактной инфракрасной термографии, пульсометрии и эргометрии, которые могут быть столь же информативными, как и газометрические и инвазивные методы.

Цель исследования: Разработать методики, основанные на использовании неинвазивных методов для определения физиологических параметров физической нагрузки при циклической работе в диапазоне от аэробного порога до максимальной анаэробной мощности.

В задачи работы входит:

- 1) Разработать пульсометрические методы определения интенсивности физиологических затрат, структуры энергообеспечения и дозы воздействия физической нагрузки для циклических упражнений в диапазоне от аэробного порога до максимальной анаэробной мощности, и оценить их информативность по сравнению с аналогичными газометрическими и инвазивными методами;
- 2) Оценить возможность использования инфракрасной термографии для определения АП;
- 3) Разработать метод определения АП по динамике ЧСС во время работы и восстановления в тесте с повышением нагрузки до отказа и оценить информативность этого метода в зависимости от протокола нагрузки и вида нагрузочного устройства;

Научная новизна: В исследовании представлены базирующиеся на данных пульсометрии новые методы и показатели для оценки интенсивности энергозатрат и структуры энергообеспечения упражнений в диапазоне нагрузок от аэробного порога до максимальной анаэробной мощности у спортсменов циклических видов спорта, и показана их высокая информативность.

Впервые предложена научно обоснованная оценка возможности использования инфракрасной термографии в процессе циклической работы повышающейся мощности для приблизительного определения АНП.

Представлен новый графический метод определения АНП в тесте с равномерным повышением циклической нагрузки до отказа, основанный на измерении ЧСС во время работы и восстановления, доказавший свою информативность при использовании различных нагрузочных устройств в условиях непрерывности тестовой нагрузки;

Теоретическая значимость исследования: Показано, что у спортсменов циклических видов спорта относительные пульсометрические показатели, характеризующие интенсивность энергозатрат и структуру энергообеспечения при выполнении упражнения, а также аналогичные им показатели, которые определяются с помощью измерения потребления кислорода и концентрации лактата в крови, тесно взаимосвязаны, и имеют одинаковый характер зависимости от интенсивности внешней нагрузки в диапазоне от аэробного порога до максимальной анаэробной мощности. При этом, относительные пульсометрические показатели, отражающие величину нагрузки, имеют, как правило, бóльшие значения, чем аналогичные газометрические, что отражает сложные взаимодействия между различными компонентами системы энергетического обеспечения, и требует дальнейших исследований.

В научный оборот и в тренировочную практику вводятся понятия: «нагрузочная экспозиция» и «доза воздействия нагрузки» (и алгоритмы их расчета), которые расширяют теоретические представления об организации

энерговегетативного обеспечения напряженной физической работы, и могут быть полезны в практике спортивной тренировки.

На основании экспериментальных данных высказано предположение об участии мышц шеи в утилизации лактата во время напряженной работы выше уровня анаэробного порога.

Показано, что переломные моменты в динамике ЧСС при непрерывной работе повышающейся мощности, и в последующем срочном восстановлении (соответствующие максимальной ЧСС и точке перегиба пульсовой кривой в восстановлении), отражают изменения в функциональном состоянии спортсмена, и в совокупности с эргометрическими показателями работы имеют прогностическое значение для определения АНП, что позволяет провести графический расчет АНП по динамике ЧСС во время работы нарастающей мощности и восстановления.

Полученные в эксперименте данные говорят о существовании значимых различий между лактатным АНП и другими видами АНП, в том числе рассчитанным по предложенному нами алгоритму графического расчета.

Практическая значимость: Практическая ценность работы состоит в разработке конкретных методик для оценки важнейших характеристик нагрузки спортсменов циклических видов спорта (анаэробный порог, интенсивность физиологических затрат, анаэробный вклад в энергообеспечение, доза физической нагрузки и др.) на основе применения неинвазивных (термографических, пульсометрических, эргометрических) методов исследования.

С помощью рассчитанных по предложенным алгоритмам пульсометрических показателей - интенсивности физиологических затрат ($УИФЗ_{чсс}$) и относительного вклада анаэробных источников ($АНВ_{чсс}$) - можно определять энергетическую направленность физических нагрузок, а также величину и направленность изменений характеристик работоспособности спортсмена при динамических наблюдениях.

Для количественной оценки воздействия физической нагрузки предложены алгоритмы расчёта новых показателей: дозы воздействия нагрузки ($ДН_{чсс}$), ее анаэробной части ($ДН_{анчсс}$), а также нагрузочной экспозиция ($НЭ_{чсс}$ и ее анаэробной части ($НЭ_{анчсс}$).

Если у спортсмена нет возможности регулярно проходить тестирование для оценки АИП в специальной лаборатории, то рекомендуется использовать предложенный графический метод расчета АИП по пульсограмме работы и восстановления. Метод можно использовать в тестировании на любых тренажерных устройствах, на которых установлены датчики скорости/мощности, либо в полевых протоколах, в которых нагрузка может повышаться равномерно.

Все эти приёмы направлены на укрепление информационного обеспечения тренера для оценки функционального состояния спортсмена, что позволяет повысить качество оперативного контроля и уровень индивидуализации нагрузки для спортсмена.

Методология исследования: Методология исследования базируется на современных представлениях об энергетике мышечной деятельности, физиологических реакциях организма в ответ на физическую нагрузку и методах физиологического контроля в тренировочной практике (Фарфель В.С., Astrand P.-O., Margaria R., Волков Н.И., Коц Я.М., Корниенко И.А., Тамбовцева Р.В.), включая экспериментальные и теоретические работы сотрудников и аспирантов кафедры физиологии РУС «ГЦОЛИФК» (Сонькин В.Д., Алексеев В.М., Акимов Е.Б., Андреев Р.С., Белицкая Л.А., Парфентьева О.И., Якушкин А.В.), посвященные изучению проблем адаптации в спорте.

Положения, выносимые на защиту:

1. Пульсометрические показатели относительной интенсивности физиологических затрат и структуры энергообеспечения, и аналогичные им показатели, определяемые по потреблению кислорода и концентрации лактата в крови, тесно взаимосвязаны и имеют одинаковый характер

зависимости от интенсивности внешней нагрузки в диапазоне от аэробного порога до максимальной анаэробной мощности, поэтому взаимозаменяемы.

2. Показатель дозы воздействия физической нагрузки отражает совокупность объема выполненной в упражнении механической работы и перенесенного при этом физиологического напряжения организма. Показатель анаэробной части дозы воздействия физической нагрузки тесно коррелирует с максимальными значениями концентрации лактата в крови, которые зависят от участия в энергообеспечении анаэробного гликолиза.

3. При тестировании с равномерным повышением нагрузки, с момента достижения АНП изменение кожной температуры спортсмена и концентрации лактата в крови тесно взаимосвязаны, что позволяет использовать бесконтактную динамическую термограмму для приблизительной оценки величины АНП.

4. Переломные моменты в динамике ЧСС при непрерывной работе с повышением нагрузки и в последующем срочном восстановлении отражают физическое состояние спортсмена, и в совокупности имеют прогностическое значение для определения АНП.

ГЛАВА I. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

1.1. Характеристика физической нагрузки для тестирования и тренировки в циклических видах спорта

1.1.1 Биоэнергетические параметры работоспособности

Как известно, нагрузки различной мощности вызывают разные по интенсивности и структуре физиологические затраты, что было постулировано В.С. Фарфелем в его концепции «зон относительной мощности» еще в 1939 г (Фарфель В.С., 1939). В этом исследовании зоны относительной мощности определялись в логарифмической системе координат по переломам кривой зависимости рекордной скорости от предельного времени в разных легкоатлетических дистанциях бега. Переломы кривой зависимости «скорость – время» соответствовали временным границам максимальной, субмаксимальной, большой и умеренной зон мощности.

Нагрузки различной мощности вызывают разные по интенсивности и структуре энергетические и физиологические затраты. Это подтверждено результатами многочисленных исследований (Margaria R., 1976; Spencer, et al, 2001; Gatin, P.B., 2001; Волков Н.И., и др., 2002, 2005, 2011; Baker JS, et al, 2010; Swanwick E., et al, 2018; Kuijpers, et al, 2020; Сонькин В.Д., Тамбовцева Р. В., 2023)

Авторы этих исследований пришли к выводу: в определенном временном диапазоне работы, выполняемой с предельной мощностью, превалирует тот или иной определенный механизм энергообеспечения. Этот вывод подтверждает предположение А. Хилла (1925) о том, что мышечная работа разной мощности может обеспечиваться принципиально различными по своей сути метаболическими процессами (Hill A. V., 1925).

Так, в диапазоне до 20–30 с работы, выполняемой с предельной мощностью, основным является алактатный механизм энергообеспечения; в диапазоне от 20–30 с до 2–3 мин – гликолитический; от 2–3 мин и более –

аэробный (Маргария Р., 1976; Волков Н. И. и др., 2002, 2011; Baker J.S., et al, 2010; Swanwick E., et al, 2018).

Все механизмы энергообеспечения «включаются» практически одновременно, но имеют различное время развертывания на максимальную мощность: алактатный – 2–6 с; гликолитический – 20–50 с; аэробный – 2–3 мин. Работоспособность спортсмена при этом непосредственно связана с качествами механизмов энергообеспечения.

К основным биоэнергетическим параметрам работоспособности спортсмена относятся мощность, емкость и экономичность механизмов энергообеспечения. Мощность характеризуется скоростью энергозатрат, емкость – объемом энергозатрат до истощения используемых ресурсов, экономичность – КПД работы. Параметры определенного механизма энергообеспечения повышаются при тренировках в соответствующих им диапазонах мощности (Маргария Р., 1976; Волков Н. И., Олейников В.И. 2011).

Оценка параметров работоспособности выполняется на основе эргометрических показателей (мощность, работа и т.п.), а также на основе регистрации физиологических и биохимических характеристик, отражающих реакции организма спортсмена на нагрузку в упражнениях, где можно достичь максимальных величин этих характеристик (см. Таб. 1.1) (Fox E.L., 1973; Волков Н.И. и др., 2000; Haff G.G, Dumke C., 2019; Davison, R., et al, 2022).

Таблица 1.1. Критерии для оценки мощности, емкости и эффективности биоэнергетических процессов энергообеспечения (по Волкову Н.И. и др., 2000)

Критерии	Алактатные анаэробные	Гликолитические анаэробные	Аэробные
Мощность	Скорость распада КрФ, максимальная анаэробная мощность	Скорость накопления лактата, скорость образования ExhCO_2	МПК, мощность, соответствующая МПК
Емкость	Общее содержание КрФ в мышцах, величина максимального алактатного долга	Максимальное накопление лактата в крови, общий O_2 -долг, ΔpH	Максимальный кислородный приход упражнения
Экономичность	Скорость оплаты алактатного O_2 -долга, $\Delta\text{КрФ}/\Delta\text{W}$	Механический эквивалент лактата (W/La)	АнП, кислородная стоимость работы

Примечание: МПК – максимальное потребление кислорода; ExhCO_2 – эксцесс выделения углекислого газа; $\Delta\text{КрФ}$ – использованный в работе креатин фосфат; ΔW – градиент мощности работы; La – концентрация лактата в крови.

1.1.2. Кислородный запрос и его составляющие

Не во всех спортивных лабораториях возможно проводить биопсию для определения содержания макроэргов в мышечной ткани, регистрировать изменения рН организма в ходе нагрузочного тестирования, но во многих можно измерять концентрацию лактата в капиллярной крови, потребление кислорода и рассчитывать параметры кислородного запроса (см. Рис.1), анализ которых позволяет косвенно, но достаточно надежно оценивать биоэнергетические характеристики механизмов энергообеспечения.

Так, аэробные затраты организма характеризуются объемом потребленного O_2 за время работы в упражнении (кислородный приход - КП), а анаэробные затраты - объемом потребленного O_2 в восстановлении после работы (кислородный долг - КД). При этом объем быстрой фракции (БФ) КД отражает энергозатраты произведенные за счет алактатного механизма, а объем медленной фракции (МФ) КД отражает энергозатраты произведенные за счет гликолитического механизма энергообеспечения (см. Рис. 1.1) (Margaria, R., et al. 1933, 1971; di Prampero PE, Ferretti G. 1999).

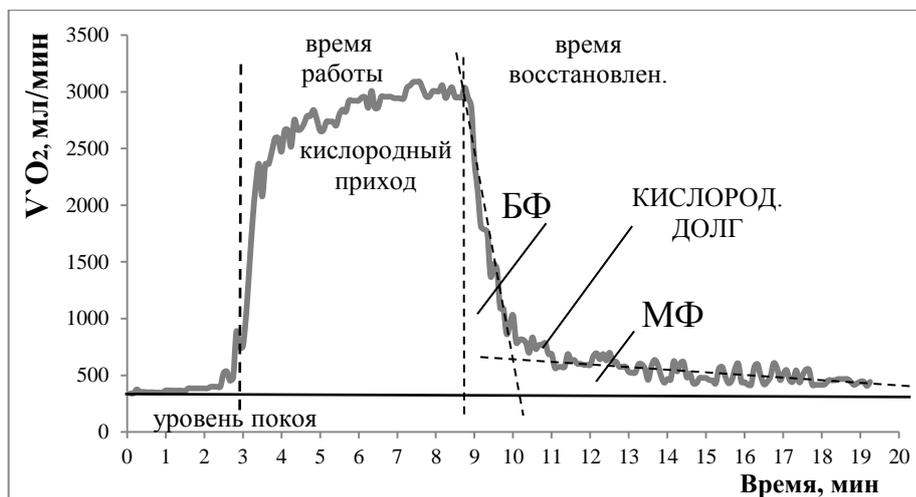


Рисунок 1.1. Схематическое изображение: кислородный запрос и его составляющие (Я.М. Коц., 1982). Переработано.

Анализ изменений этих и других физиологически и биохимических показателей, характеризующих работу в максимальных или стандартных тренировочных упражнениях, позволяет обосновано выбирать наиболее

эффективные средства и методы для спортивной подготовки спортсмена (Волков Н.И и др. 2000).

1.1.3. Режимы предельной нагрузки для определения биоэнергетических параметров работоспособности

В практике спортивного тестирования, для определения биоэнергетических параметров работоспособности используются режимы предельной нагрузки различной фиксированной продолжительности, которая соответствует проявлению максимальных возможностей исследуемого механизма энергообеспечения.

Так, тестирование спортсменов в упражнении с предельной мощностью, длительность которого составляет 10 с, применяется для определения свойств алактатного механизма энергообеспечения. При этом максимальную алактатную мощность (МAM) характеризует максимальная механическая мощность работы, а алактатную емкость характеризует количество выполненной в тесте работы (Bouchard C. et al., 1982; Simoneau J., et al., 1983; Zajac A., et al., 1999; Driss T., et al., 2013).

Тест с предельной мощностью, длительность которого составляет 30 с (Вингейтский тест), так же, как и предельный тест с продолжительностью 10 с, может применяться для оценки максимальной алактатной мощности (Bar-Or, O., et al., 1977; Bar-Or, O., 1987; Green, S., 1995; Inbar O. et al., 1996; Christie, et al., 2021), при этом механическая мощность, усредненная за последние 5 секунд работы, достаточно точно характеризует мощность гликолитического механизма энергообеспечения ($W_{гл}$) (Мак-Дугалл Д.Д. и др., 1998).

Мощность анаэробного гликолиза ($W_{гл}$), может быть адекватно охарактеризована средней механической мощностью предельной работы продолжительностью около 60 с (Szogy A., et al., 1974; Волков Н.И., 1975).

Для определения емкости гликолитического механизма энергообеспечения нужна более продолжительная работа, не менее 120 с (Katch J. et al., 1979; Hollmann W., 1990). Это приблизительно соответствует так называемой «мощности истощения» (Wист), при которой достигается полное исчерпание анаэробной емкости организма, когда наблюдается наивысшая концентрация лактата в крови (Simonson E., et al, 1942, 1971).

Возникновение различных мнений по поводу длительности предельных упражнений для определения мощности и емкости гликолитического механизма энергообеспечения связано, возможно, с тем, что в исследованиях этих авторов принимали участие спортсмены различных дисциплин и квалификаций.

Тестирование спортсменов с предельной мощностью в упражнении, длительность которого составляет 360 с, может использоваться для определения МПК. МПК и средняя мощность работы в таком тестировании характеризуют мощность аэробного механизма энергообеспечения (Шепард Р., et al., 1971; Tipton С.М, 2014).

Мощность аэробного механизма энергообеспечения, соответствующая МПК, или критическая мощность ($W_{кр}$), а также мощность анаэробного порога ($W_{АнП}$) обычно определяются в тестах с равномерно повышающейся нагрузкой до отказа испытуемого от продолжения работы (Petot Н., et al., 2012; Billat V.L., et al., 2013; Breese J., 2020).

1.1.4. Классификация и характеристики циклической соревновательной нагрузки

В 1986 году Я. М. Коц в учебнике «Спортивная физиология» классифицировал все виды циклической соревновательной нагрузки по средней мощности и предельной продолжительности работы в соответствии с метаболическим обеспечением (см. Таб. 1.2).

Таблица 1.2. Классификация и характеристики циклической соревновательной нагрузки (по Я.М. Коцу, 1986). Переработано.

	Классификация упражнений	Предельное время	Структура энергообеспечения	Ведущие параметры механизмов энергообеспечения	Основные энергетические субстраты
Анаэроб. упражнения	Макс. анаэробная мощность	10 с	Ан. вклад 90-100%	W, E алактатного м. э.	АТФ, КрФ
	Околомакс. анаэробная мощность	20-50 с	Ан. вклад 75-85%	W, E алактатного м. э., W гликолитического м. э.	КрФ, мышечный гликоген
	Субмакс. анаэробная мощность	60-120 с	Ан. вклад 60-70%	W, E гликолитического м. э., W аэробного м. э.	Мышечный гликоген
Аэробные упражнения	Макс. аэробная мощность	3-10 мин	Ан. вклад 30-40%, приблизительно уровень МПК	W аэробного м. э., E гликолитического м. э.	Мышечный гликоген
	Околомакс. аэробная мощность	До 30 мин	Ан. вклад около 10%, 85-90% от МПК	W аэробного м. э., E гликолитического м. э.	Мышечный гликоген, жиры, глюкоза крови
	Субмакс. аэробная мощность	До 120 мин	Ан. вклад менее 10%, 70-80% от МПК	W, E аэробного м. э.	Мышечный гликоген, жиры, глюкоза крови
	Средняя аэробная мощность	Свыше 120 мин	Ан. вклад незначителен (менее 1%), 55- 65% от МПК	E аэробного м. э.	Жиры, мышечный гликоген, глюкоза крови

Примечание:

Ан. вклад – анаэробный вклад;

м. э. – механизм энергообеспечения: взаимодействие физиологических функций, которое обеспечивает деятельность каждого из тканевых источников энергии (алактатного, гликолитического, аэробного) на уровне целостного организма (Сонькин В.Д., Тамбовцева Р.В. 2023).

W – мощность: характеризует скорость преобразования энергии;

E – емкость: отражает количество освобождаемой энергии и выполненной работы (Волков Н.И., 2000);

E аэробного м. э. – способность длительно поддерживать высокую скорость потребления кислорода (Я.М. Коц, 1986).

Такая классификация более подробно характеризует весь диапазон нагрузок, чем классификация В.С. Фарфеля. Закономерно, что в диапазоне от МАМ до мощности, соответствующей АНП, продолжительность предельных нагрузок для тестирования биоэнергетических параметров и продолжительность соревновательных упражнений в классификации Я.М. Коца вполне сопоставимы.

1.1.5. Основные режимы тренировочной работы в циклических видах спорта

С увеличением предельной мощности упражнения, продолжительность работы снижается, при этом изменяется вклад различных субстратов в ресинтез АТФ. Это значит, что мощность и продолжительность работы определяют величину и направленность биохимических изменений в организме, от которых зависит тренировочный эффект (Swanwick E., et al., 2018; Kenney W. L., et al., 2019; Hargreaves, M., 2020), а также имеют решающее значение для инициации гормональных изменений в организме спортсмена, определяющих развитие срочной и долговременной адаптации к соответствующим режимам тренировки (Virus A., et al., 1995; Virus A., et al., 1996).

Тренировочное упражнение, при котором режим работы соответствует проявлению максимальной мощности определенного механизма энергообеспечения, будет направлено на повышение мощности этого механизма, а тренировочное упражнение в определенном режиме, соответствующее мощности, на которой происходит истощение ресурсов данного механизма энергообеспечения, будет направлено на повышение его емкости (Волков Н.И., Савелев И.А., 2002; Волков Н.И., Волков А.Н., 2004; Волков Н.И. и др., 2005; Волков Н.И., Олейников В.И., 2011; Сонькин В.Д., 2015).

Повышение мощностных параметров предельной нагрузки (МАМ, Вист, Wкр, WАНП) подтверждает эффективность тренировочного процесса, направленного на повышение работоспособности спортсмена. Исходя из этого, основные режимы тренировочной работы в циклических видах спорта ориентированы либо на максимальную анаэробную мощность (Fox E.L., 1973; Gollnick P., et al, 1973; Olek R.A., et al, 2018; Silva MLD, et al, 2019; Satiroglu R., et al, 2021), либо на мощность истощения (Simonson E., et al, 1942, 1971; Gollnick P., et al, 1973; Costill D.L., 1986; Волков Н.И., и др., 2000,

2011; Cicchella A., 2022), либо на критическую мощность (Lortie G., et al, 1984, Ekblom B., et al, 1986, Weerapong Chidnok, et al, 2020; James Breese, 2020), либо на порог анаэробного обмена (Ghosh A.K., 2004; Friedmann B., et al, 2004, Skorski S., et al, 2004, Mo S., et al, 2018, Römer C., et al, 2018).

1.2. Контроль интенсивности физической нагрузки

В практике физиологии труда и спорта для контроля тренировочной нагрузки принято использовать «внешние» и «внутренние» показатели, характеризующие объем и интенсивность упражнений. К «внешним» относятся эргометрические показатели упражнения (работа, дистанция, время, килограммы, количество повторений и т. п).

Параметры «внешних» показателей напрямую влияют на величину и характер изменений «внутренних» показателей нагрузки, характеризующих физиологические сдвиги (ЧСС, потребление O_2 , выделение CO_2 , концентрация лактата и т. п), происходящие в организме спортсмена во время работы и восстановления.

В формате тренировочных занятий эргометрические показатели нагрузки в разных условиях не всегда адекватно отражают уровень физиологического напряжения, от которого зависит метаболическая направленность тренировочных упражнений. Например, скорость у бегунов и велосипедистов зависит от погодных условий и рельефа трассы, скорость у гребцов – от погодных условий, приспособлений, тормозящих ход лодки в тренировочной работе и т.п.

Точное определение метаболической направленности упражнения представляет основную сложность в спортивной подготовке. Для определения направленности упражнения, необходимы такие показатели интенсивности, которые позволяют оценивать уровень физиологического напряжения организма и отражают специфичность метаболических

процессов в работе различной мощности (Волков Н.И., Савелев И.А., 2002; Волков Н.И. и др., 2005; Swanwick E., 2018; Kenney W. L., et al., 2019).

В тренировочной практике для оценки физиологических сдвигов, характеризующих интенсивность и направленность упражнения, в разных диапазонах мощности применяются разные инструменты и показатели. Так, в диапазонах преимущественно анаэробной мощности (от $W_{кр}$ до МАМ) для этого применяют нелинейные функциональные характеристики работы: кислородный или пульсовой запрос (КЗ, ПЗ, соответственно), кислородный или пульсовой долг (КД, ПД, соответственно), концентрацию лактата в крови, скорость накопления этих показателей, и др. В диапазонах преимущественно аэробной мощности (до $W_{кр}$), для оценки физиологических сдвигов во время циклической работы обычно применяют линейные функциональные характеристики – например, линейную зависимость ЧСС или потребления O_2 от мощности нагрузки, % потребления O_2 от МПК или %ЧСС от максимальной ЧСС.

Критерием для определения физиологической напряженности, или тяжести работы является её энергетическая стоимость или интенсивность энергозатрат. В физиологии труда физическая работа классифицируется по уровню энергетических затрат как легкая, умеренная, средней тяжести, интенсивная, трудная, утомительная, изнурительная (Шерер Ж., 1987).

При этом, одинаковая работа может быть разной по тяжести для двух разных людей. Наиболее точно физическая работа классифицируется относительно определенного эталона. Dill D.B. (1936) и Lehman G., (1958) классифицировали тяжесть работы относительно индивидуальной величины основного обмена. Wells J.G. et al. (1957) и Soula C., et al. (1961) классифицировали интенсивность физической работы относительно индивидуальной величины «общей аэробной способности» (МПК).

1.2.2. Относительная (метаболическая) мощность упражнения

По мнению Н.И. Волкова (1968) и Я.М. Коца (1986), наиболее рациональной является классификация физических нагрузок, при которой относительная интенсивность упражнения определяется путем сравнения текущих физиологических показателей интенсивности работы (ЧСС, VO_2) с их максимальными величинами. Максимальная величина какой-либо физиологической характеристики работы отражает ее возможный диапазон изменений: упражнение будет иметь для спортсмена тем более высокую относительную интенсивность, чем меньше этот диапазон.

В исследовании Н.И. Волкова и И.А. Савелева (2002) была представлена и проиллюстрирована классификация физических нагрузок (см. Рис. 1.2.) на основе изменения уровня алактатных, гликолитических и аэробных энергозатрат спортсмена в зависимости от относительной (метаболической) мощности упражнения, которая рассчитывалась как отношение уровня кислородного запроса к величине индивидуального МПК спортсмена, в единицах максимального метаболического уровня (ед. MMR). 1 ед. MMR соответствует относительной мощности упражнения, при которой уровень кислородного запроса равен величине МПК.

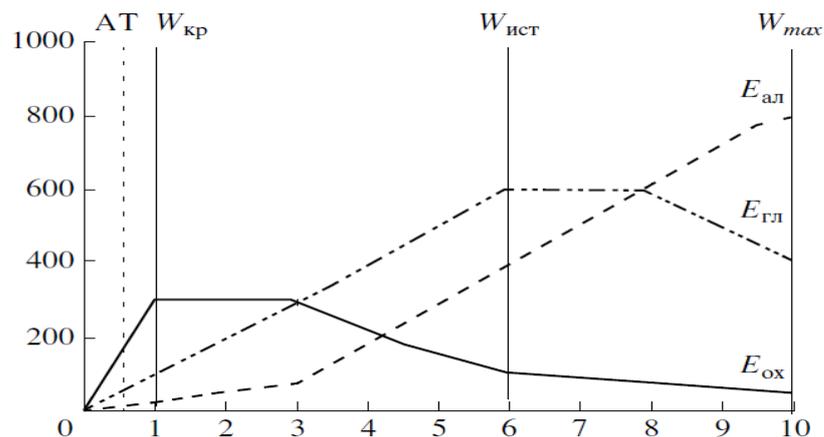


Рисунок 1.2. Зависимость изменения скорости энергопродукции в различных метаболических процессах от относительной мощности упражнения. На OX – относительная (метаболическая) мощность упражнения, ед. MMR; на OY – скорость энергопродукции, ккал/кг/мин (Волков Н.И., Олейников В.И., 2011. Переработано);

Eал – динамика скорости алактатной энергопродукции;

Eгл – динамика скорости гликолитической энергопродукции;

Eал – динамика скорости аэробной энергопродукции;

AT – анаэробный порог

Уровень алактатных, гликолитических и аэробных энергозатрат рассчитывался через калорические эквиваленты быстрой фракции кислородного долга, величине максимальной концентрации лактата в крови и по объемам кислородного прихода (соответственно).

Для классификации физической нагрузки авторы обосновали возможность использовать в качестве «разделительных критериев» значения относительной (метаболической) мощности упражнения, при которых наблюдаются резкие изменения в скорости анаэробной и аэробной энергопродукции. Так, максимальной анаэробной мощности соответствовало 10 – 12 ед. MMR; мощности истощения 4 – 6 ед. MMR, критической мощности 1 ед. MMR, мощности АНП – 0,6 ед. MMR.

Шкалу в единицах максимального метаболического уровня, по мнению авторов, можно использовать в целях систематизации нагрузок по биоэнергетической направленности тренирующего воздействия.

Этот подход невозможен без газоанализатора и специального программного обеспечения, использование которых пока не имеет широкого распространения из-за их дороговизны, сложности в эксплуатации и необходимости в дополнительном высококвалифицированном персонале.

1.2.3. Скорость образования вентиляционного запроса

Н.И. Волков и соавторы (2014) попытались обойти проблемы, связанные с эксплуатацией в тренировочной практике газоанализатора и применением инвазивных процедур, используя наряду с газоанализатором в аналогичных измерениях новый, относительно недорогой отечественный портативный волюметр «SV3000».

Авторы установили, что интенсивность физиологических затрат различных по мощности предельных циклических упражнений практически во всем диапазоне нагрузок можно определять по скорости образования вентиляционного запроса (COBЗ, л/мин), которая рассчитывалась как

отношение величины вентиляционного запроса ($VЗ$, л) к продолжительности упражнения ($t_{упр}$, мин):

$$COBЗ = VЗ/t_{упр}.$$

К сожалению, портативные волюметры также как и газоанализаторы, пока не получили широкого распространения в практике спортивных измерений.

1.2.4. Скорость накопления лактата

В работах Н.И. Волкова, О.И. Попова и соавторов (2005) наряду с относительной (метаболической) мощностью, в качестве физиологического критерия интенсивности различных по мощности предельных циклических упражнений использовалась скорость накопления лактата (*СЛЛа*), которая рассчитывалась как отношение разницы между исходной и максимальной концентрацией лактата, накопленной в упражнении, к продолжительности работы (Волков Н. И., Попов О.И. и др., 2005).

Абсолютные значения максимальной концентрации лактата, в отличие от *СЛЛа*, недостаточно информативны для того, чтобы характеризовать интенсивность упражнений. Например, у одного и того же спортсмена максимальная концентрация лактата, накопленная в тесте МАМ, может быть меньше, чем в упражнении уровня АП, или приблизительно одинаковы после выполнения предельных упражнений разной мощности и продолжительности – 30 с и 360 с.

СЛЛа тесно экспоненциально взаимосвязана с мощностью упражнения (см. Рис. 1.3.).

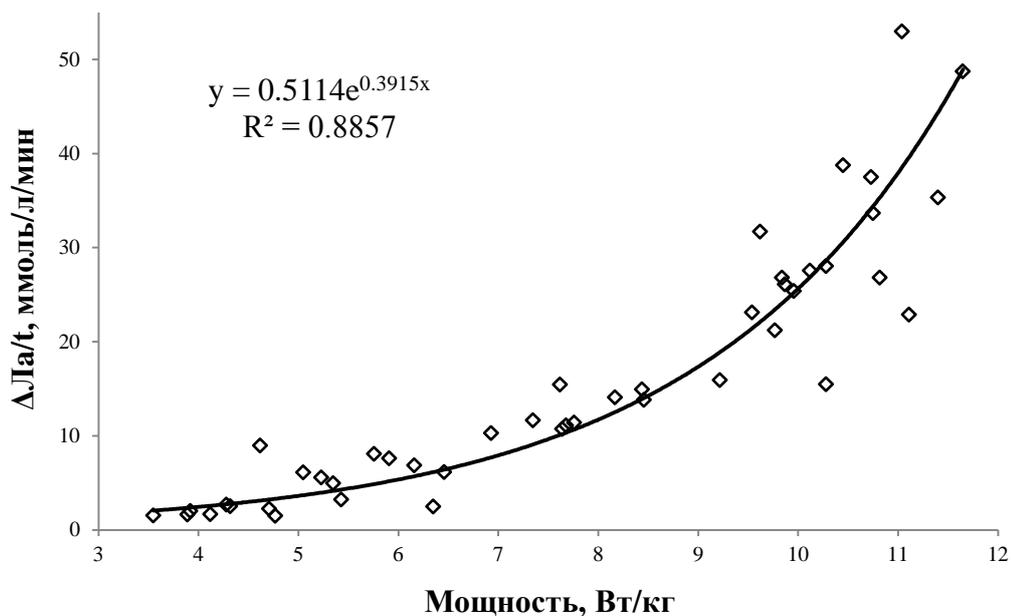


Рисунок 1.3. Взаимосвязь САЛа и мощности при выполнении предельной работы различной продолжительности на велоэргометре. График выполнен по данным из исследования (Козлов А.В. и др., 2022).

Со скоростью накопления лактата тесно линейно взаимосвязаны относительная (метаболическая) мощность упражнения, а также скорость образования кислородного и пульсового запроса. САЛа характеризует интенсивность упражнения во всем диапазоне нагрузок от умеренной мощности до МАМ (Козлов А.В. и др., 2022).

Портативные приборы для измерения лактата сегодня вполне доступны для использования в тренировочной практике. Недостатком в их применении является то, что для измерения концентрации лактата требуются инвазивные процедуры, - это связано с риском для здоровья спортсмена и делает необходимым участие медицинского персонала.

1.3. Контроль интенсивности физической нагрузки с помощью пульсометрических методов

1.3.1. Скорость образования пульсового запроса

В ряде работ Волкова Н.И, Попова О.И. и соавторов (2003, 2004, 2005) изучалась возможность использовать пульсовые запросы различных по мощности предельных циклических упражнений в качестве критерия

физиологической стоимости упражнения и для нормирования тренировочных нагрузок у высококвалифицированных спортсменов (Волков Н. И, Попов О.И. и др.. 2003, 2004, 2005).

Для этого интенсивность физиологических затрат рассчитывалась как скорость образования пульсового запаса (СОПЗ, уд/мин):

$$\text{СОПЗ} = \text{ПЗ}/t_{\text{упр}},$$

Где пульсовый запас (ПЗ, уд) есть сумма пульсового прихода (ПП, уд) и пульсового долга (ПД, уд), $t_{\text{упр}}$ - продолжительность упражнения.

ПП рассчитывается как площадь под кривой динамики ЧСС за время работы. При дискретности измерения 1-5 секунд, ПП можно рассчитывать как произведение продолжительности упражнения и средней ЧСС за это время. Результат такого упрощенного расчета практически не отличается от расчета площади под кривой динамики рабочей ЧСС.

ПД по авторской методике следует рассчитывать как площадь под кривой сверх уровня покоя, аппроксимируя динамику ЧСС восстановления (измеряемую за 30 мин) методом наименьших квадратов на более позднее восстановление в полулогарифмическом графике. Уровень покоя при этом рассчитывается особым способом, который описан в более ранней работе (Волков Н. И, 1968).

Было установлено, что СОПЗ очень тесно взаимосвязана с СОКЗ и может быть использована в качестве показателя интенсивности физиологических затрат упражнения (Волков Н.И., и др., 2005).

По мнению авторов, это позволяет использовать СОПЗ для нормирования тренировочных нагрузок. Но у разных спортсменов при выполнении одинакового упражнения, пульсовые запасы могут сильно отличаться по величине (и это не обязательно связано с работоспособностью). В динамике подготовки конкретного спортсмена и пульсовый запас, и образующие его пульсовые суммы, могут значительно изменяться. Это может снижать понимание тренерского состава - на каком уровне интенсивности от максимальных возможностей спортсмена

выполняется работа. При этом, СОПЗ не показывает направленность (специфичность) произошедших адаптивных изменений за конкретный период подготовки. Для таких уточнений необходимы дополнительные расчетные методы, основанные на измерении O_2 или концентрации лактата.

1.3.2. Интенсивность накопления пульсового долга (ИНПД)

В 1985 г. Король В.М., Сонькин В.Д. и Ратушная Л.И. предложили показатель для оценки физиологической стоимости физической работы анаэробного и смешанного характера, основанный на измерении ЧСС во время восстановления - ИНПД (интенсивность накопления пульсового долга) (Король В.М. и др., 1985).

Этот показатель рассчитывается как отношение пульсового долга (ПД, уд) сверх ЧСС покоя за 5 мин восстановления к продолжительности упражнения (t, с): $ИНПД = (ПД - 5 \times ЧСС \text{ покоя}) / t$

ИНПД четко отражает мощность (интенсивность) упражнения (см. Рис. 1.4.).

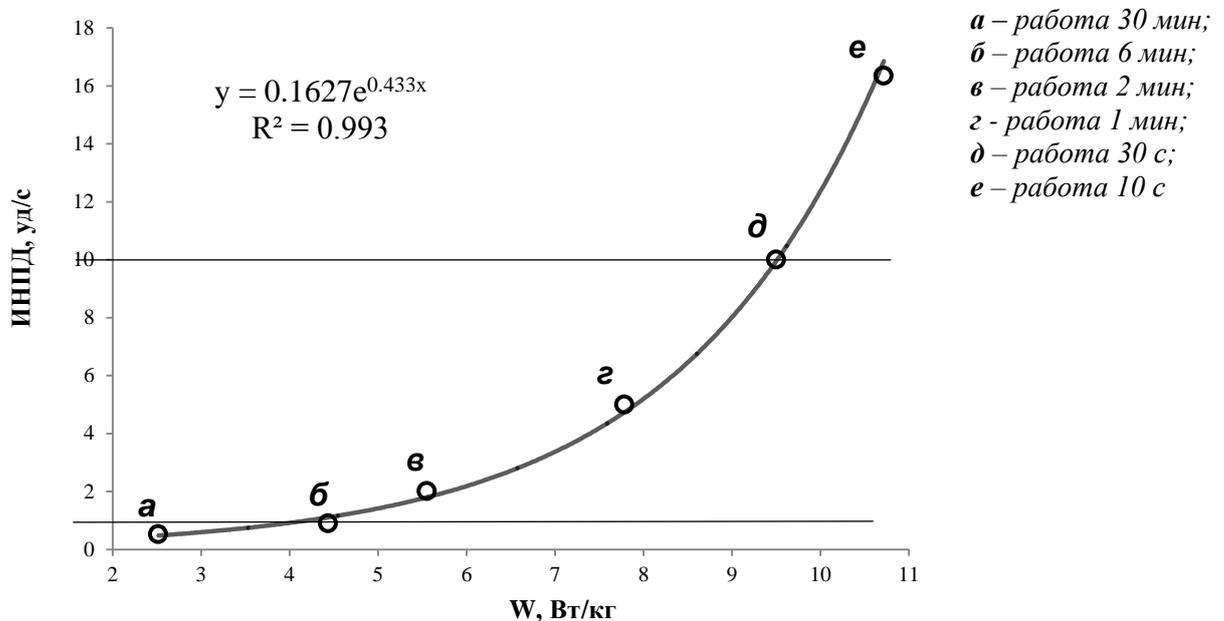


Рисунок 1.4. Зависимость ИНПД, от предельной мощности работы при выполнении упражнений разной продолжительности спортсменами-велосипедистами 17-28 лет. Нижняя прямая линия на графике показывает границу между аэробным и анаэробным диапазонами нагрузок (соответствует уровню МПК), верхняя прямая показывает границу между упражнениями преимущественно гликолитической и алактатной направленности. График выполнен по данным из исследования (Козлов А.В. и др., 2022).

ИНПД имеет ясный физиологический смысл. С одной стороны, накопленный за время работы в упражнении кислородный или пульсовой долг отражает затраченный организмом объем анаэробных затрат. С другой стороны, образование задолженности и ее погашение представляют собой взаимосвязанные процессы на уровне целого организма, зависящие от регуляторных возможностей систем, поддерживающих гомеостаз. ИНПД при этом характеризует скорость физиологических затрат, связанных с анаэробными процессами, а также уровень напряжения регуляторных систем всего организма.

Показатель ИНПД тесно взаимосвязан со скоростью накопления лактата у спортсменов в циклической работе (Козлов А.В., и др., 2022). Большое преимущество этого показателя в том, что он информативен для оценки интенсивности любых упражнений (силовых, скоростно-силовых, циклических и ациклических) в диапазоне нагрузок от АНП до МАМ.

1.3.3. «Относительный рабочий прирост ЧСС»

В практике спортивной подготовки для нормирования тренировочного упражнения существует необходимость контролировать его физиологическую интенсивность непосредственно во время выполнения. При повышении мощности работы увеличивается мышечная нагрузка, повышается потребление O_2 , легочная вентиляция, ЧСС, может повышаться концентрация лактата в крови, изменяются другие функциональные характеристики физической работы. Из этих характеристик, ЧСС является наиболее простым и надежным показателем для контроля состояния спортсмена в тренировочной практике. ЧСС отражает активирующие влияния симпато-адреналовой системы и некоторых других рефлекторных и гуморальных факторов на водитель ритма сердца. При этом, с одной стороны, ЧСС опосредованно отражает уровень активности окислительных процессов во время работы, с другой стороны характеризует ее

механическую интенсивность. В аэробном диапазоне нагрузок (до МПК), после вработывания, ЧСС, как и потребление O_2 , линейно зависит от мощности нагрузки. В тех случаях, когда точное измерение механической интенсивности работы невозможно, наличие линейной связи позволяет приблизительно оценивать ее мощность по величине ЧСС. И наоборот, зная механическую интенсивность работы, можно прогнозировать соответствующую ЧСС.

Для определения физиологической интенсивности нагрузки и ее регламентации, у людей разного возраста, пола и уровня физической подготовленности можно использовать относительные показатели сердечного ритма – %ЧСС работы от максимальной ЧСС или относительный рабочий прирост ЧСС (%ЧСС_{орп}):

$$\%ЧСС_{орп} = (ЧСС_{р} - ЧСС_{п}) / (ЧСС_{макс} - ЧСС_{п}) \times 100\%,$$

где ЧСС_р – ЧСС работы; ЧСС_п – ЧСС покоя; ЧСС_{макс} – максимальная ЧСС спортсмена. Метод обоснован Karvonen M. J. и соавт. (1957).

Vehrs P. R. et al, (2022) установлено, что %ЧСС_{орп} близок по величине и тесно взаимосвязан с % потребления O_2 от МПК. Это позволяет с помощью формулы Karvonen M..J. рассчитывать значение ЧСС, соответствующее определенному % потребления O_2 от МПК, и ориентироваться на них, тренируясь в целевой зоне мощности (Я. М. Коц, 1986).

В отличие от методов Н.И Волкова, Попова О.И., Король В.М. и Сонькина В. Д. (см. выше), предлагаемых для определения физиологической интенсивности упражнений, метод Karvonen M.J. информативен только в аэробном диапазоне циклических нагрузок.

1.3.4. «Доза физической нагрузки»

Подход Karvonen M.J. был использован для расчета «дозы тренировочной нагрузки» в работе Miller FL et al. (2014). Авторы сравнивали

качество тренировочного контроля, который проводился с помощью расчета суммы общего тренировочного времени, с качеством контроля, который проводился с помощью расчета суммы «доз тренировочной нагрузки» за исследуемый период подготовки.

Доза тренировочной нагрузки для одного занятия рассчитывалась как произведение продолжительности этого занятия и относительного рабочего прироста (%ЧСС_{орп}). Для расчета дозы тренировочной нагрузки за период подготовки, дозы всех тренировочных занятий за этот период суммировались.

Критериями для сравнения методов контроля были показатели здоровья испытуемых: антропометрические показатели, ЧСС в состоянии покоя, артериальное давление, уровень глюкозы в крови натощак и уровень общего холестерина.

Авторы пришли к выводу, что в качестве тренировочного контроля расчет тренировочной нагрузки с использованием ЧСС (%ЧСС_{орп}) более эффективен для улучшения и сохранения здоровья, чем контроль только количества и продолжительности тренировочных занятий. Показатели здоровья оказались качественно лучше у тех испытуемых, у которых тренировочная нагрузка контролировалась методом расчета суммы тренировочных доз.

Метод пригоден для контроля интенсивности упражнений в аэробном диапазоне нагрузок.

1.3.5 «Метод обобщенных тренировочных зон»

Edwards S. (1993) для расчета тренировочной нагрузки предложил «метод обобщенных тренировочных зон», в котором пяти пульсовым зонам интенсивности от 50% до 100% от ЧСС_{макс.} с дискретностью 10% присуждалось соответственно от 1 до 5 баллов (весовой коэффициент). Тренировочная нагрузка рассчитывалась как сумма произведений времени

работы в каждой пульсовой зоне и весовых коэффициентов, соответствующих этим пульсовым зонам.

Lucia A и соавт. (2003) предложили аналогичный метод, основанный на трех пульсовых зонах интенсивности, соответствующих: зоне нагрузок от 50% ЧСС_{макс.} до ЧССАЭП, от ЧССАЭП до ЧССАнП, от ЧССАнП до ЧСС_{макс.} Трех зонам нагрузок присуждался весовой коэффициент соответственно интенсивности от 1 до 3 баллов.

Использование линейной зависимости весовых коэффициентов от ЧСС, делает эти методы недостаточно информативными, т. к. такая зависимость не совсем точно отражает физиологические реакции выше анаэробного порога. Величина измеренной тренировочной нагрузки в конце предшествующей и в начале следующей определенной зоны будет сильно отличаться, но физиологическое состояние спортсмена при этом может быть одинаковым. Другими словами, при изменении средней ЧСС на 1 уд может измениться весовой коэффициент, при практически одинаковом физиологическом состоянии спортсмена.

Подход Edwards S. (1993) и Lucia A. et al. (2003) информативен только для упражнений в аэробном диапазоне нагрузок.

1.3.6. TRIMPs

Подход Karvonen M.J. также был использован в модели для расчета тренировочной нагрузки в единицах-дозах физических усилий (TRIMPs), разработанной и валидированной Banister E.W., Morton R.H. и соавторами (Banister E.W., 1985, 1991; Morton R.H., et al, 1990; Fitz-Clarke J.R., et al, 1991).

В этой модели тренировочная нагрузка рассчитывалась как произведение продолжительности тренировочного занятия (или отдельного упражнения), относительного рабочего прироста ЧСС ($\Delta\text{ЧССотн}$) и весового коэффициента нагрузки (Y):

$$\text{TRIMPs} = t \times \Delta \text{ЧСС}_{\text{отн}} \times Y,$$

где t - продолжительность (мин); $Y = \exp(b \times \Delta \text{ЧСС}_{\text{отн}})$; $b = 1,67$ для женщин и $b = 1,92$ для мужчин.

По мнению авторов, необходимость в весовом коэффициенте нагрузки обусловлена тем, что между ЧСС и физиологической напряженностью существует экспоненциальная зависимость, которую иллюстрирует зависимость концентрации лактата в крови от относительного рабочего прироста ЧСС при повышении нагрузки в инкрементном тесте. В представленной формуле, коэффициент b характеризует усредненный лактатный профиль для женщин и мужчин в тесте с равномерным повышением нагрузки. Точность модели повышается, если коэффициент b рассчитывается для TRIMPs из индивидуального лактатного профиля, построенного по данным конкретного спортсмена, прошедшего тестирование с повышением нагрузки (Manzi V., et al, 2009).

Расчет индивидуализированных TRIMPs для мониторинга тренировочных нагрузок спортсмена нуждается в предельных тестированиях с измерением концентрации лактата в крови.

1.4. Контроль интенсивности физической нагрузки с помощью оценки RPE

1.4.1. Уровень воспринимаемого напряжения (RPE)

RPE - уровень воспринимаемого напряжения (Rating of perceived exertion). Оценивать воспринимаемое психофизическое напряжение человека возможно по количеству баллов 20-бальной или 10-бальной шкалы Борга, основанных на оценке воспринимаемого напряжения в ответ на физическую нагрузку. (Borg G.A., 1982; Borg G.A., et al, 1987). Оценка в 20 или 10 баллов является предельной и соответствует наивысшему психофизическому напряжению.

Исследуя возможность использовать шкалу для оценки интенсивности тренировочной работы, авторы пришли к выводу, что у спортсменов оценка RPE тесно взаимосвязана с другими физиологическими характеристиками интенсивности, такими как ЧСС и концентрация лактата в плазме крови, и может быть использована при назначении тренировок (Borg G.A., et al., 1987; Zinoubi B., et al, 2018).

Алексеев, В. М. и Акимов, Е. Б. (2008) изучали физиологические реакции спортсменов и сопоставляли их с субъективными оценками тяжести нагрузки в упражнениях разной интенсивности. Для субъективной оценки тяжести нагрузки использовали шкалу Алексеева 50-100, основанную на соответствии оценки тяжести нагрузки относительной рабочей ЧСС (%ЧССмакс).

Было установлено, что субъективные оценки с удовлетворительной точностью отражают параметры механической работы, выполняемой в режиме как увеличения, так и уменьшения мощности. При этом, рабочая ЧСС, выраженная в % от ЧССмакс, тесно соотносится со значениями шкалы 50-100 в широком диапазоне.

Авторы сделали вывод, что шкала 50-100 может использоваться для нормирования преимущественно аэробных тренировочных нагрузок (Алексеев, В. М., Акимов Е. Б., 2008).

Borg E, Borg G. (2002) для субъективной оценки тяжести нагрузки обосновали шкалу CR100, которая является более подробной и охватывает субъективные вариации от «минимального» до «максимального» с промежуточными вербальными дескрипторами: минимальный, крайне слабый, очень слабый, слабый, умеренный, сильный, очень сильный, чрезвычайно сильный, максимальный.

Такая шкала, по мнению Fabre N. at al. (2013), так же может использоваться для определения АнП.

1.4.2. sRPE - сессионный RPE

Foster C. et al. (2001) предположили, что с помощью RPE возможно оценивать не только интенсивность нагрузки, соответствующую текущему функциональному состоянию спортсмена, но и суммарную нагрузку за все время тренировочного занятия. Тренировочная нагрузка при этом равнялась произведению продолжительности тренировки на RPE. Метод получил название сессионный RPE (sRPE). Авторы использовали 10-балльную шкалу интенсивности (Foster C. et al., 2001), которая соответствует описанию субъективного состояния спортсмена от состояния «отдыха» до «предельного напряжения».

Gabbett (2004b) отметил, что проводя мониторинг с помощью sRPE и корректируя тренировочные нагрузки в предсезонной подготовке, удалось снизить травматизм спортсменов регбистов.

Метод RPE более информативен для спортсменов высокого уровня, способных адекватно оценивать тяжесть своего физического состояния (Noakes T.D. 2002; Алексеев В. М., Акимов Е. Б., 2002).

Метод RPE, как показатель интенсивности информативен только для упражнений в аэробном диапазоне нагрузок.

1.5. Анаэробный порог

АнП - интенсивность работы (мощность/скорость), при достижении которой из-за включения в работу быстрых мышечных волокон и активации в работающих скелетных мышцах анаэробного гликолиза, начинается резкое возрастание содержания лактата в крови, образование которого не полностью компенсируется митохондриальным окислением.

Впервые про анаэробный порог заговорили после работ Иссекуца 1961-1962 гг., в которых АнП определялся по динамике дыхательного

коэффициента при нагрузках повышающейся мощности (Issekuts В., Rodahl К., 1961; Issekuts В., et al, 1962).

Из всех режимов циклической нагрузки анаэробный порог (АнП) является базовым для подготовки спортсменов в различных видах спорта. Мощность, или скорость достижения АнП, является важной характеристикой работоспособности спортсмена, которая наиболее информативна для суждения о потенциале его аэробных возможностей, и позволяет контролировать эффективность тренировочного процесса у спортсменов циклических видов, тренирующих выносливость (Мак-Дугалл Д.Д., 1998; Heuberger JAAC et al, 2018; David L. et al, 2021).

В настоящее время существует множество традиционных методов определения АнП, основанных на анализе динамики концентрации лактата в крови (инвазивные) (Jamnick N.A, et al, 2018), на анализе динамики легочной вентиляции и газообменных характеристик (неинвазивные) (Beaver W.L., et al, 1986; Whipp В.Ј., 1989; Poole, D.C., et al, 2021; Keir D.A., et al, 2022), а также множество косвенных методов и их модификаций для определения различных физиологических состояний человека, тесно взаимосвязанных с АнП.

1.5.1. Основные методы определения АнП с измерением лактата крови.

1.5.1.1. Метод «перекреста касательных»

На рисунке Рис. 1.5. проиллюстрирован метод Wasserman К. и сотр. (1964), в котором анаэробный порог соответствует пересечению касательных к ветвям медленного и быстрого линейного нарастания концентрации лактата в капиллярной крови (Wasserman К., Mcillroy M., 1964; Wasserman К., et al, 1964).



Рисунок 1.5. Пример определения АнП методом «перекреста касательных» (Wasserman K. et al., 1964). *Переработано.*

По мнению Beaver W.L. (1985), для более точного определения АнП этому методу требуется модификация в виде логарифмирования осей графика зависимости «мощность – концентрация лактата».

1.5.1.2. АнП, соответствующий уровню концентрации лактата 4.0 ммол/л

Концепция анаэробного порога, соответствующего концентрации лактата 4.0 ммол/л, впервые была предложена Mader A. et al. (1976). Авторы предложили «пороговое значение лактата 4 ммоль/л», но ~~не существовало~~ в качестве оценки интенсивности циклической работы (мощности или скорости), которая соответствует максимально возможной устойчивой концентрации лактата (см. Рис. 1.6.) (Wackerhage H., et al, 2022). Позже термин «максимально возможная устойчивая концентрация лактата» (MLSS) предложили Neck H. et al. (1985).

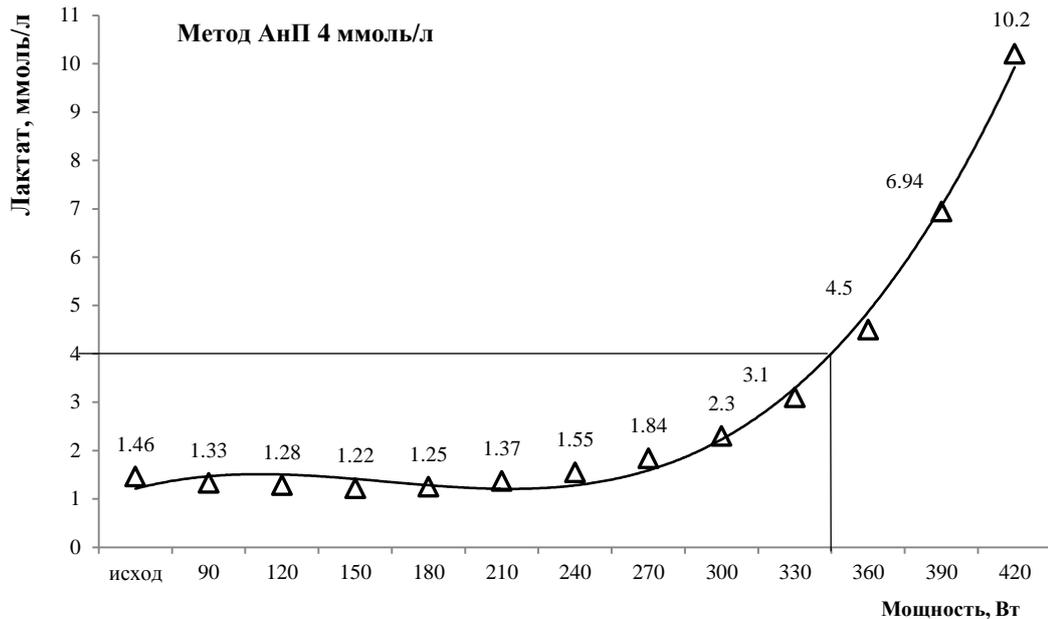


Рисунок 1.6. Пример определения анаэробного порога по концентрации лактата 4.0 ммол/л (Mader A. et al., 1976). Переработано.

У тренированных на выносливость спортсменов, при одинаковой стандартной нагрузке накапливается меньше лактата, чем у нетренированных. Это позволяет рассматривать анаэробный порог, соответствующий концентрации лактата 4.0 ммол/л, как критерий для оценки работоспособности. Но интенсивность нагрузки, соответствующая концентрации лактата 4.0 ммол/л, может значительно отличаться от индивидуального анаэробного порога, т.к. начало ускоренного возрастания лактата фиксируется у разных людей при разных концентрациях.

1.5.1.3. Метод «касательной»

Stegmann H. et al., (1981) предложили метод для определения индивидуального АнП в тестировании с равномерным повышением нагрузки, в котором АнП соответствует точке касания прямой к тренду динамики лактата (рассчитанному методом наименьших квадратов). Прямая проводится из точки измерения лактата в восстановительном периоде, в

которой концентрация лактата равна концентрации в конце теста (см. Рис. 1.7.).

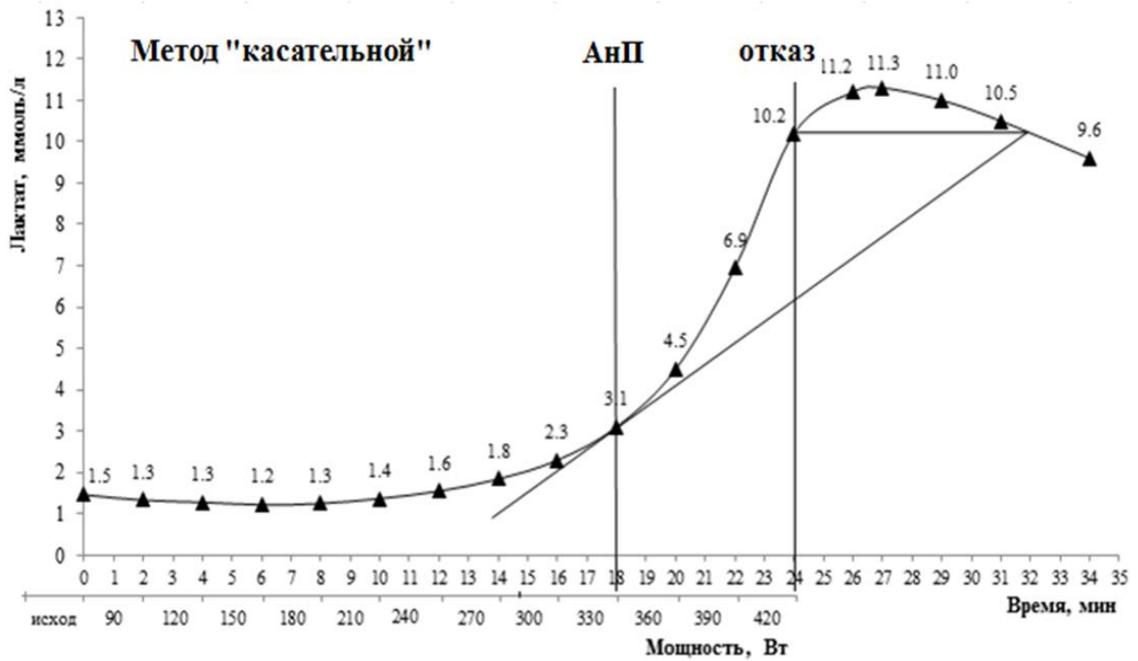


Рисунок 1.7. Пример определения АнП методом «касательной» (Stegmann H et al., 1981). Переработано.

По мнению авторов, такой метод может применяться в субмаксимальных тестах с повышением нагрузки.

1.5.1.4. Метод «Dmax»

На Рис. 1.8. представлена графическая иллюстрация метода Dmax, в котором АнП соответствует точке на тренде (полином 3 степени) динамики концентрации лактата, максимально удаленной от прямой линии, соединяющей исходную и конечную «точки» на графике из данных измерения лактата (Cheng B., et al, 1992).

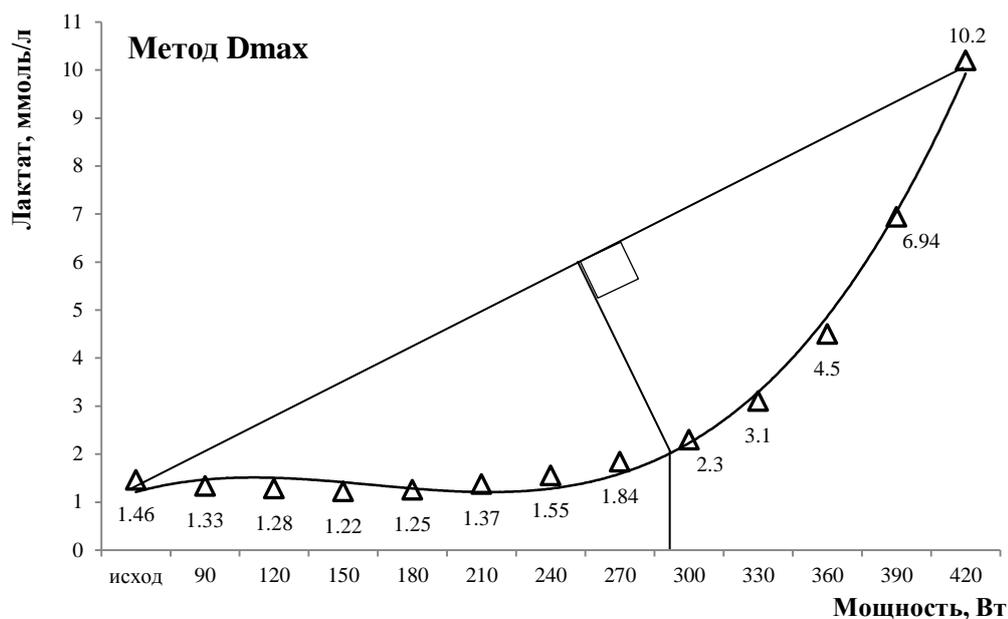


Рисунок 1.8. Пример определения АНП методом Dmax (Cheng B. et al., 1992).
Переработано.

Этот метод считается, наиболее стандартным и информативным для определения АНП по концентрации лактата (Nicholson R. M., Sleivert G. G., 2001; Czuba, et al, 2009; Heuberger JAAC, et al, 2018).

1.5.2. Основные традиционные неинвазивные методы для определения АНП, распространенные в практике тестирования спортсменов

1.5.2.1. Определение АНП по показателям газообмена и легочной вентиляции

АНП, который определяется в инкрементном тесте на основе анализа зависимости динамики газообменных характеристик или легочной вентиляции от интенсивности работы или от потребления кислорода, ассоциируют со вторым вентиляционным порогом - VT_2 (Ronald K. B., et al, 2008) или точкой компенсации дыхания (RCP) (Nakahara H., et al, 2020; Stefanov L.G., 2022), которые соответствуют значению скорости потребления кислорода или мощности/скорости.

Для определения VT_2 или RCP фиксируется начало гипервентиляции или непропорционально быстрое увеличение скорости выделения CO_2 и др. показателей газообмена по сравнению с VO_2 , при снижении уровня $P_{ET}CO_2$ (Keir D.A., et al. 2022) (см. Рис. 1.9.).

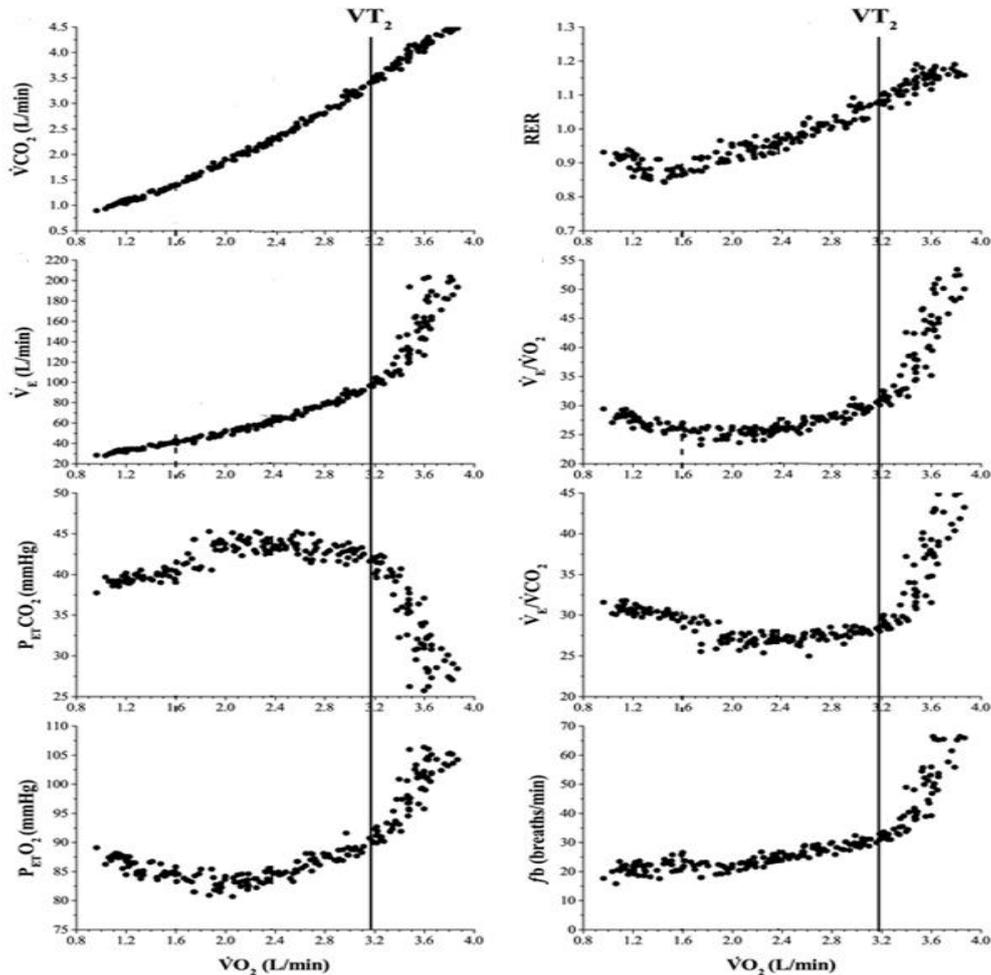


Рисунок. 1.9. Динамика характеристик газообмена и легочной вентиляции в зависимости от потребления кислорода (VO_2), которые используются для определения VT_2 во время теста с повышением нагрузки.

VCO_2 – скорость экскреции углекислого газа, VE – минутная вентиляция, VE/VCO_2 и VE/VO_2 –вентиляционные эквиваленты скорости экскреции CO_2 и VO_2 , соответственно, RER – коэффициент респираторного обмена, $P_{ET}CO_2$ и $P_{ET}O_2$ – парциальное давление в конце выдоха для CO_2 и O_2 соответственно, fb – частота дыхания (Keir D.A., et al. 2022) Вертикальные линии, пересекающие на рисунке абсциссу каждого графика, соответствуют скорости потребления кислорода (VO_2), на которой фиксируется VT_2 .
Переработано.

АнП с помощью анализа газообменных характеристик обычно определяется визуально - с помощью экспертной оценки, или методом V-образного наклона (V-slope) - на основе регрессионного анализа изменения наклона VCO_2 в зависимости от VO_2 . Регрессионным анализом определяется

начало избыточного выхода CO_2 , генерируемого в результате буферизации H^+ (см. Рис. 1.10.).

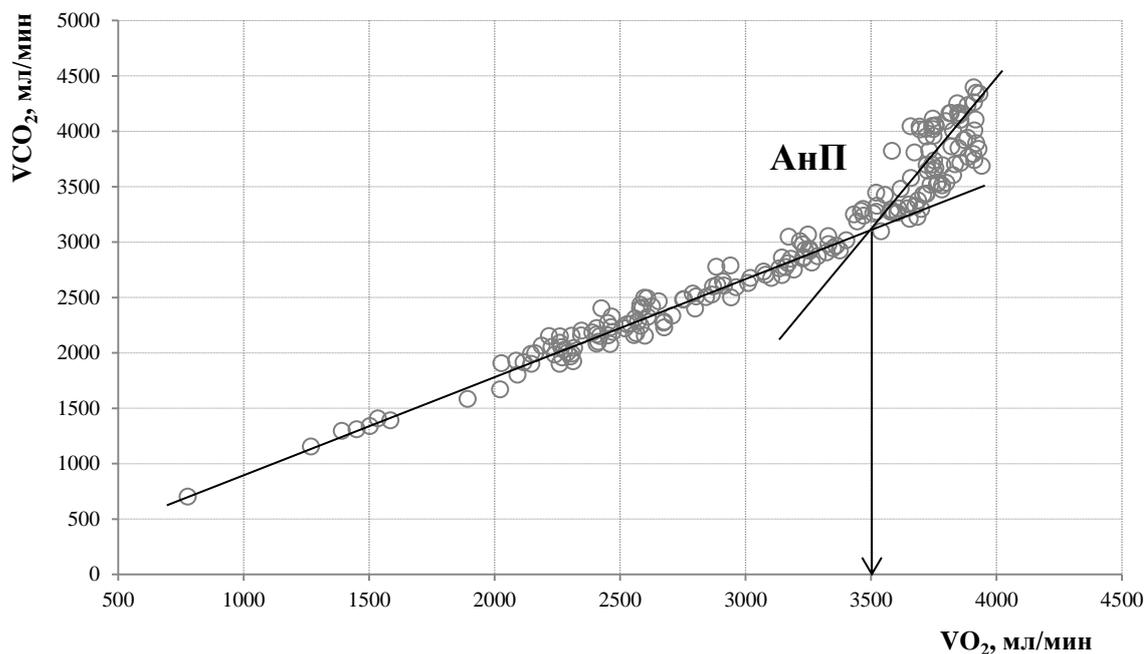


Рисунок 1.10. Пример определения АнП (порога газообмена) методом V-slope в тестировании с повышением нагрузки (Beaver W.L., et al. 1986). Переработано.

V-slope рассчитывается с помощью математического алгоритма, определяющего пересечение двух прямых линий, которые наиболее соответствуют общему набору данных VCO_2 . Авторами установлено, что V-slope может определяться ниже точки компенсации дыхания (RCP).

1.5.3. Основные альтернативные неинвазивные методы для определения АнП, применяемые в практике тестирования спортсменов

1.5.3.1. Определение АнП с помощью измерения ЭМГ- активности

Исследователи Moritani T. et al. (1980, 1981) одни из первых сопоставили ЭМГ-активность мышц с достижением АнП (Moritani T., 1980; Nagata A, et al, 1981).

В этом исследовании изучалось потенциальное использование миоэлектрического сигнала для определения АнП. Авторы сделали вывод, что анализ миоэлектрических сигналов, отражающих частоту

рекрутирования и разрядки двигательных единиц, может обеспечить неинвазивную оценку АП, установленного на зависимости динамики концентрации лактата от мощности инкрементной нагрузки.

Подходы Moritani Т. основаны на сопоставлении АП с нелинейным повышением ЭМГ-активности непосредственно участвующих в работе мышц, которое происходит из-за включения в работу новых быстрых двигательных единиц, в ответ на равномерное повышение нагрузки.

На Рис. 1.11. (А) пример из исследования Latasa, I. et al. (2019): определение у спортсмена ЭМГ- порога ($ЭМГ_{T_2}$) по зависимости динамики абсолютных данных ЭМГ от мощности работы с использованием метода линейной регрессии. $ЭМГ_{T_2}$ далее сопоставлялся с газообменным порогом. Авторы не выявили значимых различий между значениями мощности, соответствующими $ЭМГ_{T_2}$ и V_{T_2} ($p > 0,05$).

На Рис. 1.11. (Б) пример определения ЭМГ – порога по зависимости динамики относительных данных ЭМГ от мощности работы (Попов Д. В. и др., 2019). Сопоставление полученного у испытуемых ЭМГ – порога с АП, соответствующем концентрации 4 ммоль/л лактата в крови ($ЛП_4$), показало, что ЭМГ – порог не информативен для определения $ЛП_4$.

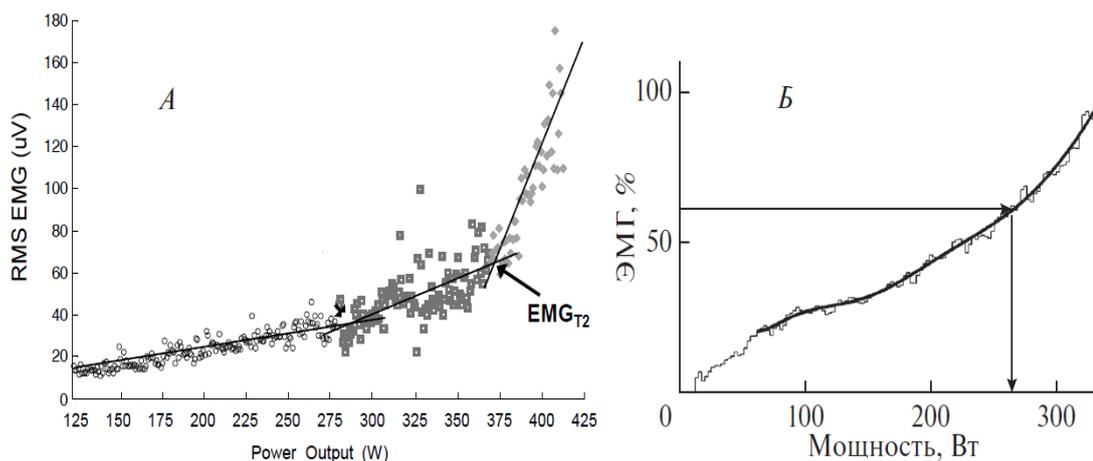


Рисунок. 1.11. Пример определения АП по динамике данных ЭМГ- активности *m. vastus lateralis* с помощью усилителя CP511 (Grass Telefactor, США) и стандартных накожных Ag/AgCl электродов в тестировании с повышением нагрузки. А - Latasa, I. et al. (2019), Б - Д.В. Попов и др. (2019). Переработано.

По мнению авторов, момент нелинейной активации данных ЭМГ в ответ на равномерное повышение нагрузки возможно зафиксировать не всегда. Это подтверждается исследователями (Taylor A.D., Bronks R., 1995; Hug F., et al, 2006). Кроме того, такой метод определения ЭМГ – порога демонстрирует низкую воспроизводимость при повторных измерениях, что подтверждается Hopkins W.G. et al. (2001).

1.5.3.2. Определение АнП с помощью спектроскопии ближнего инфракрасного диапазона

Д.В. Попов и др. (2019) для «уточнения» соответствия ЭМГ – порога с ЛП₄ применили инфракрасный спектрометр с использованием показателя содержания деоксигемоглобина в мышце - *ННб* (индекс, характеризующий экстракцию O₂ мышцей) (см. Рис. 1.12.).

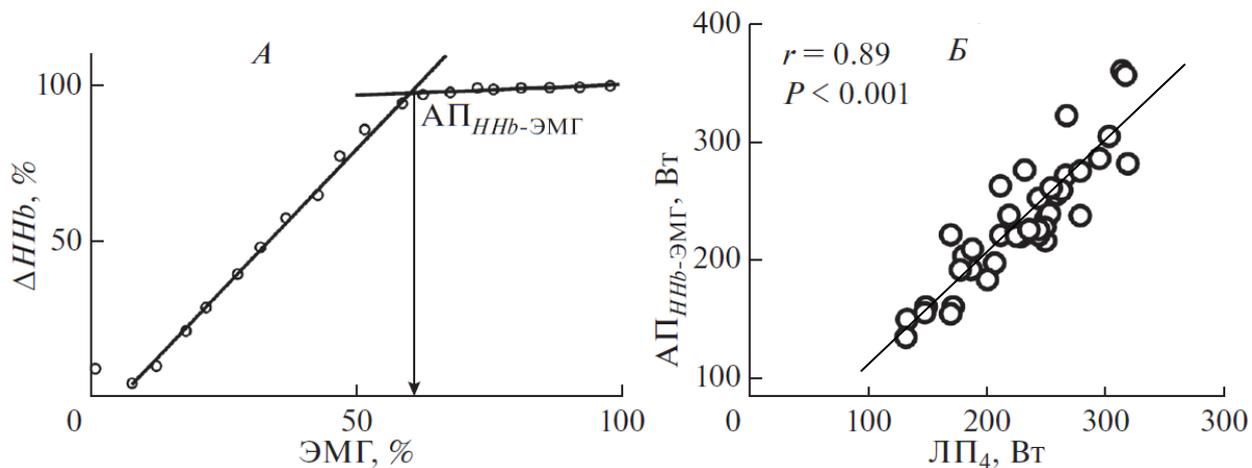


Рисунок. 1.12. Пример определения АнП (ЛП₄) по данным ЭМГ с использованием инфракрасного спектрометра NIRO-200 (Hamamatsu Photonics К.К., Япония) в тестировании с повышением нагрузки (Попов Д.В. и др., 2019).

На Рис. 1.12. А пример определения у спортсмена мышечного *ННб*-ЭМГ-порога ($AP_{ННб-ЭМГ}$) по зависимости динамики относительного прироста *ННб* от относительных данных ЭМГ с использованием метода линейной регрессии. $AP_{ННб-ЭМГ}$ спортсменов из группы испытуемых далее сопоставлялся с их ЛП₄. Выявлена тесная взаимосвязь $AP_{ННб-ЭМГ}$ с ЛП₄ (см.

Рис. 1.12. Б) и хорошая воспроизводимость результатов метода в повторных тестированиях (Попов Д. В. и др., 2019; Tatiane P., et al, 2020).

Интерес к спектроскопии ближнего инфракрасного диапазона (NIRS) не утихает, т.к. NIRS позволяет неинвазивно и непрерывно проводить локализованные измерения насыщения мышц кислородом (SmO_2) (Belardinelli, R., et al, 1995; Numaoka, T., et al, 2011; Bhambhani, Y. N., et al, 1997; Grassi B., et al, 1999, Grassi B., et al, 2003; Wang, L, et al, 2006; Soller B.R., et al, 2008; Racinais S, et al, 2014; Perrey S. and Ferrari M, 2018; Aldo A Vasquez Bonilla et al, 2023).

Методы NIRS основываются на оценке поглощающих и рассеивающих свойств определенного объема ткани во время подачи света в ткань через поверхность кожи (в диапазоне волн 650-900 нм) (Yodh A., Chance B. 1995).

По измеренному спектру поглощения света оцениваются концентрации оксигемоглобина (HbO) и дезоксигемоглобина (HbR) в ткани. Оксигенация мышц (SmO_2) при этом рассчитывается как отношение HbO к общей концентрации гемоглобина (HbT).

В настоящее время в спортивной науке используются беспроводные портативные устройства для измерения SmO_2 . В исследовании Perrey S., Ferrari M., (2018) оксигенация мышечных волокон четырехглавой мышцы бедра измерялась с помощью портативного устройства Humon Beta (Dynametrics, Inc.) и специального программного приложения у испытуемых на велоэргометре. Было обнаружено тесное соответствие между порогом, оцененным по SmO_2 с помощью Humon Beta и ЛП₄ (Perrey S., Ferrari M., 2018).

В исследовании Aldo A Vasquez Bonilla et al., (2023) для оценки локального насыщения мышц кислородом (SmO_2) использовали прибор для спектроскопии ближнего инфракрасного диапазона с частотой дискретизации 1 Гц (MOXY, Fortiori Design LLC, США) у спортсменов на велоэргометре во время теста с повышением нагрузки. MOXY прикреплялся к нижней части широчайшей боковой мышцы правой ноги у испытуемых.

Целью исследования была оценка метаболических зон по SmO_2 с определением вентиляционных порогов (VT_1 и VT_2) (Vasquez Bonilla A.A., et al, 2023).

Результаты исследования показали, что изменение SmO_2 в зависимости от повышения нагрузки, измеренное с помощью MOXY, может быть дополнительным физиологическим параметром для определения перехода от более аэробной нагрузки к более анаэробной, поскольку изменение SmO_2 происходит аналогично пороговым изменениям от VT_1 к VT_2 .

1.5.3.3. Методы определения АП по вариабельности ритма сердца

АП_{ВРС} впервые представлен J.R.P. Lima и M.A.P. Kiss в 1999 году и в дальнейшем получил широкое распространение в спортивной науке (Queiroz, 2017, Novelli, 2019, Shiraishi, 2018).

Метод определения АП по вариабельности ритма сердца (АП_{ВРС}) в тесте с повышением нагрузки основан на анализе динамики различных показателей вариабельности ритма сердца (SD1, RMSSD и др.), рассчитанных по продолжительности RR-интервалов. АП_{ВРС} соответствует диапазону перехода от преимущественно парасимпатической к симпатической регуляции ЧСС, который происходит по мере повышения нагрузки. Показатели ВРС при этом изменяются и в разной степени информативности могут отражать эти процессы (Queiroz, 2017, Novelli, 2019, Shiraishi, 2018).

В России данный метод известен благодаря исследованию Селуянова В.Н. и соавт. (2011). Авторы сопоставляли VT_2 (VE/VO_2) спортсменов с АП_{ВРС}, который определялся по показателю SD1, рассчитанному по вариативности RR-интервалов за последние 30 с в каждой ступени нагрузки. Для измерения вариативности RR-интервалов использовался кардиомонитор POLAR 810. В начале тестирования динамика SD1 у спортсменов экспоненциально снижалась с повышением мощности нагрузки

(см. Рис. 1.13.), затем стабилизировалась на уровне приблизительно $\leq 2\text{ms}$ (около 70% от МПК).

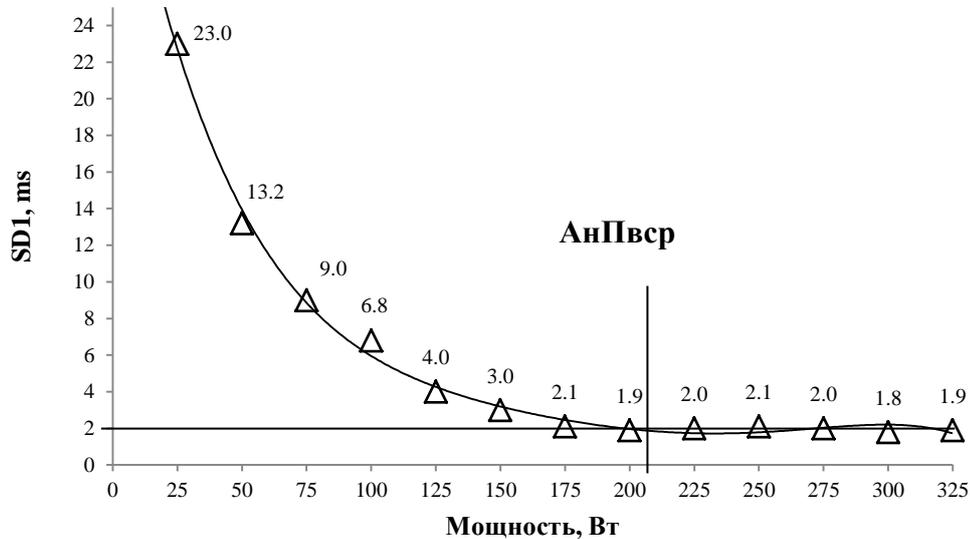


Рисунок 1.13. Пример определения $АнП_{ВРС}$. Сплошная — Горизонтальная прямая показывает уровень стабилизации $SD1 \leq 2\text{ ms}$, вертикальная прямая показывает мощность, соответствующую началу стабилизации $SD1 \leq 2\text{ ms}$ (Селуянов В.Н. и др., 2011). Переработано.

Мощность, на которой динамика $SD1$ стабилизировались, принималась за $АнП_{ВРС}$. Авторы выявили тесные взаимосвязи между $АнП_{ВРС}$ и VT_2 , но мощности на этих порогах значимо различались. Для того, чтобы $АнП_{ВРС}$ более точно соответствовал уровню VT_2 , мощность корректировалась с помощью формулы регрессии.

В исследовании F.I. Novelli et al. (2019) изучалась воспроизводимость $АнП_{ВРС}$, установленного у испытуемых по нескольким показателям ВРС. Лучшую воспроизводимость показал $АнП_{ВРС}$, который соответствовал значению времени в тесте с повышением нагрузки, при котором динамика $SD1$, рассчитанная по стандартному количеству RR-интервалов за последовательные промежутки рабочего времени стабилизировалась на уровне $< 3\text{ ms}$ (см. рис. 1.13.).

Метод Novelli F.I. и et al. (2019) в основном повторяет подход Селуянова и соавт. (2011) и подтверждает полученные ими результаты.

АнП_{ВРС} возможно определять в субмаксимальных тестах. Shiraishi (2018) и Gronwald (2020) определяли АнП по другим показателям ВРС в режиме реального времени, используя дополнительное программное обеспечение. Однако, в субмаксимальном тестировании уровень стабилизации SD1 может определяться недостаточно корректно, т.к. специалисты недополучают при этом данные для анализа динамики SD1.

1.5.3.4. Термографический метод определения АнП

В 1970-е годы появились медицинские инфракрасные (ИК) тепловизоры, которыми можно автоматически рассчитывать среднюю температуру определенных участков кожи и фиксировать температурные изменения в режиме реального времени. В спортивной науке ИК-исследования проводятся сравнительно недавно. В 2010 г. Акимов, Сонькин и др. представили результаты исследования, в котором изучались взаимосвязи кожной температуры испытуемых в состоянии покоя с показателями их аэробной производительности, которые устанавливались в предельном тесте с повышением нагрузки (Акимов Е. Б. и др., 2010).

Для измерения температуры использовали инфракрасный тепловизор Nec TN 9100SL. Авторы выявили положительные взаимосвязи ($p < 0.05$) минимальной и средневзвешенной температуры спины с VO_2 на уровне АнП и с относительной величиной МПК. Разница между минимальной и максимальной температурой спины отрицательно коррелировала с VO_2 на уровне АнП и с относительной величиной МПК и положительно коррелировала с уровнем лактата в крови после предельной работы с повышением нагрузки.

Также было установлено, что во время регионального острого холодового воздействия у испытуемых происходит снижение концентрации лактата в периферической крови при повышении температуры отдельных

участков кожи, что по мнению авторов может свидетельствовать об активации термогенных структур, расположенных под кожей.

В 2011 г. Акимов Е. Б., Сонькин В.Д. изучали изменение теплового состояния организма у спортсменов во время работы с повышением нагрузки до отказа, измеряя температуру кожи лба тепловизором Nec TH 9100SL (Акимов Е.Б., Сонькин В.Д., 2011). В этом исследовании впервые был установлен феномен резкого устойчивого изменения кожной температуры после достижения у испытуемых лактатного порога на уровне 4 ммоль/л (ЛП₄), вплоть до отказа от продолжения работы с повышением нагрузки. У 2/3 испытуемых температура значительно повышалась, у остальных температура значительно понижалась (см. Рис. 1.14.).



Рисунок 1.14. Динамика концентрации лактата и температуры кожи в двух группах испытуемых во время работы с повышением нагрузки. Горизонтальная линия показывает уровень лактата 4 ммоль/л в крови.

Сплошная кривая с квадратными маркерами характеризует динамику лактата у 1 группы. Пунктирная кривая с треугольными маркерами характеризует динамику лактата у 2 группы. Сплошная кривая без маркеров характеризует динамику температуры у 1 группы. Пунктирная кривая без маркеров характеризует динамику температуры у 2 группы (Акимов Е., Сонькин В.Д., 2011).

Различная направленность изменения динамики температуры после достижения у испытуемых ЛП₄, свидетельствует о возможности существования двух различных стратегий срочной адаптации системы терморегуляции к напряженной мышечной работе.

Наконец, в 2014 г. Сонькин В. Д. и соавт. провели исследование, в котором изучались взаимосвязи кожной температуры спины и шеи и концентрации лактата и глюкозы в крови в зависимости от повышения нагрузки до отказа испытуемого от продолжения работы (Son'kin V.D. et al, 2014).

Установлено: в диапазоне нагрузки от начала работы в тесте до достижения индивидуального АнП температура взаимосвязана с концентрацией лактата умеренно и отрицательно, а в диапазоне нагрузки выше АнП до отказа – сильно и положительно. Между динамикой концентрации глюкозы и кожной температурой взаимосвязей выявлено не было. У всех испытуемых в этом исследовании повышение уровня лактата предшествует повышению уровня кожной температуры.

Разработка метода для определения АнП с помощью термографических измерений не являлось целью в этом исследовании. Авторы предполагали и нашли подтверждение тому, что в утилизации лактата и стабилизации гомеостаза человека во время напряженной мышечной работы помимо известных физиологических систем активно участвуют термогенные структуры организма.

Термографический метод пригоден только для приближенной оценки АнП.

1.5.3.5. Метод определения АнП по динамике ЧСС (метод Конкони)

В 1982 г. Ф. Конкони и соавт. представили метод, в котором АнП определяется по отклонению ЧСС от прямолинейной зависимости между ЧСС и скоростью бега, при ее равномерном повышении (Conconi F. et al, 1982). Исследование проводили в два этапа. На первом этапе

устанавливалась скорость, на которой произошло отклонение ЧСС от линейного повышения в ответ на нагрузку у 210 хорошо тренированных бегунов. Тест проводился на 400-метровой легкоатлетической дорожке и начинался со скорости бега 12-14 км/ч (в зависимости от уровня подготовки испытуемого), которая повышалась в среднем на 0,5 км/ч при прохождении каждые 200 метров вплоть до невозможности дальнейшего произвольного увеличения скорости испытуемым. Скорость (V_d), на которой происходило отклонение ЧСС от линейной зависимости, определяли графическим способом при помощи экспертной оценки.

Лактатный порог по методике Конкони определяли у 10 испытуемых нетрадиционным графическим способом (см. рис. 1.15.): в системе координат, где x – скорость бега, а y – концентрация лактата, через 4 точки (покой и три точки на скоростях бега ниже скорости, соответствующей отклонению ЧСС) проводили прямую линию. Далее, через три точки выше скорости отклонения ЧСС проводили вторую прямую. Проекция точки пересечения двух прямых на ОУ считается авторами лактатным порогом (ЛП, км/час).

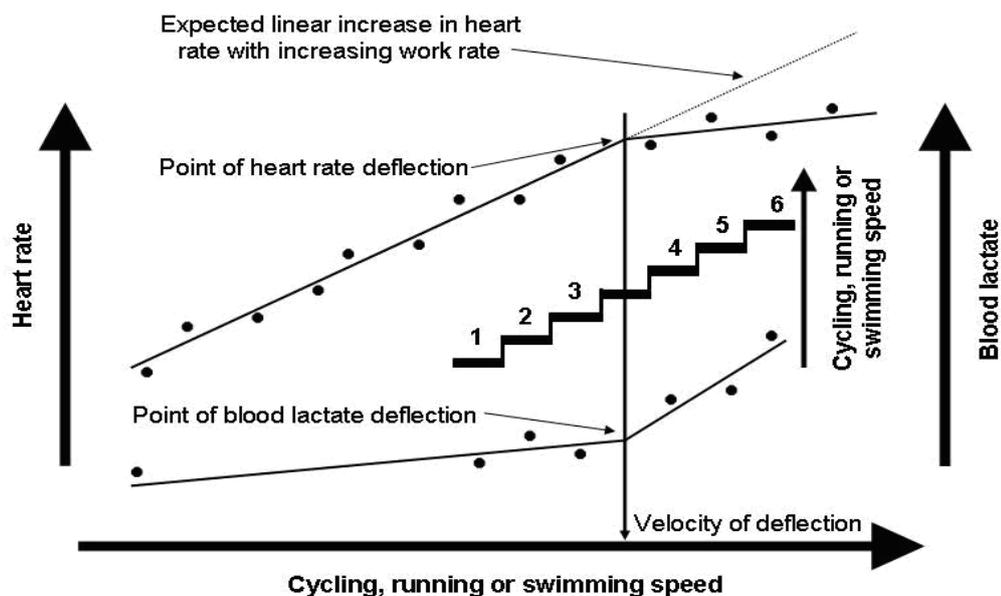


Рисунок 1.15. Диаграммное представление теста Конкони. (Conconi F. et al., 1982). Пояснения в тексте.

Выявлена очень высокая взаимосвязь между скоростью отклонения ЧСС и скоростью на ЛП ($r=0,99$). Это позволило авторам сделать вывод, что скорость отклонения ЧСС соответствует АП.

Метод, описанный Conconi F. et al. (1982), подвергается критике многочисленными авторами с 80-х годов, считающими его недостаточно точным и не вполне пригодным для работы со спортсменами (Bodner, 2000, Hnízdil et al., 2019).

По мнению многих авторов, парадигма Конкони, основанная на зависимости динамики рабочей ЧСС от интенсивности нагрузки, не обеспечивает надежного определения АП. Во многих случаях точка отклонения либо не определяется, либо находится выше или ниже уровня АП (Kuipers H., et al, 1988; Thorland W., 1994; Walker J., Eisenman P., 1995; Jones, A.M., Doust J.H., et al, 1995, 1997; Vachon J.A., et al, 1999).

1.5.3.6. Критическая мощность

В 1965 г. Моно и Шеррер предложили модель для определения «критической мощности» (СР), которая описывает максимально возможную продолжительность упражнений при их предельной постоянной интенсивности (мощности или скорости). СР при этом определяется как степенная асимптота гиперболической зависимости между мощностью и временем до истощения (Monod H, Scherrer J., 1965).

Poole D.C. et al. (2016) преобразовали зависимость мощности упражнения от его продолжительности из гиперболической в линейную (см. Рис. 1.16.).

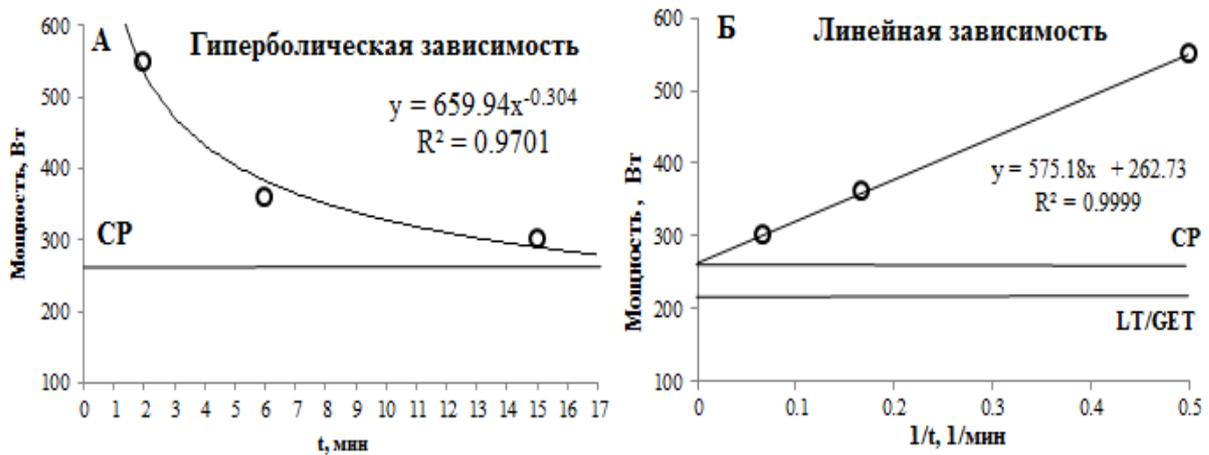


Рисунок 1.16. Зависимость предельной средней мощности от максимальной продолжительности работы. А. Гиперболическая форма зависимости. Б. Линейная зависимость. Горизонтальная прямая с обозначением CP – уровень критической мощности; горизонтальная прямая с обозначением LT/GET – уровень индивидуального лактатного порога или газообменного порога (Poole D.C. et al., 2016). Переработано.

В практике спорта для расчета адекватных значений CP используются упражнения, продолжительность которых составляет от 2 до 15 мин.

Прямая, характеризующая зависимость между мощностью и временем до истощения, пересекается с ОУ в значении, соответствующем CP.

CP можно рассматривать как «порог утомления» в том смысле, что CP разделяет области интенсивности упражнений, в пределах которых физиологические реакции организма на нагрузку могут (при $< CP$) или не могут (при $> CP$) стабилизироваться. Порог CP находится по уровню мощности примерно посередине между лактатным порогом (LT) или порогом газообмена (GET) и максимальной мощностью, достигаемой в тестировании с равномерным повышением нагрузки (Poole D.C., et al., 2016). GET при этом определяется как значение VO_2 по точке отклонения от линейного хода зависимости VCO_2 от VO_2 (Kominami K., et al., 2021) с использованием метода V-образного наклона (Beaver W.L. et al., 1986).

Однако как LT и GET, так и CP могут широко варьироваться у разных людей в зависимости от состояния здоровья или тренированности. В частности, LT / GET и CP фиксируют соответственно на 50-65% и 70-80% от МПК у здоровых молодых испытуемых. У хорошо тренированных людей

LT/GET и CP могут достигать приблизительно на 70-80% и 80-90% от МПК соответственно.

По мнению Jones AM et al. (2019) и Galán-Rioja MÁ et al. (2020), независимо от наличия тесных взаимосвязей между CP и вентиляционными или метаболическими порогами, CP от них значительно отличается. Ни максимально возможный устойчивый уровень лактата (MLSS), ни газообменный порог, не следует считать синонимом CP (Jones A.M. et al., 2019; Galán-Rioja M.Á. et al., 2020).

Хотя CP представляется концептуально обоснованным при определении наивысшей интенсивности работы в устойчивом состоянии, существуют неопровержимые доказательства того, что CP значительно превышает интенсивность MLSS (Dotan R., 2022).

Сложность метода в том, что для определения CP спортсмену необходимо выполнять минимум три предельных упражнения, при этом точность расчета CP зависит от степени «предельности» работы в каждом упражнении.

1.5.3.7. Определение АИП с помощью RPE

Используя шкалу оценки **RPE** - CR100 возможно определять АИП. Fabre N. et al. (2013) в своем исследовании проверяли гипотезу о том, что индивидуальный лактатный порог можно определять методом D_{MAX} по оценке воспринимаемой нагрузки (RPE) во время теста со ступенчатым повышением нагрузки до изнеможения. В этом исследовании, в конце каждой ступени нагрузки измерялась концентрация лактата, и участники оценивали RPE по шкале Borg CR100. Порог лактата ($D_{MAX}La$) и RPE ($D_{MAX}RPE$) определяли с использованием метода D_{MAX} (см. Рис. 1.17.).

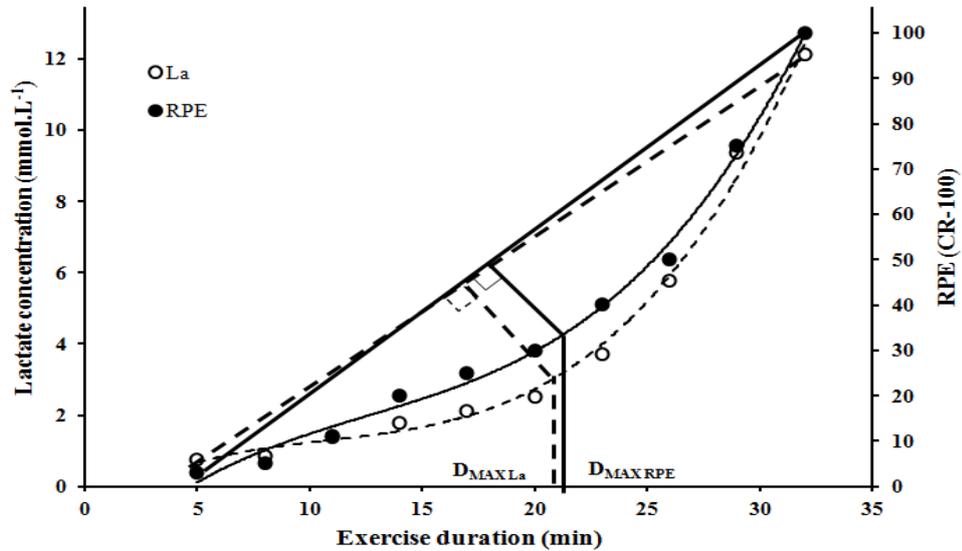


Рисунок 1.17. Пример определения АП методами D_{MAXLa} и D_{MAXRPE} (Fabre N. et al., 2013).

Шкала CR100 - не линейная, охватывает субъективные вариации оценки нагрузки от «никакой» до «максимальной» с промежуточными вербальными дескрипторами: минимальная (1,5-2 ед.), крайне слабая (2-4 ед.), очень слабая (4-8 ед.), слабая (8-17 ед.), умеренная (17-33 ед.), сильная (33-55 ед.), очень сильная (55-80 ед.), чрезвычайно сильная (80-100 ед.), максимальна (100 ед.).

Среднее значение RPE у испытуемых, соответствующее D_{MAXRPE} по шкале CR100, составило $35,3 \pm 11,8$ ед. или в среднем около 70% от времени отказа от продолжения работы в тесте.

VO_2 , ЧСС и выходная мощность, измеренные при D_{MAXRPE} и при D_{MAXLa} , не имели значимых отличий. Комбинация метода D_{MAX} с оценкой RPE позволила получить точные и индивидуальные оценки лактатного порога, рассчитанные методом D_{MAXRPE} .

Метод мало изучен и для использования нуждается в четкой «настройке» понимания спортсмена своего состояния в соответствии с вербальными дескрипторами шкалы.

1.6. Заключение по разделу

Традиционные газометрические измерения с контролем концентрации лактата в крови являются самыми информативными методами для

исследования физиологических реакций организма спортсмена в ответ на работу в различных режимах нагрузки. Однако, такие измерения требуют дорогостоящего оборудования, специального программного обеспечения, инвазивного вмешательства и специалистов–физиологов высокого уровня, что существенно сужает доступность этих методов контроля состояния спортсмена для тренировочного процесса.

Дифференцирование критических режимов работы по интенсивности и структуре энергозатрат, учет изменения этих характеристик работоспособности в стандартных упражнениях, может серьезно усовершенствовать оперативный функциональный контроль и эффективность тренировок.

Разработке этих методов контроля были посвящены в последние десятилетия многие исследования отечественных и зарубежных авторов. Однако, во всех этих случаях предлагаются инструменты, решающие частные проблемы оценки мышечной дельности в том или ином диапазоне мощности. Поиск информативных и простых методов контроля интенсивности и направленности тренировочной нагрузки ведется до сих пор.

Аэробно-анаэробный переход охватывает целый диапазон значений мощности, происходящих сдвигов показателей энергетического обмена и связанных с ним физиологических функций, и потому требует комплексного подхода для его определения (Ferguson B.S., et al, 2018).

Проведенный обзор обширной литературы по данному вопросу позволил нам сформулировать цели и задачи исследования (см. Введение, стр. 10), связанного с разработкой неинвазивных методов оценки физиологических параметров тренировочной нагрузки для спортсменов циклических видов спорта, в которых анаэробный порог играет ключевую роль в формировании тренировочной программы спортсмена.

ГЛАВА II. ОРГАНИЗАЦИЯ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1. Организация исследования и общий план проведения

экспериментальных исследований

Исследование проводилось на базе «ЦСТиСК» Москомспорта в период 2014-2023г. и включало 3 этапа (см. Таб. 2.1).

Таблица 2.1. Организация и этапы исследования

Этап исследования	Содержание этапа исследования
Термографический способ определения АнП	2014-2015 гг. Оценка возможности использования инфракрасной термографии для определения АнП: смешанная группа спортсменов (физ. активные мужчины, занимающиеся бегом, n=13). 1 группа испытуемых (здесь и далее см. Таб. 2.2.).
Графический метод расчета времени достижения анаэробного порога у спортсменов по динамике ЧСС в работе нарастающей мощности до отказа и восстановительном периоде	2017-2019 гг. Разработка пульсографического метода определения АнП в тесте с повышением нагрузки до отказа: смешанная группа спортсменов (бегуны, представители игровых видов спорта и единоборств, n=32), велосипедисты (n=14). Соответственно 2, 3 группа испытуемых. 2020-2022гг. Оценка информативности пульсографического метода определения АнП в зависимости от протоколов нагрузки и видов нагрузочных устройств: биатлонисты (n=18), футболисты (n=27), гребцы (n=19). Соответственно 4, 5, 6 группа испытуемых.
Метод расчета интенсивности физиологических затрат и структуры энергообеспечения при циклической работе различной мощности	2020-2023гг. Разработка и оценка информативности пульсометрических методов расчета интенсивности энергозатрат и структуры энергообеспечения для физических упражнений в диапазоне нагрузок от аэробного порога до максимальной анаэробной мощности: велосипедисты BMX и шоссейники (n=18). 7 группа испытуемых.

Программа исследования была одобрена Локальным биоэтическим комитетом «ЦСТиСК» (протокол №12 от 27.01.2020г).

Все спортсмены перед исследованием получали медицинское заключение о возможности проведения тестов с максимальными нагрузками, а также подписывали информированное согласие на участие в экспериментальных исследованиях. Всего в исследовании приняло участие 141 квалифицированных спортсменов. Возраст спортсменов составлял от 18 до 32 лет. Все испытуемые были мужского пола. Всего было проведено 985 антропометрических, эргометрических, физиологических измерений.

2.2. Испытуемые

Перед основными экспериментами, для определения максимальных функциональных показателей все испытуемые после антропометрических измерений выполнили тест с равномерным повышением нагрузки до отказа на нагрузочных устройствах наиболее соответствующих их специализации (см. Таб. 2.2):

- 1 группа (бывшие спортсмены, физически активные мужчины, занимающиеся бегом) – на беговом тредбане;
- 2 группа (смешанная группа: бегуны, биатлонисты, представители игровых видов спорта и единоборств) – на беговом тредбане;
- 3 группа (велосипедисты – ВМХ, шоссейники) – на велоэргометре;
- 4 группа (биатлонисты) – на лыжероллерном тредбане;
- 5 группа (футболисты) – на беговом тредбане;
- 6 группа (ребцы) – на эргометре для академической гребли;
- 7 группа (велосипедисты ВМХ и шоссейники) – на велоэргометре;

Таблица 2.2. Антропометрические и максимальные функциональные показатели участников 1-7 серий исследований по результатам инкрементного теста до отказа ($M \pm \sigma$)

Параметр	1 группа	2 группа	3 группа	4 группа	5 группа	6 группа	7 группа
	n = 13	n = 32	n = 14	n = 18	n = 27	n = 19	n = 18
Масса тела, кг	72±12	68±10	68±10	73±7	67±10	78±10	71,3±8,5
Длина тела, см	179±11	181±11	183±14	183±15	177±9	185±15	180±12
МПК, мл/мин/кг	56±8	58,9± 6,3	58,7± 8,7	67,3±9,0	57,9±4,5	60,7± 6,7	56,8±12,9
ЧСС _{max} , уд/мин	189±9	199±6	193±7	191±7	200±6	200±7	190±10
W _{max} , Вт/кг			4,71±0,81			4,95±0,6	4,64±0,5
V _{max} , км/ч	16,8±1,2	16,6±1,2		21,2±2,5	14,2±1,6		

Примечание: МПК – максимальное потребление кислорода, абсолютные значения; ЧСС_{max} – значение максимальной ЧСС, W_{max} – максимальная мощность, V_{max} – максимальная мощность.

2.3. Измерительные методы экспериментальных исследований

2.3.1. Антропометрические измерения

Проводили измерение длины тела (см) с помощью металлического антропометра Tanita (с точностью $\pm 0,1$ см) и массы тела (кг) с помощью электронных весов (Tanita с точностью $\pm 0,1$ кг).

2.3.2. Эргометрические измерения

1. Тестирование с повышением нагрузки до отказа от продолжения работы проводилось у разных групп спортсменов на различных нагрузочных устройствах в следующих протоколах нагрузки:

а) Смешанная группа спортсменов (1 группа) и *группа футболистов* (5 группа) выполняли непрерывную плавно повышающуюся нагрузку на беговом тредбане Woodway Pro XL (США) в «рамп» протоколе: начальная скорость 7 км/ч, повышение на 0,1 км/ч каждые 10 секунд, наклон 1%;

б) Велосипедисты (3, 6, 7 группа) выполняли непрерывную ступенчато повышающуюся нагрузку на велоэргометре Lode Excalibur sport (Нидерланды): мощность первой ступени 60 Вт, далее повышалась каждые 2 мин на 30 Вт, частота вращения педалей 70–75 оборотов в минуту;

в) Биатлонисты (4 группа) выполняли непрерывную ступенчато повышающуюся нагрузку на лыжероллерном тредбане: начальная скорость бегового полотна 9 км/ч, повышение нагрузки каждые 3 мин на 2 км/ч, наклон 3%;

г) Гребцы (6 группа) выполняли ступенчато повышающуюся нагрузку на гребном эргометре CONCEPT-2: мощность первой ступени 100 Вт, далее мощность повышалась каждые 2 мин на 50 Вт, по

окончанию каждой ступени в течении 30 секунд делался перерыв в работе для забора капиллярной крови.

Отказ во всех случаях фиксировали индивидуально по заявлению испытуемого или при явной невозможности поддерживать заданную интенсивность нагрузки.

2. Тестирование в серии упражнений на велоэргометре LODE Excalibur Sport с фиксированной продолжительностью 10, 30, 60, 120, 360, 1800, 7200 секунд (7 группа). Для определения функциональных характеристик работоспособности:

а) Предельные упражнения продолжительностью 10 с и 30 с выполнялись в режиме «во всю», предельные упражнения 60, 120 и 360 с выполнялись с установкой проявить наибольшую среднюю производительность.

б) Упражнения продолжительностью 1800 и 7200 с. выполнялись на мощности соответственно индивидуальным характеристикам А_{нП} и А_{эП}, определенным заранее.

Все упражнения выполнялись в разные дни, с отдыхом 1–2 дня между тестированиями. Непосредственно перед тестированием спортсмены проводили стандартную разминку.

2.3.3. Термографические измерения

Для регистрации термограмм использовалась инфракрасная камера матричного типа NEC TH – 9100 ($\pm 0,1$ градус), регистрирующая аппаратура (ноутбук со специальной программой).

Регистрацию динамической термограммы производили в режиме видеосъемки с частотой 4 кадра/с, при этом тепловизор располагался на высоте 1,4 м над уровнем пола на расстоянии 2 м от испытуемого, находящегося на тредбане. При обработке термограммы с помощью специализированного программного обеспечения Image Processor®

фиксируют текущую максимальную температуру выделенного участка кожи (рис.1).

Перед термографированием испытуемые проходили температурную адаптацию в течение 15 мин в изолированном помещении с температурой 21–22°C и влажностью 45%–50% в состоянии мышечного покоя, раздетые по пояс, в положении сидя. Измерения проводились в течение работы и 10 мин восстановления.

2.3.4. Методы физиологических измерений

Измерения проводились во всех группах испытуемых. Потребление кислорода ($\pm 1\%$), выделение углекислого газа ($\pm 1\%$) и легочную вентиляцию ($\pm 2\%$) регистрировали по 5-ти секундным интервалам времени с помощью газоанализатора Cortex Metalyzer 3B (Германия), который калибровали непосредственно перед проведением каждого исследования. ЧСС регистрировали по 5-ти секундным интервалам времени с помощью кардиомонитора Polar H10 (Финляндия). Измерения велись после прекращения разминки в рабочем положении. В течение 5 мин фиксировался предстартовый уровень функциональных показателей. Функциональные показатели фиксировались также во время выполнения работы и по окончании упражнения, в процессе восстановления, в течение которого испытуемый оставался в исходном рабочем положении 10 мин.

2.3.5. Методы биохимических измерений в крови

Во всех группах испытуемых концентрацию лактата в отобранных пробах капиллярной крови определяли на автоматическом анализаторе Biosen C-Line (EKF-diagnostic GmbH., Германия).

Кровь для определения концентрации лактата брали из дистальной фаланги безымянного пальца кисти непосредственно перед каждым

тестированием, во время работы (только в тестах с повышением нагрузки), сразу после его завершения и далее на 3, 5, 7, 10 мин после окончания работы. Во время тестирования на беговом тредбане кровь брали каждые 3 минуты, во время тестирования на велоэргометре - каждые 2 минуты, в конце ступени нагрузки. Во время тестирования на лыжероллерном тредбане кровь брали каждые 3 минуты в конце ступени нагрузки.

2.4. Расчетные и вычислительные методы

2.4.1. Эргометрические расчеты

Расчет мощности и скорости в ступенчатых протоколах

Если в тестированиях, в которых нагрузка повышалась по «ступенчатому» протоколу, спортсмен не всегда был способен отработать с заданной интенсивностью до конца «ступени», то за максимальную мощность (W_{max}) принимали расчетное значение:

$$W_{max} = W_{n-1} + (W_n - W_{n-1}) \times t_n / t_{n-1}, \quad (\text{ф. 1}).$$

где W_n – средняя мощность последней ступени (Вт); W_{n-1} – средняя мощность предпоследней ступени (Вт); t_n – время работы на последней ступени (мин); t_{n-1} – заданное время работы на ступени. Максимальную скорость (V_{max}), а также мощность и скорость, соответствующие АНП, рассчитывали так же (Попов Д. В. и др., 2014).

Расчет внешней физической нагрузки

$ВН$ – внешняя физическая нагрузка в упражнении (кДж/кг):

$$ВН = t_{упр} \times W_{упр} \times 60 / 1000, \quad (\text{ф. 2}), \text{ где}$$

$t_{упр}$ – время работы в упражнении (с);

$W_{упр}$ – средняя относительная мощность упражнения, Вт/кг;

2.4.2. Расчеты по данным газообмена, ЧСС и лактата

2.4.2.1. Определение момента достижения АИП и соответствующих эргометрических и физиологических показателей по данным газообмена и лактата

АИП определяли разными способами: 1) по резкому росту уровня легочной вентиляции ($АИП-V\dot{E}$), 2) по резкому росту неметаболического излишка углекислого газа ($АИП-ExsCO_2$), при $ExsCO_2 = V\dot{CO}_2 - ДКпокоя \times V\dot{O}_2$, 3) по резкому росту накопления лактата в капиллярной крови ($АИП-La$) (Wasserman K., et al, 1999). $АИП-La$ определяли методом D-max (Cheng B., et al, 1992). Метод был выбран для стандартизации расчетных процедур, основываясь на выводах, сделанных в работах R. M. Nicholson, et al, 2001; Czuba, et al, 2009.

2.4.2.2. Расчеты по параметрам кислородного запроса

$IУ_{O_2}$ - исходного уровень потребления кислорода в состоянии относительного покоя перед стартом (л/мин).

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

$$КЗ = КП + КД \quad (\text{ф. 3}), \text{ где:}$$

$КП$ – кислородный приход (л) – объем потребленного кислорода сверх исходного уровня, рассчитанный за время работы в упражнении;

$КД$ – кислородный долг упражнения (л) – объем потребленного кислорода сверх исходного уровня, рассчитанный за 10 мин восстановления;

$СОКЗ$ – скорость образования кислородного запроса (л/мин), рассчитывалась как отношение кислородного запроса ко времени работы в упражнении ($t_{упр}$, мин):

$$СОКЗ = КЗ / t_{упр} \quad (\text{ф. 4}).$$

$УИФЗ_{O_2}$ – удельная интенсивность физиологических затрат по кислороду (у. ед.), рассчитывалась как отношение скорости образования кислородного запроса к индивидуальному уровню максимального потребления кислорода с вычетом $ИУ_{O_2}$ ($\Delta МПК$). Одна единица $УИФЗ_{O_2}$ соответствует уровню кислородного запроса, равного величине $\Delta МПК$:

$$УИФЗ_{O_2} = СОКЗ / \Delta МПК \quad (\text{ф. 5}), \text{ где:}$$

$\Delta МПК$ – индивидуальный максимум потребления кислорода за вычетом исходного уровня: разница между максимальным потреблением кислорода и $ИУ_{O_2}$ (л/мин).

$АнВ_{O_2}$ – вклад анаэробных процессов (%) в общем энергообеспечении работы рассчитывался по кислороду, как отношение кислородного долга к кислородному запросу:

$$АнВ_{O_2} = 100 \times КД / КЗ \quad (\text{ф. 6}).$$

$НЭ_{O_2}$ – нагрузочная экспозиция, внутренняя нагрузка в упражнении, рассчитанная по объемам потребленного O_2 (мин):

$$НЭ_{O_2} = t_{упр} \times УИФЗ_{O_2} \quad (\text{ф. 7}).$$

$HЭан_{O_2}$ – анаэробная часть нагрузочной экспозиции, рассчитанная по потреблению O_2 :

$$HЭан_{O_2} = A_n V_{O_2} \times HЭ_{O_2} \quad (\text{ф. 8}).$$

$ДН_{O_2}$ – доза воздействия нагрузки (кДж/кг), рассчитанная по объемам потребленного O_2 :

$$ДН_{O_2} = W_{упр} \times HЭ_{O_2} \times 60 / 1000 \quad (\text{ф. 9}).$$

$ДНан_{O_2}$ – анаэробная часть дозы воздействия физической нагрузки (кДж/кг):

$$ДНан_{O_2} = W_{упр} \times HЭан_{O_2} \times 60 / 1000 \quad (\text{ф. 10})$$

2.4.2.3. Расчеты по параметрам пульсового запроса

$ИУ_{чсс}$ – исходного уровень ЧСС в состоянии относительного покоя перед стартом (уд/мин).

$ПЗ$ – пульсовой запрос; суммарная пульсовая стоимость упражнения (уд), рассчитывалась как сумма пульсового прихода ($ПП$, уд) за время работы и пульсового долга ($ПД$, уд) за 5 мин восстановления:

$$ПЗ = ПП + ПД \quad (\text{ф. 11}), \text{ где:}$$

$ПП$ – пульсовой приход (уд) – пульсовая сумма сверх $ИУ_{чсс}$, рассчитанная за время работы в упражнении;

$ПД$ – пульсовой долг (уд) – пульсовая сумма сверх $ИУ_{чсс}$, рассчитанная за 5 мин восстановления;

$ПП$ можно рассчитывать как произведение продолжительности упражнения и средней ЧСС за это время. Результат такого упрощенного расчета при

регистрации данных с дискретностью 5 секунд, практически не отличается от расчета площади под кривой динамики рабочей ЧСС. Такой подход можно использовать и при расчете $ПД$, умножая время восстановления (5 мин) на среднюю ЧСС за этот промежуток времени.

$СОПЗ$ – скорость образования пульсового запроса упражнения (уд/мин), рассчитывался как отношение суммарной пульсовой стоимости упражнения ко времени работы в упражнении:

$$СОПЗ = ПЗ / t_{упр} \quad (\text{ф. 12}).$$

$УИФЗ_{чсс}$ – удельная интенсивность физиологических затрат по ЧСС за время работы в упражнении (у. ед.), рассчитывалась как отношение скорости образования пульсового запроса упражнения к пульсовому резерву ($\Delta ЧСС_{макс}$):

$$УИФЗ_{чсс} = СОПЗ / \Delta ЧСС_{макс} \quad (\text{ф. 13}), \text{ где:}$$

$\Delta ЧСС_{макс}$ – пульсовый резерв (уд/мин): разница между максимальной ЧСС (определяется в рамп-тесте) и $ИУ_{чсс}$ в упражнении.

$АнВ_{чсс}$ – вклад анаэробных процессов (%) в общем энергообеспечении работы рассчитывался по пульсовым суммам:

$$АнВ_{чсс} = 100 \times ПД / ПЗ \quad (\text{ф. 14}).$$

$НЭ_{чсс}$ – нагрузочная экспозиция, внутренняя нагрузка в упражнении, рассчитанная по пульсовым суммам (мин):

$$НЭ_{чсс} = t_{упр} \times УИФЗ_{чсс} \quad (\text{ф. 15}).$$

$HЭан_{чсс}$ – анаэробная часть нагрузочная экспозиции, рассчитанная по пульсовым суммам (мин):

$$HЭан_{чсс} = AnB_{чсс} \times HЭ_{чсс} \quad (\text{ф. 16}).$$

$ДН_{чсс}$ – доза воздействия нагрузки (кДж/кг), рассчитанная по пульсовым суммам:

$$ДН_{чсс} = W_{упр} \times HЭ_{чсс} \times 60 / 1000 \quad (\text{ф. 17}).$$

$ДНан_{чсс}$ – анаэробная часть дозы воздействия физической нагрузки, рассчитанная по пульсовым суммам:

(кДж/кг):

$$ДНан_{чсс} = W_{упр} \times HЭан_{чсс} \times 60 / 1000 \quad (\text{ф. 18}).$$

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

2.4.2.4. Расчет скорости накопления лактата

$СДЛа$ – скорость накопления лактата (ммоль/л/мин), рассчитывалась как отношение разницы между зафиксированной максимальной и исходной концентрацией лактата, ко времени работы в упражнении:

$$СДЛа = \Delta Ла / t_{упр} \quad (\text{ф. 19}).$$

2.4.3. Статистические методы

Статистический анализ данных проводился с помощью среды R (версия 3.5.1) и MS Excel. Нормальность распределения проверяли методом Шапиро-Уилка.

Для определения силы и характера взаимосвязи между показателями физиологических параметров физической нагрузки, рассчитанной по потреблению кислорода, концентрации лактата крови и ЧСС, использовался линейный и нелинейный регрессионный анализ с расчетом коэффициентов детерминации.

Для сравнения значений аналогичных показателей АнП, определенных методами газоанализа, с помощью динамики концентрации лактата, со значениями показателей АнП, полученного у одних и тех же спортсменов графическим методом, был использован парный двухвыборочный t-тест для средних. В случаях ненормального распределения, для сравнения значений показателей АнП был использован T-критерий Вилкоксона. Для исследования силы связи между показателями, в зависимости от нормальности распределения был использован корреляционный анализ методом Пирсона или Спирмена (Гланц С., 1998).

ГЛАВА III. УДЕЛЬНАЯ ИНТЕНСИВНОСТЬ ФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ ЗАТРАТ И СТРУКТУРА ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОЙ РАБОТЕ РАЗЛИЧНОЙ МОЩНОСТИ

3.1. Предпосылки

Уровень (интенсивность) физиологических затрат упражнения – один из важнейших параметров, который учитывается при формировании тренировочных программ и методик.

Н.И.Волков и др. (2002), для определения энергетической направленности физических нагрузок и распределения их по зонам мощности Фарфеля, предложили измерять метаболическую интенсивность упражнения в единицах MMR – показателя максимальной скорости окислительного метаболизма, то есть индивидуального МПК.

В своих исследованиях авторы доказали высокую информативность этого показателя во всем доступном для спортсменов диапазоне мощности упражнений Волков Н.И. и др. (2002). К сожалению, в рутинной тренировочной практике, использовать такой метод контроля практически невозможно – даже портативные газоанализаторы (не говоря о стационарных) значительно ограничивают свободу и технику движения в специальных соревновательных упражнениях, и сами по себе могут влиять на их биомеханические характеристики, а значит и на физиологические затраты. При этом, расчет параметров кислородного запроса методически сложен и представляет значительную трудность для тренерского состава.

Наряду с проблемой определения интенсивности упражнения, существует проблема количественной оценки вкладов аэробного и анаэробного механизмов в общем энергообеспечении и их изменения на определенных этапах подготовки, т.к. соотношение этих вкладов «в значительной мере определяет, характер и степень изменений в деятельности различных физиологических систем, обеспечивающих выполнение разных упражнений» (Коц Я. М., 1986), а значит, и дальнейшую адаптацию. Расчет

такого показателя, мог бы значительно повысить эффективность выбора тренировочных средств и подбора параметров упражнений для развития работоспособности. Так же, для оценки тяжести тренировочных нагрузок и эффективной адаптации спортсмена к тренировочному процессу, необходим учет дозы воздействия нагрузок как одного тренировочного упражнения, так и суммы упражнений за этапы подготовки.

В связи с этим, **цель данного раздела исследования** – разработать пульсометрические критерии для количественной оценки уровня и структуры энергетических затрат упражнений, дозы воздействия физической нагрузки при циклической работе в диапазоне от аэробного порога до максимальной анаэробной мощности.

3.2. Результаты исследования

Мы предположили, что удельная интенсивность физиологических затрат ($УИФЗ_{чсс}$, см. ф. 13) и относительный анаэробный вклад ($АнВ_{чсс}$, см. ф. 14) с не меньшим успехом, чем показатель метаболической мощности упражнения – MMR и показатель относительного анаэробного вклада – $АнВ_{O_2}$, могут применяться в спортивной практике для оценки упражнений, обладая при этом достоинством простоты и удобства измерения в реальном педагогическом процессе.

Для оценки информативности показателей $УИФЗ_{чсс}$ и $АнВ_{чсс}$, мы провели сравнение их с аналогичными показателями, рассчитанными по объемам потребленного O_2 – $УИФЗ_{O_2}$ (см. ф. 5) и $АнВ_{O_2}$ (см. ф. 6). Для этого мы выполнили специальную серию исследований, в которых одни и те же испытуемые в разные дни выполняли циклические нагрузки различной предельной длительности (10, 30, 60, 120 и 360 секунд) или фиксированной длительности (1800 и 7200 секунд). Во всех случаях измеряли газообмен и ЧСС и рассчитывали один и тот же набор показателей, как по объемам потребленного O_2 , так и по данным сердечного ритма.

Средне групповые антропометрические и максимальные функциональные показатели испытуемых, представлены в Таб. 3.1.

Таблица 3.1. Антропометрические и максимальные функциональные показатели ($M \pm \sigma$) участников исследования по результатам рамп-теста ($n = 18$)

Масса тела	МПК _{абс}	МПК _{отн}	ЧСС _{макс}	W _{max абс.}	W _{max отн.}
кг	л/мин	мл/мин/кг	уд/мин	Вт	Вт/кг
71,3±8,5	4,024±0,93	56,8±12,9	190±10	330±45	4,64±0,5

Результаты исследований представлены в Таб. 3.2 – 3.8 и на Рис. 3.1 – 3.9.

Эргометрические и физиологические показатели, рассчитанные по пульсовым суммам и по объемам потребленного O₂ в предельных (10, 30, 60, 120, 360 с) и в непредельных упражнениях на уровне АНП (1800 с) и АЭП (7200 с), представлены в Таб. 3.2.

Таблица 3.2 Эргометрические и физиологические показатели исследования ($M \pm \sigma$), полученные в предельных и непредельных упражнениях ($n=18$)

Показатели	Предельная продолжительность упражнения, с					Непредельная продолжительность упражнения, с	
	10	30	60	120	360	1800	7200
W _{ср.} , Вт	727±114	694±97	562±76	443±67	346±63	268±36	149±25
Отн. W _{ср.} , Вт/кг	10.4±0.9	9.8±0.8	7.9±0.6	6.3±0.7	4.9±0.8	3.8±0.5	2.1±0.2
УИФЗ _{O₂} , у.ед.	8.0±2.0	3.4±0.7	2.4±0.5	1.6±0.3	1.1±0.21	0.77±0.1	0.46±0.1
УИФЗ _{чсс} , у.ед.	8.3±2.8	4.8±0.9	3.0±0.4	1.9±0.2	1.2±0.1	0.88±0.1	0.47±0.1
АнВ _{O₂} , %	97±1	89±6	74±6	55±5	26±3	6±1	1±0
АнВ _{чсс} , %	95±2	88±5	77±4	61±5	32±4	9±1	2±1
КП, л	0.12±0.7	0.70±0.4	2.14±0.7	5.20±1.3	19.3±3.4	90±16	227±35
КД, л	4.66±1.3	5.55±1.8	6.15±1.4	6.18±1.6	6.34±1.5	5.38±9.7	3.11±0.9
КЗ, л	4.78±1.3	6.25±2.0	8.29±1.8	11.3±2.7	24.2±5.1	96±16	230±35
ПП, уд	6±2	30±12	73±16	151±25	511±72	2722±447	6862±1105
ПД, уд	139±39	217±59	251±50	235±45	245±57	256±58	112±49
ПЗ, уд	145±39	248±63	324±59	386±58	756±119	2977±493	8975±1193
максЛа, ммоль/л	7.02±1.8	14.7±2.5	16.1±2.4	15.8±2.4	14.4±2.6	7.53±3.9	1.14±0.3
СОКЗ, л/мин	28,7±7,7	12.5±4.0	8.3±1.8	5.7±1.3	4.05±0.9	3.2±0.5	1.9±0.3
СДЛа, ммоль/л/мин	32,0±8,6	21,9±5,8	13,0±1,6	6,5±1,3	1,93±0,5	0,21±0,1	0,00±0,0

Примечание: КП – кислородный приход; КД – кислородный долг; КЗ – кислородный запрос; ПП – пульсовой приход; ПД – пульсовой долг; ПЗ – пульсовой запрос; СОКЗ – скорость образования кислородного запроса; максЛа – максимальная концентрация лактата; СДЛа – скорость накопления лактата

В Таб. 3.3. и 3.4. представлены результаты регрессионного анализа, характеризующего взаимозависимости показателей УИФЗ_{чсс} и АнВ_{чсс} с аналогичными показателями, рассчитанными по объемам потребленного O₂, а также с механической мощностью упражнения, СОКЗ и СДЛа в

предельных (10, 30, 60, 120, 360 с) и в неопределенных упражнениях на уровне АНП (1800 с) и АЭП (7200 с).

Таблица 3.3 Коэффициенты детерминации регрессионного анализа взаимосвязей между $УИФЗ_{O_2}$, $УИФЗ_{чсс}$ и показателями, характеризующими интенсивность упражнения в диапазоне от АЭП до МАМ ($n=116$)

	$УИФЗ_{O_2}$	W_{cp}	$W_{cp/кг}$	СОКЗ	СДЛа
$УИФЗ_{O_2}$	1,00	0,82*	0,86*	0,89	0,81
$УИФЗ_{чсс}$	0,85	0,88*	0,93*	0,71	0,89

*Экспоненциальный характер, остальные зависимости имеют линейный характер;

Таблица 3.4 Коэффициенты детерминации регрессионного анализа взаимосвязей между $АнВ_{O_2}$, $АнВ_{чсс}$ и показателями, характеризующими интенсивность упражнения в диапазоне нагрузок от АЭП до МАМ ($n=116$)

	$АнВ_{O_2}$	W_{cp}	$W_{cp/кг}$	СОКЗ	СДЛа
$АнВ_{O_2}$	1,00	0,83**	0,85**	0,84**	0,96***
$АнВ_{чсс}$	0,98	0,86**	0,89**	0,82**	0,97***

**Логарифмический характер зависимости;

*** Степенной характер зависимости

Регрессионный анализ выявил тесные взаимосвязи показателей $УИФЗ_{чсс}$ и $АнВ_{чсс}$ с аналогичными показателями, рассчитанными по объемам потребленного кислорода, а также с мощностью упражнения, скоростью образования кислородного запаса и скоростью максимального накопления лактата. Это обусловлено тем, что пульсовые запасы упражнений и их составляющие, которые являются компонентами $УИФЗ_{чсс}$ и $АнВ_{чсс}$, тесно взаимосвязаны с аналогичными показателями, рассчитанными по объемам потребленного кислорода. Это демонстрируют графики, построенные для предельных упражнений различной фиксированной продолжительности, по среднегрупповым объемам потребленного кислорода и соответствующим пульсовым суммам, которые одновременно измерялись в нашем исследовании во время работы и восстановления (см. Рис. 3.1.).

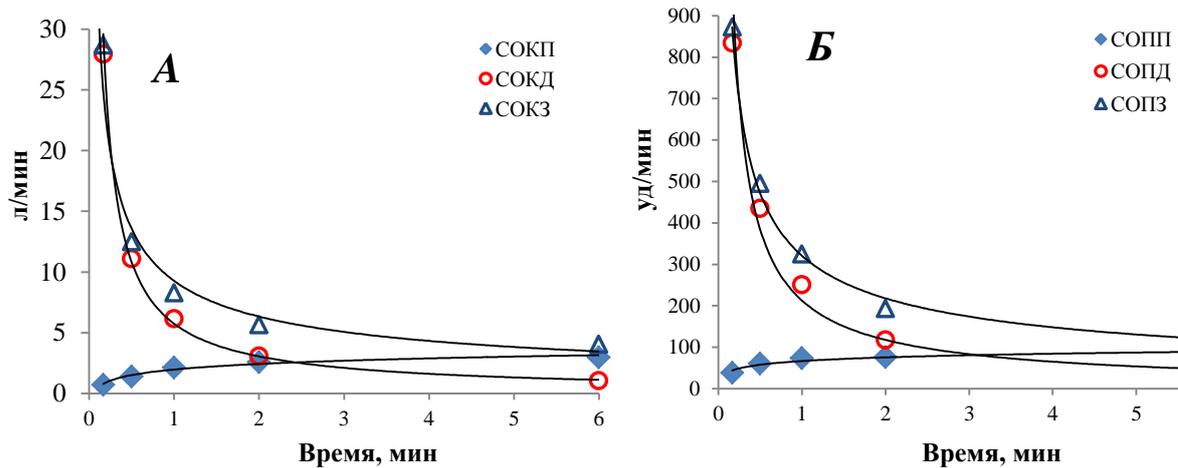


Рисунок 3.1. Зависимость скорости образования кислородного запроса и его составляющих (А) и скорости образования пульсового запроса и его составляющих (Б), от времени выполнения предельного упражнения (графики построены по усредненным данным, $n=18$).

По оси абсцисс – время выполнения упражнения, мин; По оси ординат – газометрические (А) и пульсометрические (Б) составляющие кислородного и пульсового запроса (соответственно) при выполнении предельного упражнения.

СОКП – скорость образования кислородного прихода;

СОКД – скорость образования кислородного долга;

СОКЗ – скорость образования кислородного запроса;

СОПП – скорость образования пульсового прихода;

СОПД – скорость образования пульсового долга;

СОПЗ – скорость образования пульсового запроса;

В зависимости от продолжительности предельных упражнений, изменения скорости образования кислородного прихода, кислородного долга и их пульсовых аналогов одинаково отражают переходные процессы в энергообеспечении работы (Рис. 3.1). Видно, что скорость образования кислородного и пульсового запроса, соответствующая приблизительно 10–20ти–секундному диапазону предельной продолжительности, практически совпадает со скоростью образования кислородного и пульсового долга. Это означает, что в этом диапазоне времени предельной работы энергообеспечение идет практически за счет анаэробных процессов, т. к. величины кислородного и пульсового прихода ничтожно малы по сравнению с долгом. Скорость образования кислородного и пульсового прихода, соответствующие приблизительно 2,5–3х–минутной продолжительности практически совпадает со скоростью образования кислородного и пульсового

долга. Это означает, что аэробный и анаэробный вклады в энергообеспечении предельной работы такой продолжительности практически равны.

В более длительных предельных упражнениях скорость образования кислородного и пульсового долга ниже скорости образования кислородного и пульсового прихода (Рис. 3.1), т. е. энергообеспечение работы происходит преимущественно за счет аэробных процессов.

То, что кривые соответствующих аналогичных показателей запроса и его составляющих, рассчитанных по потреблению O_2 и по ЧСС, одинаково отражают изменения скорости аэробных и анаэробных метаболических процессов означает, что пульсовые суммы работы и восстановления, так же как и соответствующие объемы кислорода, могут быть информативны для оценки интенсивности энергозатрат упражнения и вкладов аэробного и анаэробных механизмов в общем энергообеспечении.

Наши исследования подтверждают результаты исследований Волкова Н.И. и Попова О.И. (2005), которые определили тесную взаимосвязь пульсовых аналогов стоимости упражнения и ее составляющих с O_2 -запросом, O_2 -приходом и O_2 -долгом соответственно. В предельных упражнениях разной продолжительности, в диапазоне нагрузок от критической мощности до МАМ, авторы сопоставляли скорость образования пульсового запроса с мощностью упражнения, скоростью накопления лактата, скоростью образования кислородного запроса и показателем интенсивности упражнения, выраженном в единицах MMR. Авторы выявили высокую регрессионную зависимость между скоростью образования пульсового запроса и этими показателями, и сделали вывод, что на основе этой зависимости «...становится возможной строгая количественная оценка применяемых тренировочных нагрузок и их строгая классификация» (Волков Н.И. и др., 2005).

Это полностью подтверждается в нашем исследовании. Но у разных спортсменов при выполнении одинаковой работы пульсовые запросы и их одноименные составляющие могут сильно отличаться по величине (и это не

обязательно может быть связано с различным уровнем работоспособности). По этой причине показатель СОПЗ недостаточно информативен для понимания – на каком уровне интенсивности от максимальных возможностей спортсмена выполняется работа, и какой направленности произошли индивидуальные изменения после определенного этапа подготовки.

Для оценки индивидуального уровня интенсивности энергозатрат спортсмена в предельных и непредельных упражнениях в диапазоне мощности от АЭП до МАМ, мы использовали показатель $УИФЗ_{чсс}$.

Показатель $УИФЗ_{чсс}$ похож на показатели интенсивности работы - «относительный рабочий прирост ЧСС» (%ЧССорп) Карвонена (1957) и ИНПД Король В.М., Сонькина В.Д. (1985), но отличается от них тем, что этим показателем можно оценивать нагрузку от АЭП до МАМ, и тем, что он учитывает и аэробные, и анаэробные затраты. При этом, в отличие от ИНПД, в $УИФЗ_{чсс}$ скорость физиологических затрат (т.е СОПЗ) нормирована индивидуальным пульсовым резервом ($\Delta ЧСС_{макс}$), и это четко отражает, на каком уровне относительно своего максимального аэробного диапазона спортсмен выполнил тренировочную работу, и при выполнении стандартного упражнения позволяет сравнивать работоспособность разных спортсменов.

Фактически, $УИФЗ_{чсс}$ отображает удельную интенсивность физиологических затрат организма, рассчитанную по объемам потребленного кислорода – $УИФЗ_{O_2}$. Показатель $УИФЗ_{чсс}$ представляет собой отношение скорости образования пульсового запроса упражнения (СОПЗ) к пульсовому резерву спортсмена. Уровень пульсового запроса тесно связан с уровнем кислородного запроса упражнения (Волков Н.И и др., 2005), а величина пульсового резерва, по мнению Uth N. и соавторов (2004), тесно взаимосвязана с МПК. Показатель $УИФЗ_{чсс}$ объединяет подходы Карвонена (косвенная оценка интенсивности работы по интенсивности аэробных процессов) и Король В.М., Сонькина В.Д. (1985, 1991) (косвенная оценка интенсивности работы по интенсивности анаэробных процессов), и является числовым выражением удельной интенсивности физиологических затрат

(поскольку он нормирован по индивидуальной величине пульсового резерва) при выполнении практически любого циклического упражнения, предназначенного для развития работоспособности. Это подтверждается результатами настоящего исследования в диапазоне нагрузок от АЭП до МАМ.

Вместе с оценкой интенсивности упражнения, для определения энергетической направленности изменений в работоспособности спортсмена, существует необходимость количественной оценки вкладов аэробного и анаэробных механизмов в общем энергообеспечении и их изменения на определенных этапах подготовки.

Вариантов для оценки анаэробного вклада в энергообеспечении физической работы человека не много. Его можно приблизительно оценивать по концентрации лактата или по объемам O_2 -долга после выполнения работы (Волков Н.И. и др., 2000; Margaria, R., et al, 1971; di Prampero PE, Ferretti G. 1999). На основе величин этих показателей невозможно точно оценивать вклад анаэробного гликолиза, т.к. и концентрация лактата, и объем O_2 -долга отражают системные процессы, происходящие в организме. А значит, невозможно оценить, какой из этих подходов наиболее точный. Результаты нашего расчета анаэробного вклада ($АнВ_{чсс}$) тесно взаимосвязаны с результатами, полученными и с помощью измерения концентрации лактата и с помощью измерения кислородного долга (Таб. 3.4).

Полученные результаты позволяют соотнести количественные характеристики $УИФЗ_{чсс}$ и $АнВ_{чсс}$ с различными зонами мощности, что может иметь прямое прикладное значение для управления тренировочным процессом. Используя усредненные групповые данные для каждого упражнения определенной продолжительности, были построены диаграммы величин $УИФЗ_{чсс}$ и $АнВ_{чсс}$, соответствующих фиксированному времени упражнений во всем диапазоне нагрузок от аэробного порога до максимальной анаэробной мощности (Рис. 3.3, 3.4).

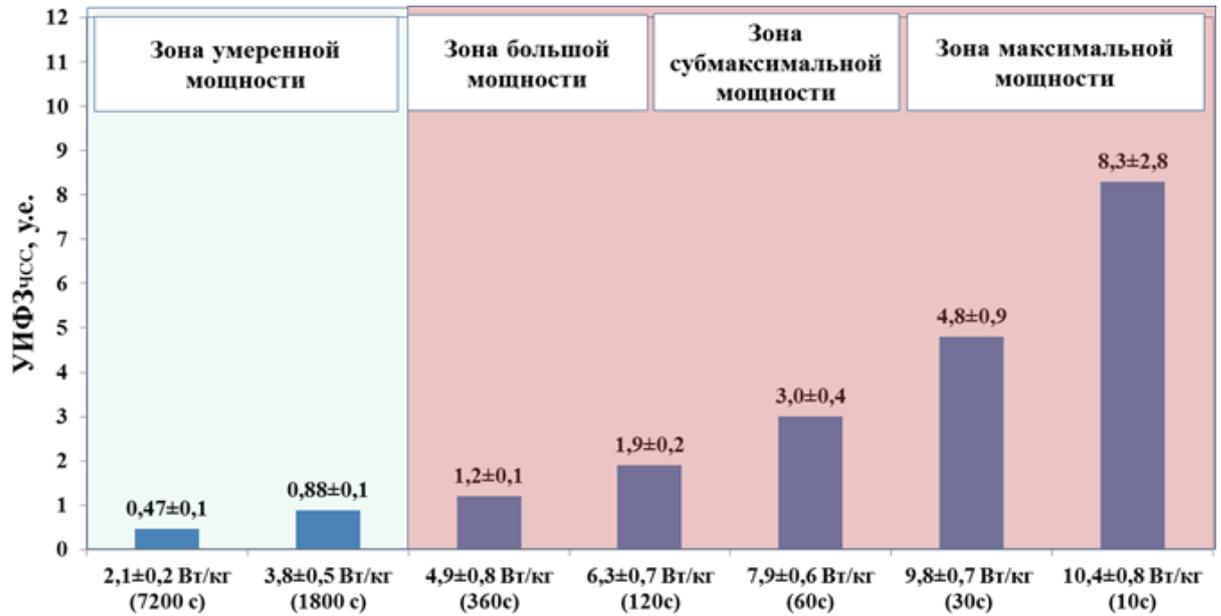


Рисунок 3.3. Диаграмма величин УИФЗ_{чсс}, соответствующих фиксированному времени упражнений во всем диапазоне нагрузок от аэробного порога до максимальной анаэробной мощности (n=18). На диаграмме упражнения с предельными нагрузками и неопределенными нагрузками выделены разными оттенками.

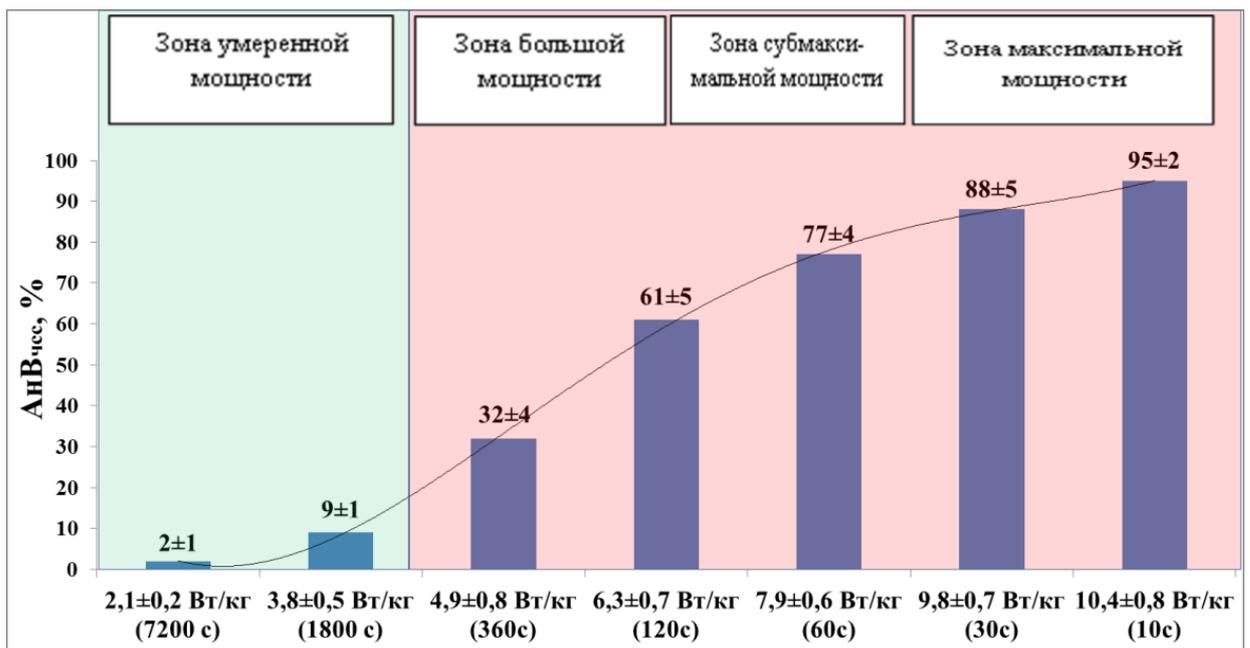


Рисунок 3.4. Диаграмма величин АнВ_{чсс}, соответствующих фиксированному времени упражнений во всем диапазоне нагрузок от аэробного порога до максимальной анаэробной мощности (n=18). На диаграмме упражнения с предельными нагрузками и неопределенными нагрузками выделены разными оттенками.

Очевидно, с помощью показателей интенсивности физиологических затрат – УИФЗ_{чсс} и относительного анаэробного вклада – АнВ_{чсс} можно определять величину и направленность изменений в работоспособности спортсмена за определенный этап подготовки, сравнивая одноименные

показатели $УИФЗ_{чсс}$ и $АнВ_{чсс}$ в стандартных упражнениях до и после цикла тренировки. Снижение интенсивности физиологических затрат у спортсмена в одинаковом непредельном по времени специальном упражнении (например, пробегание неполной дистанции с желаемой соревновательной скоростью) может свидетельствовать о повышении его работоспособности. Снижение или повышение в таком упражнении показателя относительного анаэробного вклада может показывать направленность изменений в работоспособности спортсмена. При этом разница между одноименными показателями $УИФЗ_{чсс}$ и $АнВ_{чсс}$ до и после цикла тренировок может являться количественным выражением этих изменений.

На Рис. 3.5 и в Таб. 3.5 пример изменения характеристик работоспособности спортсмена-велосипедиста (18 лет, 65 кг) после 8-недельного этапа подготовки в стандартном непредельном упражнении 30-минутной продолжительности на уровне индивидуального $АнП$ (240 Вт).

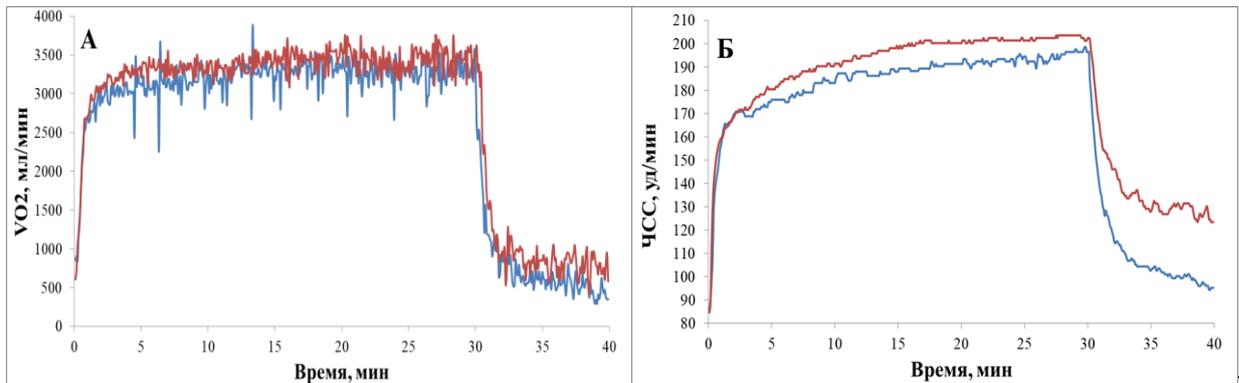


Рисунок 3.5. Динамика потребления O_2 (А) и ЧСС (Б) в стандартном упражнении до и после этапа подготовки. Красным цветом отмечена динамика потребления O_2 и ЧСС в начале этапа подготовки, синим – после его завершения.

Таблица 3.5 Сравнение величин характеристик работоспособности спортсмена-велосипедиста после этапа подготовки Октябрь – Декабрь в стандартном непредельном упражнении, определенных с помощью измерения VO_2 , ЧСС и Ла

Измерение	Октябрь		Декабрь		Разница	
	VO_2	ЧСС	VO_2	ЧСС	VO_2	ЧСС
Запрос упражнения	90844 мл	3657 уд	86081 мл	3442 уд	-4763	-215
Долг	7299 мл	390 уд	4392 мл	245 уд	-2907	-145
$УИФЗ$, уд. ед.	0,86	0,99	0,79	0,90	-0,07	-0,09
$АнВ$, %	7,00	10,00	5,00	7,00	-2	-3
Ла, ммоль/л	5,1		3,4		-1,7	

После этапа подготовки интенсивность физиологических затрат (*УИФЗ*) у спортсмена в стандартном упражнении снизилась. Т.к. спортсмен делал стандартную работу, то это можно интерпретировать, как повышение экономичности, возможно за счет более совершенной регуляции энерговегетативных процессов. Это подтверждается снижением пульсовых сумм и объемов кислорода, образованных у спортсмена во время работы и восстановления в тестировании после этапа подготовки. Снижение интенсивности физиологических затрат в стандартном упражнении может свидетельствовать о повышении работоспособности спортсмена (Сонькин В.Д., Тамбовцева Р.В., 2023).

Снижение *АнВ* можно интерпретировать как снижение активности анаэробных процессов в общем энергообеспечении. Это подтверждается понижением величины аналогичного показателя, рассчитанного по кислороду и снижением величины лактата в крови в повторном тестировании.

Для подбора тренировочной нагрузки и эффективной адаптации спортсмена к тренировочному процессу, необходимо оценивать объемы физической работы, воздействующей на организм спортсмена при выполнении упражнений как за одно тренировочное занятие, так и за этапы подготовки (Wasfy M.M., Baggish A.L., 2016; Impellizzeri, F.M., et al, 2023). При этом немаловажно учитывать не только объем физической нагрузки, но и ту его часть, которая обеспечивалась за счет анаэробных процессов, тем более что традиционные методы (*TRIMPs*, *sRPE* и т. п.) недостаточно информативны для оценки высокоинтенсивных упражнений (Desgorces F.D, et al, 2020).

В недавней публикации (Impellizzeri F.M. et al., 2023) были предложены термины для обозначения объемов физической нагрузки, воздействующей на организм спортсмена при выполнении упражнений: доза воздействия нагрузки (*ДН*) и нагрузочная экспозиция (*НЭ*).

В целом, доза воздействия физической нагрузки представляет собой воздействие совокупности двух его взаимосвязанных составляющих, - внешней и внутренней нагрузки. Внешняя нагрузка количественно определяется с использованием показателей, отражающих объем физической работы, выполняемой спортсменом. Внутренняя нагрузка - это нагрузка, которую испытал организм спортсмена, чтобы справиться с требованиями, налагаемыми внешней нагрузкой, и количественно определяется с помощью показателей, отражающих физиологический стресс во время упражнения. Манипулирование внешней нагрузкой создает определенную внутреннюю нагрузку, которая, в конечном итоге, влияет на адаптивные перестройки в организме спортсмена и, как следствие, на спортивный результат (Impellizzeri, F.M., et al, 2023).

Внутренняя нагрузка упражнения характеризуется продолжительностью и интенсивностью, и определяется как произведение этих параметров. Продолжительность отражает количество времени, затраченное на упражнение. Интенсивность упражнения обычно определяется в абсолютных показателях как метаболические или физиологические затраты за единицу времени, или в относительных показателях - в процентах от максимальных физиологических параметров (например, ЧСС или потребления кислорода). Если интенсивность определяется в относительных показателях, то внутренняя тренировочная нагрузка выражается в единицах времени (Wasfy M.M., Baggish A.L., 2016).

Действительно, Edwards (1993), Lucia A. et al., (2003), Banister EW, Hamilton C.L. (1985), Morton R.H. et al., (1990), Fitz-Clarke J.R. et al., (1991), Banister E. W., (1991), Foster C. et al., (2001), для расчета TRIMP или тренировочной нагрузки, умножают продолжительность работы на безразмерный (относительный или непараметрический) весовой коэффициент, отражающий напряжение организма. При этом, математически, размерность результатов таких расчетов – единицы времени.

Мы разделяем мнение Impellizzeri F.M. et al. (2023), которые полагают, что внешнюю или внутреннюю физическую нагрузку можно рассчитывать так же, как рассчитывается «кумулятивное воздействие» (CE, cumulative exposure) в эпидемиологии (Checkoway H., et al, 2004; Kriebel D., et al, 2007).

«Кумулятивное воздействие» рассчитывается как

$$CE = I \text{ (интенсивность воздействия)} \times T \text{ (продолжительность воздействия)},$$

или в более общем виде, если интенсивность меняется во времени, – как интеграл по времени от интенсивности воздействия, изображенный в уравнении:

$$CE = \int_{t_1}^{t_2} I(t) dt, \quad (\text{ф. 20}),$$

где t – время, интервал (t_1, t_2) – продолжительность, а I – интенсивность.

При этом Impellizzeri F.M. et al. (2023) полагают, что «физическая нагрузка» как общий термин, обозначает величину переменной экспозиции, независимо от того, является ли это воздействие внешним или внутренним для организма. Поэтому, в нашем случае, для определения внешней нагрузки, которая количественно рассчитывается как объем физической работы в Дж, мы будем использовать термин «внешняя физическая нагрузка», для определения внутренней физической нагрузки, в которой интенсивность рассчитывается в относительных показателях и единицы размерности - единицы времени, вместо термина «внутренняя физическая нагрузка» мы будем использовать термин «нагрузочная экспозиция».

Исходя из того, что дозой воздействия физической нагрузки является воздействие совокупности двух его взаимосвязанных составляющих, - внешней и внутренней нагрузки (Impellizzeri F.M. et al., 2023), мы предположили, что дозу воздействия физической нагрузки ($ДН$) и ее часть, которая обеспечивается за счет анаэробных процессов ($ДН_{ан}$), можно рассчитывать на основе $УИФЗ_{чсс}$, $АнВ_{чсс}$ и внешней физической нагрузки ($ВН$) (см. схему на Рис. 3.6).

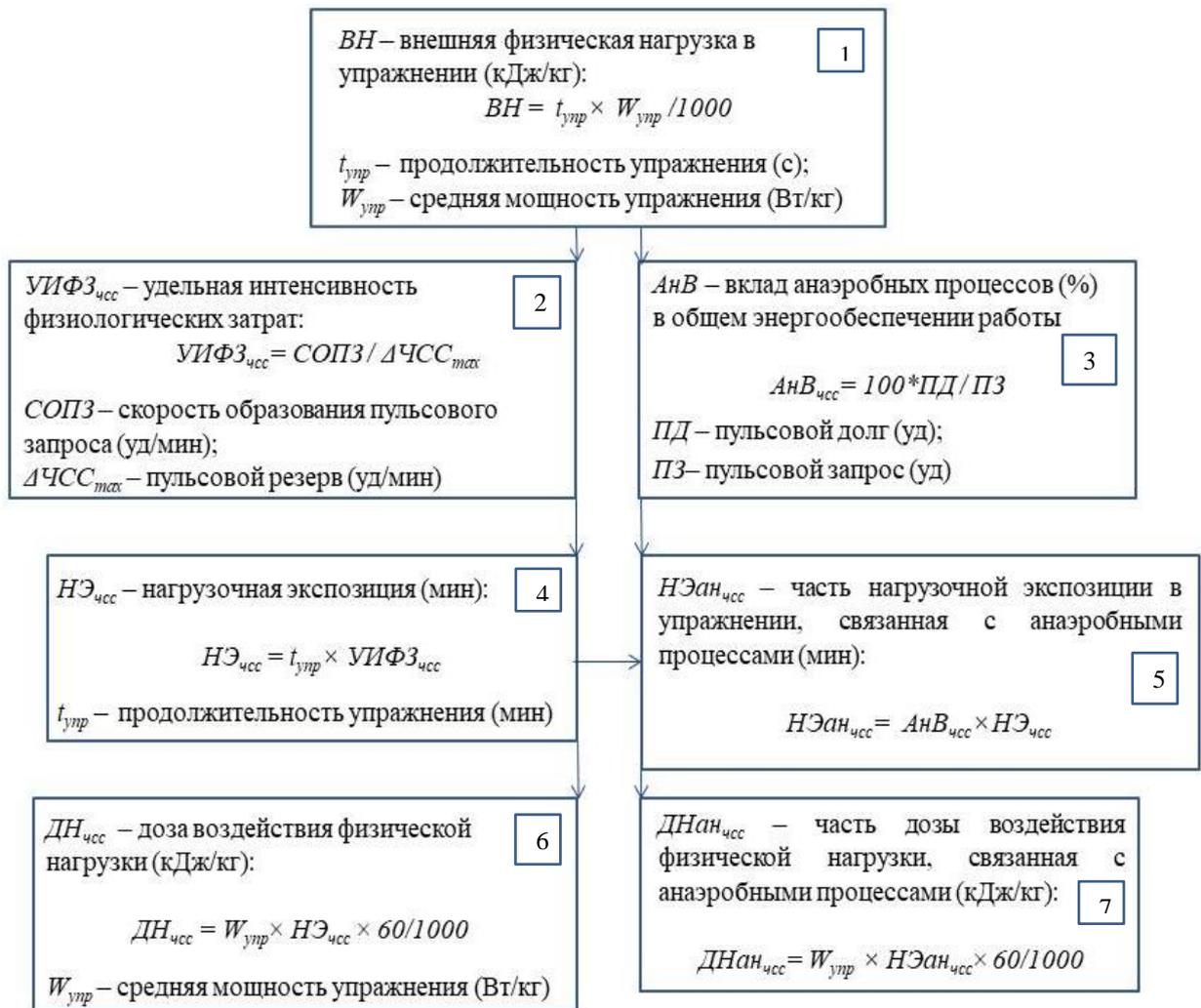


Рисунок 3.6. Алгоритм расчета дозы воздействия физической нагрузки на основании эргометрических и физиологических показателей упражнения.

Примечания: Внешняя физическая нагрузка (BH) [1] вызывает физиологический ответ организма в виде суммы аэробных и анаэробных затрат определенной интенсивности ($УИФЗ_{чсс}$) [2] и в определенном соотношении ($АнВ_{чсс}$) [3].

Из $УИФЗ_{чсс}$ [2] и продолжительности работы рассчитывается нагрузочная экспозиция ($НЭ_{чсс}$) [4].

Из нагрузочной экспозиции ($НЭ_{чсс}$) [4] и её анаэробной составляющей $АнВ_{чсс}$ [3] рассчитывается анаэробная часть нагрузочной экспозиции ($НЭан_{чсс}$) [5].

Из мощности внешней нагрузки ($W_{упр}$) [1] и нагрузочной экспозиции ($НЭ_{чсс}$) [4] рассчитывается доза воздействия нагрузки ($ДН_{чсс}$) [6]. Аналогично, из мощности внешней нагрузки ($W_{упр}$) и анаэробной части нагрузочной экспозиции ($НЭан_{чсс}$) [5] рассчитывается анаэробная часть дозы воздействия нагрузки ($ДНан_{чсс}$) [7].

В нашем случае, нагрузочная экспозиция представляет собой произведение удельной интенсивности физиологических затрат и продолжительности упражнения (то есть физиологический эффект), а доза воздействия нагрузки рассчитывается как произведение мощности нагрузки на величину $НЭ$ (то есть эргофизиологический эффект).

С помощью эргометрических показателей $t_{упр}$, $W_{упр}$, а так же УИФЗ и АНВ, рассчитанных по объемам потребленного O_2 и по ЧСС, исходя из работы Impellizzeri F.M. et al. (2023), мы рассчитали внешнюю нагрузку (ВН), нагрузочную экспозицию ($HЭ_{O_2}$, $HЭ_{чсс}$), часть нагрузочной экспозиции, которая обеспечивалась анаэробными процессами ($HЭан_{O_2}$, $HЭан_{чсс}$), дозу воздействия физической нагрузки ($ДН_{O_2}$, $ДН_{чсс}$) и ее анаэробную часть ($ДНан_{O_2}$, $ДНан_{чсс}$) в предельных и непредельных упражнениях, в диапазоне нагрузок от АЭП до МАМ. Результаты представлены в Таб. 3.6.

Таблица 3.6. Внешняя физическая нагрузка и нагрузочная экспозиция ($M \pm \sigma$), рассчитанные для предельных и непредельных упражнений ($n=18$)

Показатели	Предельная продолжительность упражнения, с					Непредельная продолжительность упражнения, с	
	10	30	60	120	360	1800	7200
<i>ВН, кДж/кг</i>	0,1±0,01	0,29±0,02	0,47±0,04	0,75±0,09	1,76±0,3	6,80±0,8	15,1±1,6
<i>НЭ_{O₂}, мин</i>	1,33±0,3	1,72±0,4	2,36±0,5	3,19±0,7	6,79±1,2	23,0±3,1	54,9±7,8
<i>НЭ_{чсс}, мин</i>	1,37±0,5	2,38±0,4	3,03±0,4	3,80±0,4	7,46±0,6	26,4±2,8	56,9±6,8
<i>ДН_{O₂}, кДж/кг</i>	0,84±0,24	1,01±0,22	1,11±0,25	1,19±0,24	1,97±0,39	5,21±1,01	6,93±1,32
<i>ДН_{чсс}, кДж/кг</i>	0,86±0,34	1,40±0,34	1,44±0,24	1,43±0,22	2,18±0,36	6,03±0,12	7,19±1,30
<i>НЭан_{O₂}, мин</i>	1,30±0,3	1,52±0,4	1,77±0,5	1,76±0,5	1,80±0,5	1,30±0,2	0,74±0,2
<i>НЭан_{чсс}, мин</i>	1,32±0,5	2,09±0,5	2,35±0,4	2,32±0,4	2,42±0,4	2,27±0,4	0,90±0,4
<i>ДНан_{O₂}, кДж/кг</i>	0,82±0,24	0,89±0,22	0,84±0,23	0,65±0,17	0,52±0,13	0,29±0,06	0,09±0,03
<i>ДНан_{чсс}, кДж/кг</i>	0,83±0,34	1,24±0,33	1,12±0,22	0,87±0,18	0,71±0,16	0,52±0,14	0,12±0,05

ВН – внешняя физическая нагрузка в упражнении;

НЭ_{O₂} – нагрузочная экспозиция в упражнении, рассчитанная по O_2 ;

НЭ_{чсс} – нагрузочная экспозиция в упражнении, рассчитанная по ЧСС;

ДН_{O₂} – доза воздействия физической нагрузки, рассчитанная по O_2 ;

ДН_{чсс} – доза воздействия физической нагрузки рассчитанная по ЧСС;

НЭан_{O₂} – анаэробная часть нагрузочной экспозиции в упражнении, рассчитанная по O_2 ;

НЭан_{чсс} – анаэробная часть нагрузочной экспозиции в упражнении, рассчитанная по ЧСС;

ДНан_{O₂} – анаэробная часть дозы воздействия физической нагрузки, рассчитанная по O_2 ;

ДНан_{чсс} – анаэробная часть дозы воздействия физической нагрузки, рассчитанная по ЧСС;

Из результатов, представленных в Таб. 3.5 видно, что практически во всех упражнениях (кроме 10-секундного) значения показателей $HЭ_{чсс}$ и $HЭан_{чсс}$, $ДН_{чсс}$ и $ДНан_{чсс}$, выше значений аналогичных показателей, рассчитанных по объемам потребленного O_2 . Вероятно, это связано с тем, что объемы потребленного O_2 характеризуют энергетическую составляющую, а пульсовые суммы - еще и регуляторную составляющую запроса на

физическую работу в упражнении. Т. е. пульсовые суммы недостаточно информативны для анализа непосредственно энергозатрат, но характеризуют физиологические затраты упражнения, одна часть из которых направлена на энергообеспечение физической работы, а другая - на обеспечение регуляторных процессов во время работы и восстановления. То, что значения показателей $NЭ_{чсс}$ и $NЭ_{анчсс}$, $ДН_{чсс}$ и $ДН_{анчсс}$ в 10-секундном упражнении практически не отличаются от аналогичных показателей, рассчитанных по объемам потребленного O_2 , очевидно связано с тем, что за 10 секунд предельной работы, которая обеспечивается преимущественно алактатным механизмом КрФ (Margaria R., 1976). вегетативные процессы не успевают развернуться соответственно уровню энергообеспечения.

На Рис. 3.7. изображены диаграммы, построенные для каждого упражнения определенной продолжительности, по усредненным групповым данным ($n=18$), которые демонстрируют соответствующие им величины, характеризующие физическую нагрузку - $NЭ_{O_2}$, и $NЭ_{чсс}$, $ДН_{O_2}$, $ДН_{чсс}$. В диапазоне нагрузок от $AЭП$ до $МАМ$.

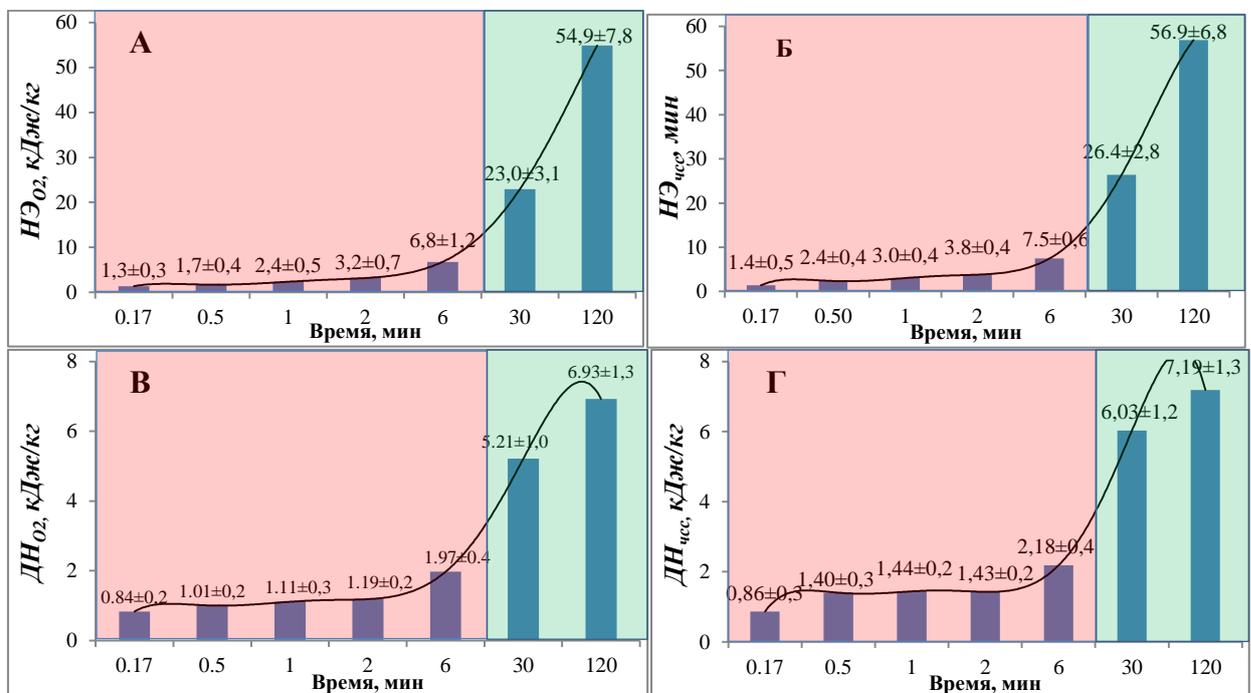


Рисунок 3.7. Диаграмма величин $NЭ_{O_2}$ (А), $NЭ_{чсс}$ (Б), $ДН_{O_2}$ (В), $ДН_{чсс}$ (Г) соответствующих фиксированному времени предельных и не предельных упражнений во всем диапазоне нагрузок от аэробного порога до максимальной анаэробной мощности. На диаграмме упражнения с предельными нагрузками и не предельными нагрузками выделены разными оттенками.

Как показывает Рис. 3.7, диаграммы величин показателей $HЭ_{O_2}$, $HЭ_{чсс}$, $ДН_{O_2}$, $ДН_{чсс}$ по виду практически не отличаются. Очевидно, это из-за того, что эти показатели тесно взаимосвязаны.

Т. к. внешняя и внутренняя физическая нагрузка, являются составляющими дозы воздействия физической нагрузки, и при этом всегда должны быть взаимосвязаны между собой (Impellizzeri F.M. et al, 2023), мы рассчитали взаимосвязи между всеми показателями, которые характеризуют физическую нагрузку в целом (см. Таб. 3.7).

Таблица 3.7 Коэффициенты детерминации (R^2) регрессионного анализа взаимосвязей между показателями, характеризующими физическую нагрузку в целом в диапазоне от АЭП до МАМ ($n=124$).

	$ВН$	$HЭ_{O_2}$	$HЭ_{чсс}$	$ДН_{O_2}$	$ДН_{чсс}$
$ВН$	1,00	0,96	0,97	0,89	0,87
$HЭ_{O_2}$	0,96	1,00	0,98	0,90	0,82
$HЭ_{чсс}$	0,97	0,98	1,00	0,90	0,87
$ДН_{O_2}$	0,89	0,90	0,90	1,00	0,96
$ДН_{чсс}$	0,87	0,82	0,87	0,96	1,00

Как показывают результаты, представленные в Таб. 3.7, все показатели, характеризующие физическую нагрузку, весьма тесно взаимосвязаны.

Показатели $HЭ_{O_2}$ и $HЭ_{чсс}$ тесно линейно взаимосвязаны. Это объясняется тем, что $УИФЗ_{чсс}$ и $УИФЗ_{O_2}$ (составляющие $HЭ_{O_2}$ и $HЭ_{чсс}$ соответственно) тесно взаимосвязаны с мощностью упражнения и между собой (см. Таб. 3.3).

Показатели $HЭ_{O_2}$ и $HЭ_{чсс}$ также тесно линейно взаимосвязаны с $ДН_{O_2}$, $ДН_{чсс}$ и $ВН$. Это позволяет использовать показатель $HЭ_{чсс}$ для количественной оценки перенесенной физической нагрузки в том случае, если по каким-либо причинам нет возможности регистрировать концентрацию лактата, потребление O_2 и уровень внешней нагрузки.

На Рис. 3.8 изображены диаграммы, построенные для каждого упражнения определенной продолжительности по усредненным данным ($n=18$), которые демонстрируют соответствующие им величины максЛа (А) и анаэробную часть нагрузочной экспозиции - $HЭ_{анчсс}$ (Б), в упражнениях в диапазоне нагрузок от АЭП до МАМ.

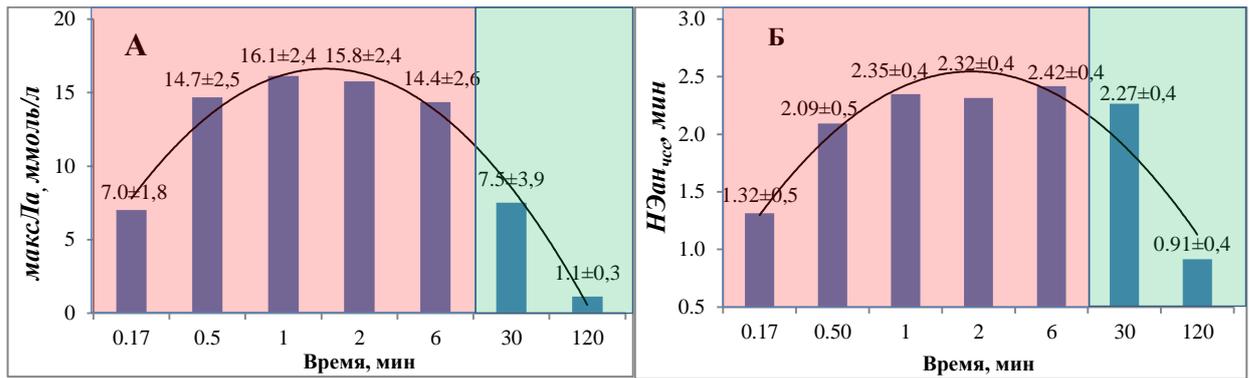


Рис. 3.8 Диаграмма величин максЛа (А) и НЭан_{чсс} (Б), соответствующих фиксированному времени предельных и непредельных упражнений во всем диапазоне нагрузок от аэробного порога до максимальной анаэробной мощности. Пояснение в тексте.

Как показано на Рис. 3.8, диаграмма величин НЭан_{чсс}, соответствующих различной продолжительности нагрузки, по виду практически не отличается от диаграммы величин максЛа (А), – за исключением 30-минутной работы, где нагрузочная экспозиция намного выше по сравнению с уровнем лактата (Б). Получается, что при такой нагрузке напряжение организма выше, чем можно ожидать по уровню лактата в крови.

Вероятно, это связано с тем, что в предельных нагрузках на уровне МПК и выше, работа обеспечивается большими усилиями, участвует много быстрых мышечных волокон, вклад анаэробных механизмов при этом очень велик. В этих условиях, утилизация лактата во время работы крайне затруднена, по сравнению с более длительными и менее интенсивными упражнениями. Возможно по этому, в предельных упражнениях на уровне МПК и выше, величина накопленного лактата приблизительно соответствует величине анаэробной экспозиции, а на 30-ти и 120-ти минутной работе величина накопленного лактата много ниже (тем более что работа такой длительности в нашем исследовании не была предельной). Это может представлять особый интерес для понимания специфики выносливости на границе умеренной и большой зон мощности, и требует дальнейшего изучения.

Мы выявили взаимосвязи между *максЛа* и представленными одноименными показателями *НЭан*, рассчитанными по объемам потребленного O_2 и по пульсовым суммам (см. Таб. 3.8).

Таблица 3.8 Коэффициенты детерминации (R^2) регрессионного анализа взаимосвязи между анаэробной частью нагрузочной экспозиции ($НЭан_{O_2}$ и $НЭан_{чсс}$) и *максЛа* в диапазоне нагрузок от АЭП до МАМ ($n=124$).

	$НЭан_{O_2}$	$НЭан_{чсс}$
<i>максЛа</i>	0,52	0,59
$НЭан_{O_2}$	1,00	0,42

Как показано в Таб. 3.8, показатели $НЭан_{O_2}$ и $НЭан_{чсс}$ умеренно взаимосвязаны друг с другом и сильно линейно взаимосвязаны с *максЛа*. Это с некоторой долей допущения позволяет использовать показатель $НЭан_{чсс}$, для количественной оценки анаэробной части дозы воздействия физической нагрузки в том случае, если по каким - либо причинам нет возможности измерять концентрацию лактата.

Очевидно, $НЭан_{O_2}$ и $НЭан_{чсс}$ сильно линейно взаимосвязаны с *максЛа* из-за того, что составляющие УИФЗ и АнВ, из которых рассчитывается *НЭан*, весьма тесно взаимосвязаны со скоростью накопления лактата (*СЛЛа*) (см. Таб. 3.3 и 3.4).

Очевидно, что величина анаэробной части нагрузочной экспозиции отражает величину анаэробного вклада, которая соответствует уровню интенсивности и продолжительности упражнения и является результатом взаимодействия физиологических и биохимических процессов в организме, так же как *максЛа*, величина которого есть суммарный результат взаимодействия процессов его продукции и утилизации.

Если, исходя из этого, с некоторой долей допущения признать $НЭан_{чсс}$ аналогом *максЛа* (величина лактата, так же как и величина $НЭан_{чсс}$ зависит от продолжительности и интенсивности упражнения), и при расчете $ДНан_{чсс}$ ($ДНан_{чсс} = W_{упр} \times НЭан_{чсс}$), вместо множителя $НЭан_{чсс}$ использовать величину *максЛа*, то диаграмма величин произведения $W_{упр} \times максЛа$, в упражнениях с

длительностью от 10 до 7200 секунд, будет иметь практически такой же вид, что и диаграмма величин $ДНан_{чсс}$, (см. Рис. 3.9).

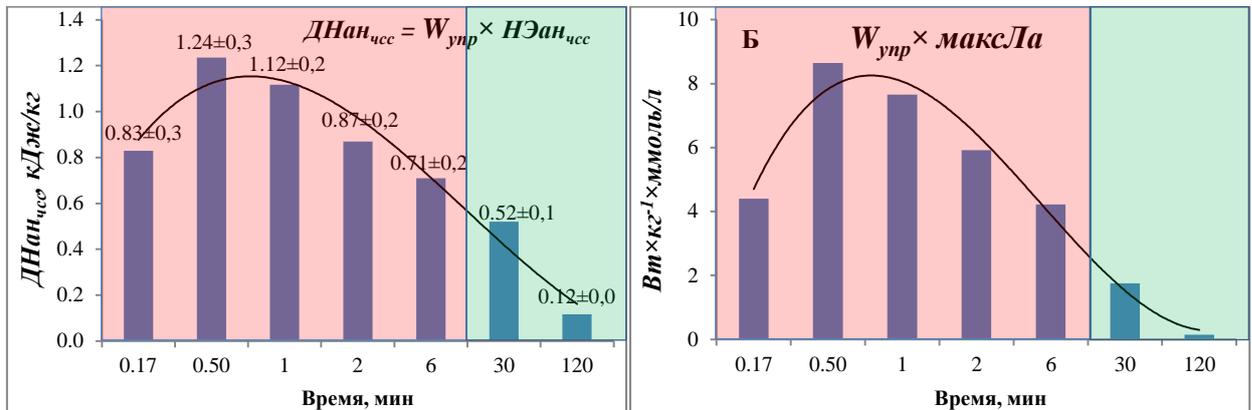


Рис. 3.9. Диаграммы величин $ДНан_{чсс}$ (А) и величин условного аналога $ДНан_{чсс}$ (произведения $W_{упр} \times максЛа$) (В), соответствующих фиксированному времени предельных и непредельных упражнений в диапазоне нагрузок от аэробного порога до максимальной анаэробной мощности.

При этом регрессионный анализ показывает весьма тесную линейную взаимосвязь между величинами произведения $W_{упр} \times максЛа$ и $ДНан_{чсс}$ ($R^2=0,85$, $n=116$). Это означает то, что условный показатель $W_{упр} \times максЛа$ и $ДНан_{чсс}$ практически одинаково зависят от фиксированной продолжительности и мощности упражнения. Это наряду с другими результатами исследования может служить аргументом для того, чтобы при для количественной оценке физической нагрузки использовать $ДНан_{чсс}$.

Как показывают диаграммы на Рис. 3.9, величины $ДНан_{чсс}$, повышаются при увеличении продолжительности упражнения от 10 до 30 секунд, а далее, с повышением продолжительности нагрузки, снижаются. Предельные упражнения продолжительности до 30 секунд соответствуют зоне максимальной мощности, при этом величины $ДНан_{чсс}$ в упражнениях, соответствующих продолжительности 30, 60 и 120 секунд, выше, чем в 10-секундном упражнении (хотя по нашим данным для 120 – секундного упражнения такая разница не достоверна).

Это может означать, что показатель $ДНан$ зависит, главным образом, от вклада анаэробного гликолиза в анаэробном энергообеспечении работы, т. к. предельные упражнения, соответствующие 30–ти , 60–ти и 120–ти секундной

продолжительности, обеспечиваются анаэробным гликолизом в наибольшей степени (Swanwick E., Matthews M., 2018). По-видимому, упражнения 10-секундной продолжительности в первую очередь зависят от фосфагенного источника энергии (Волков Н.И. и др., 2000).

Представленные результаты позволяют использовать показатели дозы нагрузки $ДН_{чсс}$ и $ДНан_{чсс}$ для количественной оценки воздействия физической нагрузки на организм спортсмена.

3.3. Заключение по разделу

В результате проведенных исследований были разработаны пульсометрические критерии для количественной оценки интенсивности физиологических затрат и структуры энергообеспечения упражнений, а также показатели, характеризующие физические нагрузки, выполняемые спортсменом в диапазоне от аэробного порога до максимальной анаэробной мощности.

Результаты регрессионного анализа показали:

1. Показатель интенсивности физиологических затрат в упражнении – $УИФЗ_{чсс}$ и показатель анаэробного вклада в общем энергообеспечении упражнения – $АнВ_{чсс}$ тесно взаимосвязаны с аналогичными показателями, рассчитанными по объемам потребленного кислорода, а также с мощностью упражнения, скоростью образования кислородного запаса и скоростью максимального накопления лактата.
2. Показатели нагрузочной экспозиции в упражнении – $НЭ_{O_2}$ и $НЭ_{чсс}$ сильно линейно взаимосвязаны между собой и с показателем внешней нагрузки – $ВН$ (объемом выполненной механической работы в упражнении). Показатели анаэробной части нагрузочной экспозиции – $НЭан_{O_2}$ и $НЭан_{чсс}$ заметно линейно взаимосвязаны с $максЛа$.
3. Показатель дозы воздействия физической нагрузки – $ДН_{чсс}$ и показатель анаэробной части дозы воздействия физической нагрузки – $ДНан_{чсс}$

тесно линейно взаимосвязаны с аналогичными показателями, рассчитанными по объемам потребленного кислорода.

На основе результатов проведенной серии исследований можно сделать выводы:

1. Разработаны методы для расчета показателя интенсивности физиологических затрат в упражнении – $УИФЗ_{чсс}$ и показателя анаэробного вклада в общем энергообеспечении упражнения – $АнВ_{чсс}$, которые так же, как и аналогичные показатели, рассчитанные по объемам потребленного O_2 , информативны для оценки интенсивности энергозатрат и структуры энергообеспечения физической работы в упражнениях от аэробного порога до максимальной анаэробной мощности.
2. Показатели нагрузочной экспозиции в упражнении – $НЭ_{чсс}$ и части нагрузочной экспозиции, которая обеспечивалась анаэробными процессами – $НЭан_{чсс}$, рассчитанные на основе показателей $УИФЗ_{чсс}$ и $АнВ_{чсс}$, пригодны для косвенной оценки объема выполненной механической работы и накопления лактата в упражнении (соответственно).
3. Показатель дозы воздействия физической нагрузки – $ДН_{чсс}$ отражает совокупность объема выполненной в упражнении механической работы и перенесенного при этом физиологического напряжения организма. Показатель анаэробной части дозы воздействия физической нагрузки – $ДНан_{чсс}$ отражает совокупность объема выполненной в упражнении механической работы и перенесенного при этом физиологического напряжения организма, выполненных за счет анаэробных процессов, которыми в том числе обеспечивалась работа.

На основе результатов настоящего исследования становится возможным с помощью пульсометрических показателей интенсивности физиологических затрат – $УИФЗ_{чсс}$ и относительного вклада анаэробных

процессов – $АнВ_{чсс}$ – определять энергетическую направленность применяемого упражнения.

В научный оборот и в тренировочную практику вводятся понятия: «нагрузочная экспозиция» и «доза воздействия нагрузки», и предлагаются оригинальные алгоритмы расчета соответствующих показателей, которые расширяют теоретические представления об организации энерговегетативного обеспечения напряженной физической работы, и могут быть полезны в практике спортивной тренировки.

С помощью показателей $ДН_{чсс}$ и $ДНан_{чсс}$, возможно количественно оценивать физическую нагрузку при подготовке спортсменов. Суммарная оценка доз нагрузки разных упражнений необходима для анализа тяжести тренировки в целом. Такой анализ можно использовать для распределения и планирования тренировок различной величины тяжести в микро- и макроциклах подготовки, а также для сопоставления доз нагрузки на разных этапах подготовки спортсмена с его результативностью.

Результаты исследования могут иметь большое значение для понимания процессов срочной адаптации организма к циклической физической нагрузке.

ГЛАВА IV. НЕИНВАЗИВНЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ АНАЭРОБНОГО ПОРОГА

4.1. Предпосылки

Из всех характеристик циклической нагрузки анаэробный порог (АнП) является базовым для формирования режима подготовки спортсменов в различных видах спорта. Мощность или скорость достижения АнП, является важной характеристикой работоспособности спортсмена, которая наиболее информативна для суждения о потенциале его аэробных возможностей, и позволяет контролировать эффективность тренировочного процесса у спортсменов, тренирующих выносливость (Мак-Дугалл Д.Д., 1998; Joyner M.J., et al, 2008; Lundby C., et al, 2015; Pallar J. G., et al, 2016; Heuberger JAAC et al, 2018; David L. et al, 2021). Поэтому разработка простых и неинвазивных методов измерения АнП до сих пор сохраняет свою актуальность.

Впервые АнП был зафиксирован в 1961 г. по динамике дыхательного коэффициента (Issekutz В., Rodahl К., 1961).

В дальнейшем, для расчета момента достижения АнП были использованы показатели вентиляции и легочного газообмена, а также концентрации лактата в капиллярной крови (Anderson G.S., et al, 1989).

Наряду с неинвазивными методами, основанными на измерении газообмена, АнП с той или иной степенью точности может определяться неинвазивно, с помощью других физиологических характеристик нагрузки – по электромиографическим показателям (Alejandro Lucía, et al, 1999; Latasa I, et al, 2019), по показателям пульсооксиметрии (Abe, M., et al, 2022), по variability сердечного ритма (Saunoriene L, et al, 2019; Селуянов и др., 2011) по динамике ЧСС (Hnizdil, Jan, et al, 2019) или с помощью анализа эргометрических измерений в предельных упражнениях (Lipková L, et al, 2022; Andrew M. J., 2018)

Все эти методы характеризуют АП как физиологический феномен, но по разным причинам не вполне пригодны для широкого применения в тренировочной практике. Информативность этих методов обычно уступает классическим измерениям.

Поиск неинвазивных, простых для применения в тренировочной практике, и в то же время информативных методов определения АП ведется до сих пор.

Цель данного раздела исследования – разработать информативные и простые в применении неинвазивные методы для определения АП в тестировании с повышением нагрузки до отказа, для спортсменов-цикликов различных специализаций, выполняющих тестирование на различных нагрузочных устройствах.

4.2. Результаты исследования

4.2.1. Термографический способ определения АП

Нами была предпринята попытка использовать результаты термографирования при работе нарастающей мощности для неинвазивного определения анаэробного порога. При этом мы анализировали изменение индивидуальной динамики температуры поверхности спины и шеи в зависимости от скорости бега, т.е. фиксировали начало быстрого роста температуры и сопоставляли его с АП, который определялся по динамике концентрации лактата в крови.

В Таб. 4.1 представлены средне-групповые данные массы тела и максимальных эргометрических и физиологических показателей испытуемых (смешанная группа, n=13) после выполнения нагрузочного тестирования на беговом тредмиле с равномерным повышением скорости до отказа.

Таблица 4.1 Показатели, характеризующие физическое состояние испытуемых ($M \pm \sigma$)

Параметр	<i>m</i>	<i>МПК_{отн}</i>	<i>МПК_{абс}</i>	<i>ЧСС_{макс}</i>	<i>t_{max}</i>	<i>V_{max}</i>
Размерность	кг	мл/кг/мин	л/мин	уд/мин	мин	км/ч
Смешанная группа (n=13)	72,0 ±12	56±8	4,1±0,9	189±9	16,39±2,0	16,8±1,2

У испытуемых, во время бега в тесте с повышением скорости, температура поверхности спины и шеи вначале снижается из-за усиливающегося потоотделения, но приблизительно во время достижения анаэробного порога быстро повышается, и достигает максимума в момент отказа от работы или вскоре после этого (Рис. 4.1).

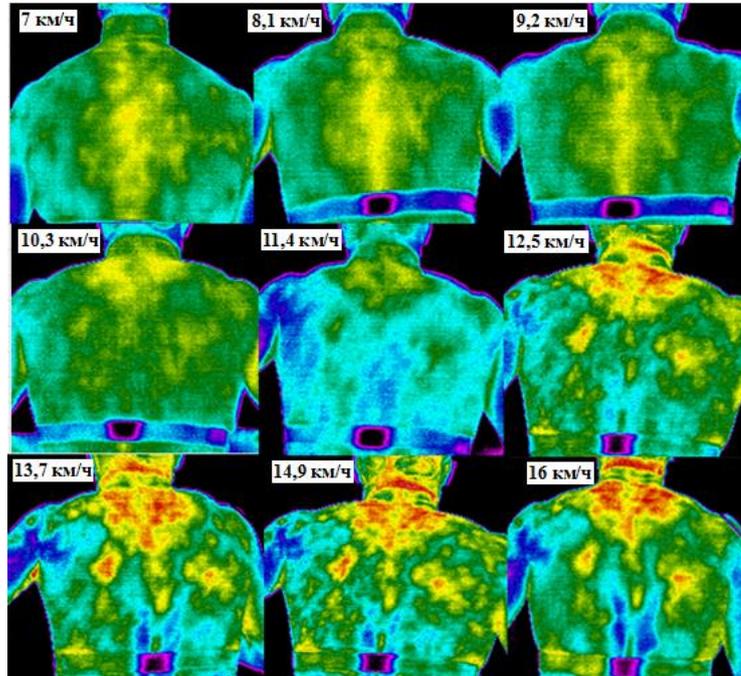


Рисунок 4.1. Пример, демонстрирующий изменение термопортрета поверхности спины и шеи испытуемого от начала до конца тестирования с повышением нагрузки до отказа на беговом тредбане. Снимки сделаны в момент забора крови для анализа концентрации лактата. В левом верхнем углу каждого снимка указана соответствующая скорость бега. Испытуемый НН.

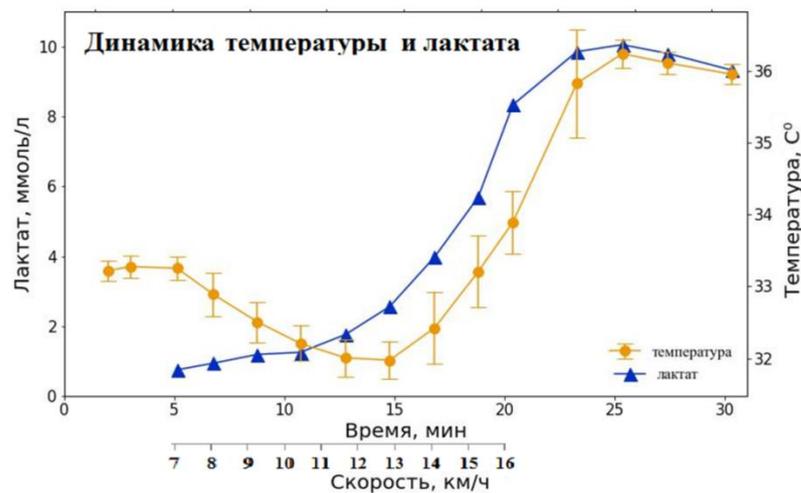


Рисунок 4.2 Пример, демонстрирующий индивидуальную динамику концентрации лактата и температуры поверхности спины и шеи в тестировании с повышением нагрузки до отказа на беговом тредбане. Испытуемый НН.

Практически во всех случаях, повышение концентрации лактата предшествует повышению кожной температуры (Рис. 4.2.). Начиная с момента достижения *АнП* и до конца периода наблюдения, отмечена тесная положительная взаимосвязь между максимальной температурой спины и шеи и содержанием лактата в периферической крови ($R^2 > 0,9$).

Тот факт, что при повышении нагрузки во время выполнения мышечной работы температура кожи поначалу снижается, а потом, приблизительно с достижением *АнП* практически у всех испытуемых начинает повышаться, был ранее зафиксирован при измерении температуры поверхности лба в исследовании Акимова Е.Б. и др. (2011).

Такое изменение температуры кожи во время работы с повышением нагрузки может происходить из-за изменения общего теплового состояния организма: в стандартных условиях скорость потоотделения прямо зависит от мощности выполняемой работы. При этом, внутренняя температура прямо зависит от мощности работы примерно до 75% от МПК, далее температура ядра повышается относительно больше, чем увеличивается мощность работы. Радиация снижается приблизительно до *АнП*, далее, невзирая на равномерно повышающееся потоотделение, начинает повышаться (Коц Я.М., 1982).

В нашем исследовании, судя по тепловизионной съемке, задняя поверхность шеи и поверхность участка спины «между лопаток» значительно разогреваются после достижения *АнП*, при этом нет однозначного понимания, какие именно структуры влияют на усиленный разогрев этих поверхностей (Cannon B., et al, 2004; Cypess A.M., 2009; Sacks H., Symonds M.E. 2013; Lidell M.E., et al, 2014).

Вид термических карт во время нагрузки может быть связан и с особенностями расположения сосудов и кожным кровотоком в области шеи/спины. При этом возникает вопрос: что непосредственно является причиной для необходимости усиленно отводить тепло после достижения

АнП в регионах - задняя поверхность шеи и поверхность участка спины «между лопаток»?

В исследовании (Son'kin V.D., et al, 2014) мы предположили, что этот экстраординарный нагрев поверхности шеи в конце тяжелой работы отражает активное поглощение лактата бурым жиром, расположенным в промежутках между пучками шейных мышц. В бурой жировой ткани, очевидно, происходят процессы, направленные на стабилизацию pH крови - поглощение лактата вместе с H^+ (De Matteis R., et al, 2012; Son'kin V.D., et al, 2014). Активность подкожных термогенных структур, таких как бурый жир, обычно ассоциируется с поглощением глюкозы (Cannon B., et al, 2004), но в настоящем исследовании, изменение концентрации глюкозы в крови, в отличие от лактата, никакой связи с температурой не имеет. Слабая реакция поверхности шеи и верха спины на типичные для БЖТ стимуляторы – холод и глюкозу, определенные в нашем предыдущем исследовании (Козлов А.В., Сонькин В.Д., 2019) заставляют усомниться в этой гипотезе и высказать новое предположение: наблюдаемый термогенный эффект может быть проявлением термогенеза тонических скелетных мышц, которые очевидно в этих регионах наиболее близки к поверхности кожи. Не случайно тоническая мускулатура обладает своим собственным разобщающим белком UCP3, который работает так же, как и UCP1 в буром жире или UCP2 во внутренних органах (Oliveira B.A., et al, 2014; Hagen T., Vidal-Puig A., 2002). Возможно, такой термогенез является следствием решения гомеостатических задач на фоне значительных изменений внутренней среды организма и является одним из взаимосвязанных составляющих оптимального состояния спортсмена в условиях напряженной мышечной работы. Это может благоприятно сказываться на спортивных результатах в тех видах, в которых работает преимущественно анаэробная энергетика (Бондарева Э.А. и др., 2018).

Так или иначе, задняя поверхность шеи и верхней части спины представляется регионом максимальной термогенной активности после наступления АНП вплоть до отказа от продолжения работы.

В нашем исследовании между скоростью бега, соответствующей $АНП-La$ ($13,3 \pm 0,89$) и скоростью бега, соответствующей $АНП-t^{\circ}C$ ($12,9 \pm 1,3$) не выявлено статистических различий ($p < 0,05$), но взаимосвязь между этими показателями является недостаточно высокой ($R^2 = 0,35$), чтобы использовать измерение кожной температуры для строгого определения АНП.

Очевидно, то что $АНП-La$ и $АНП-t^{\circ}C$ слабо коррелируют между собой. Это может быть связано с тем, что регистрация температуры производилась в процессе движения, при этом корпус испытуемого постоянно смещался в горизонтальной плоскости относительно центральной вертикальной оси (вправо–влево), а также постоянно колебался в вертикальной плоскости, что создавало дополнительные помехи для измерения температуры в динамических наблюдениях, дестабилизировало динамику изменения кожной температуры и привело к большому разбросу данных (см. Рис. 4.2 и 4.3).

В связи с этим, мы приходим к выводу, что термографический метод пригоден только для приближенной оценки АНП.

4.2.2. Графический метод расчета анаэробного порога у спортсменов по динамике ЧСС в работе и восстановительном периоде в тесте с повышением нагрузки до отказа

При равномерном росте нагрузки с той или иной фиксированной скоростью, предельное время работы в тесте эквивалентно показателю максимальной достигнутой мощности (интенсивности) нагрузки. После завершения работы, шкала времени сохраняет свое базовое значение для оценки динамики пульсовой кривой в процессе восстановления, в частности, для обнаружения границы между быстрой и медленной фазами

восстановительного периода. Такая граница на графике зависимости ЧСС от времени восстановления выглядит как точка перегиба кривой (Рис. 4.4), просто и однозначно определяемая визуально (Козлов А.В. и др., 2019).

Графический метод расчета АНП по динамике ЧСС основан на предположении о том, что переломные моменты в динамике ЧСС при непрерывной работе с повышением мощности и в дальнейшем срочном восстановлении отражают изменения в функциональном состоянии спортсмена, и в совокупности имеют прогностическое значение для определения АНП.

Расчет времени достижения АНП по динамике ЧСС графическим методом

Если на протяжении теста нагрузка равномерно нарастает с той или иной фиксированной скоростью, то мощность выполняемой нагрузки прямо пропорционально зависит от времени. Это означает, что для анализа динамики физиологических процессов можно использовать временную шкалу. Предельное время при этом эквивалентно показателю максимальной достигнутой мощности/скорости. По завершении активной части теста, шкала времени сохраняет свое значение для оценки динамики пульсовой кривой в процессе восстановления, в частности, для определения границы между быстрой и медленной фазами восстановительного периода. Опираясь на эту динамику, мы можем формализовать процедуру определения значения времени АНП по параметрам пульсовой кривой с учетом как времени работы, так и периода восстановления.

Эмпирически разработанный расчет времени достижения АНП по динамике ЧСС графическим методом проводили с использованием MS Excel.

Параметрами этого графического построения являются:

- 1) время от начала процедуры тестирования до отказа от продолжения работы;
- 2) момент времени, соответствующий границе быстрой и медленной фаз восстановительного периода на пульсовой кривой;

3) величина ЧСС во время отказа от продолжения работы в тесте (ЧСС_{отк});

4) величина ЧСС в момент прохождения точки перегиба пульсовой кривой, разделяющей быструю и медленную фазы восстановительного периода;

Пример расчета представлен на Рис. 4.4, на котором по шкале абсцисс отложено время от начала процедуры тестирования, а на шкале ординат – величина ЧСС, соответствующая времени выполнения равномерно повышающейся нагрузки или восстановления. На графике, отражающем фактическую динамику ЧСС во время работы и 10 мин восстановления, необходимо провести две прямые пересекающиеся линии. На Рис. 4.4 этими линиями являются прямые 1 и 2.

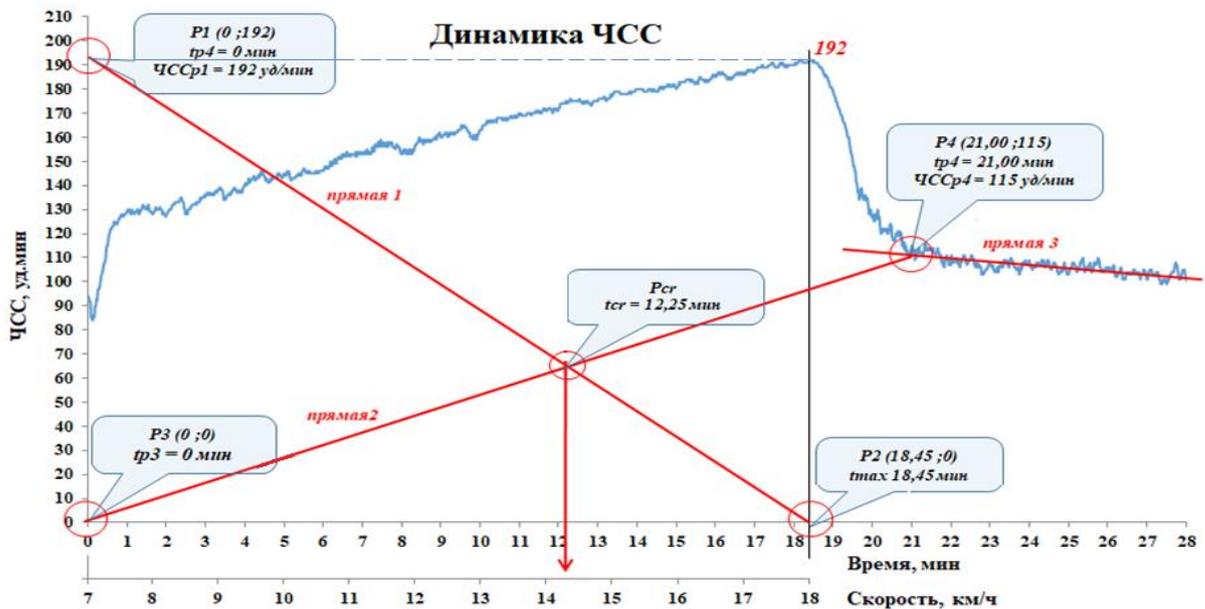


Рисунок 4.4. Пример определения АнП графическим методом по динамике ЧСС испытуемого во время выполнения физической работы и восстановления. Черной линией отмечен отказ спортсмена от продолжения работы (t_{max}). Пояснения в тексте.

Положение *Прямой 1* определяют координаты точки $P1$ и точки $P2$, т.е. положение *Прямой 1* зависит от значений времени отказа от продолжения работы в тестировании (t_{max}) и соответствующей отказу ЧСС (ЧСС_{отк}).

Прямая 2 проводится между точкой начала координат ($P3$) и точкой перегиба пульсовой кривой восстановления ($P4$), т.е. положение *Прямой 2* зависит от значений времени и ЧСС в момент, когда график динамики ЧСС

во время восстановления переходит из быстрой фазы в медленную и приобретает линейный характер.

Для более точного нахождения точки $P4$ можно построить еще одну прямую (*Прямая 3*), совпадающую с линейным трендом той части пульсовой кривой восстановления, которая относится к медленной фазе восстановительного периода.

Проекция точки перекреста прямых 1 и 2 (P_{cr}) на шкалу абсцисс соответствует ВРЕМЕНИ достижения АНП, что позволяет также однозначно определить его мощность/скорость.

Для упрощения расчета времени достижения АНП (t_{cr}), из способа определения координат точки пересечения прямых с помощью системы линейных уравнений, по параметрам графического построения была выведена формула расчета времени достижения АНП:

$$t_{cr} = ЧСС_{отк} / (ЧСС_{p4}/t_{p4} + ЧСС_{отк}/t_{max}). \quad (\text{ф. 21})$$

Для проверки валидности предложенного построения была проведена экспериментальная серия с участием 110 квалифицированных спортсменов разной специализации. В ходе обследования были получены максимальные эргометрические и физиологические показатели нагрузочного тестирования участников эксперимента (Таб. 4.2.), которые дают представление о физическом состоянии наших испытуемых:

Таблица 4.2. Характеристика максимальных возможностей испытуемых разных специализаций ($M \pm \sigma$)

Параметр	m , кг	$МПК_{отн}$, мл/мин/кг	$МПК_{абс}$, л/мин	$ЧСС_{макс}$, уд/мин	t_{max} , мин	V_{max} , км/ч	W_{max} , Вт
Смеш. группа (n=32)	68,3 ± 10	58,9 ± 6,3	4,01 ± 0,70	199 ± 6	16,3 ± 2,0	16,6 ± 1,2	
Велосипедисты (n=14)	68,0 ± 9,6	58,7 ± 8,7	3,95 ± 0,59	193 ± 7	18,5 ± 2,5		320 ± 55
Биатлонисты (n = 18)	72,5 ± 6,7	67,3 ± 9,0	4,90 ± 0,95	191 ± 7	21,3 ± 3,7	21,2 ± 2,5	
Футболисты (n = 27)	66,9 ± 9,5	57,9 ± 4,5	3,84 ± 0,38	200 ± 6	14,0 ± 1,6	15,3 ± 1,0	
Гребцы (n = 19)	85,5 ± 7,1	57,0 ± 5,5	4,96 ± 0,50	197 ± 8	18,0 ± 2,4		411 ± 32

Примечание:

m - масса тела, кг;

$МПК_{отн}$ - относительное максимальное потребление кислорода, л/мин;

$МПК_{абс}$ - абсолютное максимальное потребление кислорода, мл/кг/мин;

$ЧСС_{макс}$ - максимальная частота сердечных сокращений, уд/мин;

t_{max} - время отказа от продолжения работы, мин;

V_{max} - максимальная достигнутая в тесте скорость, км/ч;

W_{max} - максимальная достигнутая абсолютная мощность, Вт;

В каждой группе спортсменов были сопоставлены средние групповые значения временных показателей АНП, вычисленных разными способами: по легочной вентиляции ($АНП-V\dot{E}$); по неметаболическому излишку CO_2 ($АНП-ExhCO_2$); по лактату ($АНП-La$); по динамике ЧСС графическим методом ($АНП-t_{cr}$), а также соответствующие этим временным характеристикам эргометрические и физиологические показатели (V или W , ЧСС, $V\dot{O}_2$, $ExhCO_2$, $V\dot{E}$, ДК, La), демонстрирующие напряженность функций организма на уровне АНП. Результаты представлены в Таб. 4.3.

Таблица 4.3. Средние групповые значения эргометрических и физиологических показателей на уровне АНП, полученные для 4-х различных критериев достижения АНП с помощью различных вариантов инкрементного теста у спортсменов разных специализаций

Тесты	Критерии достижения АНП	t , мин	V , км/ч	W , Вт	ЧСС, уд/мин	$V\dot{O}_2$, л/мин	$V\dot{E}$, л/мин	ДК, у.е.	La , мм/л
В рамп-тесте на беговом тредбане у смешанной группы (n=32)	$АНП-t_{cr}$	10,8 ±1,4	13,3 ±0,8		181 ±9	3,30 ±0,6	94 ±16	0,95 ±0,1	2,92 ±1,0
	$АНП-V\dot{E}$	10,7 ±1,5	13,3 ±0,9		181 ±8	3,33 ±0,6	93 ±17	0,9 ±0,1	2,91 ±1,0
	$АНП-ExhCO_2$	10,9 ±1,5	13,4 ±0,9		182 ±9	3,35 ±0,6	94 ±17	0,95 ±0,1	3,0 ±1,0
	$АНП-La$	10,4 ±1,4	13,1 ±0,8		179 ±9	3,29 ±0,6	91 ±16	0,94 ±0,1	2,7 ±0,9
В ступенчатом тесте на велоэргометре у велосипедистов (n=14)	$АНП-t_{cr}$	12,3 ±1,6		219 ±41	163 ±11	2,94 ±0,4	75 ±8	1,01 ±0,1	2,91 ±0,9
	$АНП-V\dot{E}$	12,3 ±1,9		218 ±44	163 ±11	2,94 ±0,4	73 ±8	1,00 ±0,1	2,86 ±0,8
	$АНП-ExhCO_2$	12,2 ±1,7		217 ±41	163 ±11	2,93 ±0,4	73 ±7	1,00 ±0,1	2,80 ±1,0
	$АНП-La$	11,7 ±1,7		210 ±37	160 ±12	2,84 ±0,4	71 ±8	0,99 ±0,1	2,57 ±0,76
В ступенчатом тесте на лыжероллерном тредбане у биатлонистов (n=18)	$АНП-t_{cr}$	14,1 ±2,4	16,3 ±1,6		175 ±10	3,86 ±0,7	101 ±15	0,95 ±0,3	2,87 ±0,8
	$АНП-V\dot{E}$	14,3 ±2,7	16,4 ±1,8		175 ±10	3,87 ±0,7	102 ±16	0,95 ±0,3	2,97 ±0,9
	$АНП-ExhCO_2$	14,4 ±2,7	16,4 ±1,9		175 ±10	3,89 ±0,7	102 ±16	0,95 ±0,3	2,98 ±0,9
	$АНП-La$	13,8 ±2,3	16,1 ±1,5		174 ±10	3,84 ±0,6	100 ±14	0,95 ±0,3	2,70 ±0,8
В рамп-тесте на беговом тредбане у футболистов (n=27)	$АНП-t_{cr}$	9,5 ±1,0	12,8 ±0,6		187 ±6	3,33 ±0,4	99 ±12	0,96 ±0,0	3,85 ±0,96
	$АНП-V\dot{E}$	9,3 ±1,3	12,6 ±0,8		186 ±7	3,30 ±0,4	96 ±12	0,95 ±0,0	3,73 ±0,0
	$АНП-ExhCO_2$	9,4 ±1,2	12,7 ±0,7		186 ±6	3,32 ±0,4	98 ±12	0,95 ±0,0	3,76 ±0,9
	$АНП-La$	8,6 ±1,2	12,2 ±0,7		183 ±7	3,22 ±0,3	92 ±11	0,94 ±0,0	3,31± 0,8
В ступенчатом тесте на гребном эргометре у гребцов (n=19)	$АНП-t_{cr}$	11,1 ±1,7		278 ±33	181 ±9	3,71 ±0,3	109 ±12	0,90 ±0,1	3,84 ±0,7
	$АНП-V\dot{E}$	10,5 ±1,7		265 ±34	178 ±8	3,64 ±0,3	104 ±12	0,88 ±0,1	3,31 ±0,6
	$АНП-ExhCO_2$	10,4 ±1,6		274 ±32	180 ±8	3,74 ±0,3	108 ±13	0,88 ±0,1	3,59 ±0,6
	$АНП-La$	10,1 ±1,7		256 ±35	175 ±10	3,51 ±0,3	99 ±11	0,87 ±0,1	3,05 ±0,5

Как показывает Таб. 4.3, внутри каждой группы спортсменов значения показателей, соответствующие $АнП-t_{cr}$, во всех случаях практически совпадают с показателями, соответствующими трем другим способам оценки $АнП - АнП-V\dot{E}$, $АнП-ExсCO_2$, $АнП-La$.

В Таб. 4.4 представлены результаты парного двухвыборочного t -теста. Были определены различия между показателями (V , W , $ЧСС$, $V\dot{O}_2$, $ExсCO_2$, $V\dot{E}$, $ДК$, La), соответствующими $АнП-t_{cr}$ и одноименными показателями, которые соответствуют $АнП-V\dot{E}$, $АнП-ExсCO_2$, $АнП-La$.

Таблица 4.4. Достоверность статистических различий (p) между парами одноименных показателей для 3 способов определения $АнП$ по отношению к графическому методу. Достоверными являются различия при $p < 0.05$ (выделены жирным шрифтом)

		t	V/W	$ЧСС$	$V\dot{O}_2$	$V\dot{E}$	$ДК$	La
В рамп-тесте на беговом тредбане у смешанной группы ($n=32$)	$АнП-V\dot{E}$	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	$АнП-ExсCO_2$	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	$АнП-La$	***	***	***	ns	***	***	***
В ступенчатом тесте на велоэргометре у велосипедистов ($n=14$)	$АнП-V\dot{E}$	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	$АнП-ExсCO_2$	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	$АнП-La$	***	ns	***	***	***	***	***
В ступенчатом тесте на лыжероллеоном тредбане у биатлонистов ($n=18$)	$АнП-V\dot{E}$	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	$АнП-ExсCO_2$	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	$АнП-La$	ns	ns	***	ns	ns	ns	ns
В рамп-тесте на беговом тредбане у футболистов ($n=27$)	$АнП-V\dot{E}$	ns	ns	ns	ns	***	***	ns
	$АнП-ExсCO_2$	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	$АнП-La$	***	***	***	***	***	***	***
В ступенчатом тесте на гребном эргометре у гребцов ($n=19$)	$АнП-V\dot{E}$	***	***	***	ns	ns	***	***
	$АнП-ExсCO_2$	***	***	ns	ns	***	***	***
	$АнП-La$	***	***	***	***	***	***	***

Примечание: ns – различия незначимы; *** – различия значимы (при $p < 0.05$)

Приведенные данные (Таб. 4.4) показывают, что почти все показатели, полученные в ступенчатом тесте у гребцов, достоверно отличаются от одноименных показателей, полученных графическим методом оценки $АнП$. Однако, в чем причина этих отличий? Мы предполагаем, что выявленные различия происходят из-за особенностей протокола нагрузки, примененного в тестировании гребцов. Эти спортсмены выполняли ступенчато-повышающуюся нагрузку на гребном эргометре с остановками в конце

каждой ступени на 30 секунд для взятия крови на анализ концентрации лактата. Такие остановки нарушали непрерывность теста и, очевидно, приводили к искажению динамики ЧСС в рабочем и восстановительном периодах, на основании которой работает графический метод. При анализе работы с остановками нарушается сам смысл использования шкалы времени, которая на протяжении работы в тестировании эквивалентна интенсивности нагрузки, равномерно нарастающей с той или иной фиксированной скоростью.

Следующий результат, полученный благодаря статистическому сравнению, состоит в том, что АИП на уровнях $АИП-V\dot{E}$, $АИП-ExсCO_2$, $АИП-t_{cr}$ значительно отличается от $АИП-La$ у всех групп спортсменов, кроме биатлонистов. Различия между лактатным и вентиляторным порогами давно обсуждаются в литературе (Maidaniuk E., 2016), и наши данные добавляют новые факты к этому сопоставлению (см. Таб. 4.4). Тем не менее, в группе биатлонистов таких различий не выявлено. Возможно, это является следствием специфики нагрузки, выполняемой на лыжероллерном тредбане, при которой одновременно работают все крупные мышцы тела.

Таким образом, сопоставление пар одноименных признаков, функционально характеризующих уровень АИП, демонстрирует отсутствие различий между этими признаками, полученными при определении АИП графическим методом и любым из двух наиболее популярных методов – по вентиляции и по газообмену. Следовательно, графический метод можно применять в тех случаях, когда желательно получить параметры вентиляторного либо газообменного порога, но он не в полной мере пригоден для точного определения лактатного порога, выявленного с помощью метода D-max.

Тем не менее, выявлены высокие достоверные коэффициенты парной корреляции между показателями соответствующими $АИП-t_{cr}$, и аналогичными показателями соответствующими $АИП-V\dot{E}$, $АИП-ExсCO_2$, $АИП-La$, во всех экспериментальных группах, включая гребцов (Таб. 4.5).

Таблица 4.5. Корреляционные взаимосвязи ($p < 0,05$) показателей соответствующих АП- t_{cr} , с аналогичными показателями соответствующими АП- $V\dot{E}$, АП- $ExcCO_2$, АП- La

		t	V/W	ЧСС	$V\dot{O}_2$	$V\dot{E}$	ДК	La
В рамп-тесте на беговом тредбане у смешанной группы (n=32)	АП- $V\dot{E}$	0,93	0,93	0,94	0,98	0,94	0,95	0,93
	АП- $ExcCO_2$	0,95	0,96	0,98	0,99	0,98	0,98	0,92
	АП- La	0,94	0,94	0,96	0,99	0,94	0,97	0,97
В ступенчатом тесте на велоэргометре у велосипедистов (n=14)	АП- $V\dot{E}$	0,95	0,97	0,92	0,96	0,73	0,98	0,89
	АП- $ExcCO_2$	0,97	0,94	0,94	0,93	0,78	0,96	0,92
	АП- La	0,93	0,95	0,98	0,95	0,88	0,97	0,91
В ступенчатом тесте на лыжероллерном тредбане у биатлонистов (n=18)	АП- $V\dot{E}$	0,9	0,89	0,95	0,94	0,92	0,98	0,93
	АП- $ExcCO_2$	0,94	0,94	0,97	0,95	0,92	0,97	0,93
	АП- La	0,82	0,81	0,95	0,93	0,91	0,99	0,93
В рамп-тесте на беговом тредбане у футболистов (n=27)	АП- $V\dot{E}$	0,86	0,86	0,94	0,97	0,88	0,92	0,93
	АП- $ExcCO_2$	0,93	0,93	0,97	0,99	0,95	0,97	0,92
	АП- La	0,95	0,95	0,96	0,97	0,88	0,87	0,94
В ступенчатом тесте на гребном эргометре у гребцов (n=19)	АП- $V\dot{E}$	0,93	0,93	0,92	0,84	0,9	0,92	0,82
	АП- $ExcCO_2$	0,96	0,97	0,98	0,97	0,92	0,92	0,88
	АП- La	0,93	0,92	0,93	0,74	0,82	0,86	0,74

Наличие высоких корреляций означает – несмотря на отсутствие полной эквивалентности (тождественности) между графическим и лактатным порогами, результаты полученные графическим методом объективно отражают параметры аэробно-анаэробного перехода. Мы полагаем, что ошибка прогнозирования параметров АП при расчетах графическим методом вполне приемлема для практического использования этого простого метода, не требующего, к тому же, применения сложной и дорогостоящей аппаратуры и инвазивных процедур.

На чем основана предложенная методика графического расчета?

ЧСС является выражением одновременно регуляторной и метаболической составляющих процесса энерговегетативного обеспечения мышечной деятельности. Динамика ЧСС в ходе работы с повышением нагрузки и срочном восстановлении отражает изменение физиологического состояния испытуемого – процесса, длящегося во времени, в котором содержатся определенные моменты резкого изменения динамических характеристик этого процесса. Таких моментов мы регистрируем три: момент начала отсчета времени теста (т. РЗ); момент отказа от продолжения

работы (т. P2); момент завершения первой, быстрой фазы восстановления и перехода к медленной фазе восстановления, которому соответствует т. P4.

Переломные моменты в динамике ЧСС при непрерывной работе с повышением мощности и в последующем срочном восстановлении всегда имеют физиологический смысл и могут свидетельствовать об объеме и структуре физиологических затрат организма.

Значение ЧСС_{отк} (т. P1) и продолжительность работы в тесте (т. P2) характеризуют объем физиологических затрат, связанных с аэробными механизмами энергообеспечения и определяют положение прямой 1. Значение ЧСС и соответствующий ей момент перехода быстрой фазы восстановления в медленную (т. P4) характеризуют объем физиологических затрат, связанных с анаэробными механизмами энергообеспечения (ЧСС_{P4} тесно коррелирует с объемом общего пульсового долга за 10 мин - 0.95, $p < 0.05$) и определяют положение прямой 2.

Исходя из этого, мы предполагаем, что прямые 1 и 2 схематично характеризуют активность физиологических процессов, зависящих от интенсивности нагрузки, которая равномерно повышается в процессе тестирования с течением времени:

Прямая 1 характеризует снижение окислительных резервов организма при повышении нагрузки.

Прямая 2 характеризует интенсивность процессов, связанных с накоплением лактата и закислением организма.

Очевидно, точка пересечения прямых 1 и 2 соответствует моменту достижения уровня нагрузки, после которого интенсивность образования лактата и закисление организма становятся выше интенсивности процессов, способствующих окислению лактата и H^+ .

Очевидно, точка перегиба восстановительной динамики ЧСС – P4, которая является условной границей быстрой и медленной фаз пульсового долга, – одна из наиболее важных прогностических точек пульсовой кривой «работа-восстановление».

Объем быстрой фракции кислородного долга связан с ресинтезом КрФ (Margaria R., 1976; Cerretelli R., 1982), а значит с энергетическим потенциалом клеток (Atkinson D.E., 1968, 1977). Медленная фаза восстановления после предельной нагрузки сопряжена с погашением той части кислородного долга, которая определяется наличием накопленного в организме лактата (Margaria R., et al, 1933). R. Harris et al. показали, что при интенсивных истощающих нагрузках, в мышце имеется линейная зависимость между показателем энергетического потенциала клетки и содержанием лактата (Harris R. S., et al, 1977). Из этого следует, что относительный объем быстрой и медленной фракций кислородного долга, а также его дериватов в виде пульсовых кривых восстановления, может иметь прогностическое значение для оценки характеристик работоспособности, т.к. соотношение величин быстрой и медленной фракций восстановления зависит от степени вовлеченности в работу разных механизмов энергообеспечения (т.е. от индивидуальных физиологических особенностей работоспособности спортсмена).

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

В общем, теоретическое осмысление выявленного нами эмпирического феномена – предмет дальнейших исследований.

Графический метод прост для визуального определения АНП: мы не ищем отклонение от линейности ЧСС, которое недостаточно наглядно и сложно определяется, часто отсутствует и не может быть надежным ориентиром для оценки АНП. Мы используем совершенно другой критерий – момент времени, когда на смену первой, «быстрой» фазе восстановления ЧСС приходит вторая, «медленная». В связи с этим, точка перегиба восстановительной динамики ЧСС (P4), в совокупности с другими

параметрами графического построения является надежным критерием для определения АП. Это подтверждается результатами настоящего исследования.

Предлагаемый эмпирический метод информативен и не нуждается в использовании дорогостоящей и сложной газометрической аппаратуры или в инвазивных процедурах и высококвалифицированном персонале. Точность метода не зависит от параметров протокола непрерывной нагрузки и выбора нагрузочного оборудования.

4.3. Заключение по разделу

Результаты исследования информативности определения АП по динамике кожной температуры позволяют предположить, что при повышении нагрузки, повышение температуры поверхности тела с ростом лактата в периферической крови происходит из-за его утилизации тоническими скелетными мышцами. В пользу этого предположения свидетельствует тесная положительная взаимосвязь между температурой кожи и концентрацией лактата с момента достижения $АП-La$ до конца периода наблюдения, при отсутствии взаимосвязи между температурой и концентрацией глюкозы в крови. Это характеризует теплообменные процессы человека во время работы с повышением нагрузки как один из феноменов АП, но не позволяет использовать измерение кожной температуры для его строгого определения из-за недостаточно высокой взаимосвязи между скоростью бега, соответствующей $АП-La$, и скоростью бега, соответствующей $АП-t^{\circ}C$.

Результаты исследования информативности определения АП графическим методом показывают, что параметры графического построения по динамике ЧСС во время работы с повышением нагрузки и в срочном восстановлении, характеризуют индивидуальные физиологические особенности работоспособности, влияющие на уровень АП. У спортсменов, выполняющих различные варианты теста с равномерным повышением

нагрузки, выявлены тесные взаимосвязи между одноименными эргометрическими и физиологическими показателями, соответствующими АНП, который определялся с помощью газометрических методов и АНП, который рассчитывался с помощью графического метода.

Независимо от протокола нагрузки и нагрузочного устройства, на котором выполнялась работа, статистический анализ не выявил значимых различий у одних и тех же спортсменов между результатами измерения АНП по показателям газообмена и результатами оценки АНП графическим методом.

Важным фактором корректности методики определения АНП является протокол нагрузки. Так, в группе гребцов, где протокол тестирования, в отличие от остальных групп, включал 30-секундную остановку после каждой ступени нагрузки для взятия капиллярной крови, точность определения АНП расчетным методом оказалась ниже, чем во всех других группах.

Графический метод определения АНП по динамике ЧСС во время работы с повышением нагрузки и срочным восстановлением информативен, прост, не нуждается в высококвалифицированном персонале, в использовании дорогостоящей и сложной газометрической аппаратуры или инвазивных процедурах. Точность расчета при этом не зависит от параметров протокола непрерывной нагрузки и выбора нагрузочного оборудования. Все это открывает широкие перспективы использования метода на практике: в подготовке спортсменов и в фитнесе.

Заключение

В результате проведенного нами исследования разработана линейка показателей, характеризующих физиологическое напряжение организма при выполнении циклической нагрузки. Расчет этих показателей основан на эргометрии и неинвазивных измерениях ЧСС, что позволяет использовать их непосредственно в тренировочном процессе.

Рассмотрена возможность использовать бесконтактную термографию для неинвазивного определения АНП в тесте с повышением нагрузки. Метод нуждается в доработке для преодоления проблемы колебаний корпуса испытуемого – возможно, в этом поможет контактная термометрия.

Предложен эмпирический вариант анализа пульсограммы испытуемого для определения АНП в тесте с равномерным повышением нагрузки до отказа. Метод опирается на переломные моменты в динамике ЧСС испытуемого в процессе работы и восстановления. Результаты этого теста хорошо совпадают с классическими способами определения АНП, кроме лактатного, и не зависят от используемого нагрузочного устройства и протокола нагрузки, при соблюдении условия непрерывности работы. Этот метод обеспечивает неинвазивное измерение характеристик АНП.

ВЫВОДЫ

1. Разработаны пульсометрические методы оценки интенсивности физиологических затрат и структуры энергообеспечения циклических упражнений. Критерии, рассчитанные с помощью этих методов, являются информативными в диапазоне циклических нагрузок от *АЭП* до *МАМ*. Выявлены тесные взаимосвязи *УИФЗчсс* и *АнВ_{чсс}* с аналогичными показателями, рассчитанными по потреблению кислорода ($R^2 = 0,85$ и $R^2 = 0,98$, соответственно). Обнаружен одинаковый характер зависимости одноименных пульсометрических и газометрических показателей от мощности и предельной длительности циклической нагрузки. Предложенный пульсометрический показатель – $HЭ_{чсс}$ можно использовать для косвенной оценки выполненной физической работы в том случае, если нет возможности регистрировать потребление O_2 и мощность внешней нагрузки. Показаны тесные взаимосвязи $HЭ_{чсс}$ с аналогичным показателем, рассчитанным по O_2 , а

также с внешней физической нагрузкой ($R^2 = 0,97$ и $R^2 = 0,97$, соответственно).

2. Разработанные нами пульсометрические показатели $АнВ_{чсс}$ и $НЭан_{чсс}$ отражают активность анаэробных процессов в энергообеспечении выполненной физической нагрузки и демонстрируют тесные взаимосвязи этих показателей – соответственно: со скоростью накопления лактата $САЛа$ ($R^2=0,97$, степенная взаимосвязь) и с абсолютными величинами максимальной концентрации лактата в крови – $максЛа$ ($R^2=0,59$, линейная взаимосвязь).

3. Разработаны пульсометрические подходы к определению дозы воздействия физической нагрузки и ее анаэробной части для циклических упражнений. Их информативность в диапазоне нагрузок от $АЭП$ до $МАМ$ подтверждается тесными взаимосвязями $ДН_{чсс}$ и $ДНан_{чсс}$ с аналогичными показателями, рассчитанными по потреблению кислорода ($R^2 = 0,96$ и $R^2 = 0,69$, соответственно).

4. Динамика кожной температуры при выполнении инкрементного теста, зарегистрированная с помощью тепловизора, демонстрирует закономерное повышение температуры поверхности шеи и верха спины спортсмена после достижения порога мощности (скорости), с которого начинается экспоненциальный рост концентрации лактата в крови. Однако, определение $АнП$ по тепловизионной динамике кожной температуры обладает ограниченной точностью и не может широко применяться в тренировочной практике, поскольку выявлен большой разброс данных температуры поверхности спины вследствие колебаний тела спортсмена в процессе тестирования в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Между скоростью бега, соответствующей $АнП-La$, и скоростью бега, соответствующей $АнП-t^{\circ}C$, выявлен средний уровень взаимосвязи ($R^2=0,35$), что не позволяет осуществлять надежное прогнозирование $АнП$ на основании данных инфракрасной термометрии.

5. Разработан оригинальный эмпирический неинвазивный графический метод определения АП, основанный на анализе динамики ЧСС в непрерывной работе с равномерным повышением мощности до отказа и 10 минут восстановления. В натурном эксперименте с участием 110 квалифицированных спортсменов различных видов спорта показано, что значения эргометрических и физиологических показателей анаэробного порога, получаемых этим методом, объективно отражают параметры аэробно-анаэробного перехода. Информативность графического метода определения АП по динамике ЧСС в работе до отказа и восстановительном периоде не зависит от протокола непрерывной нагрузки и выбора нагрузочного устройства.

Практические рекомендации

С помощью рассчитанных по предложенным алгоритмам показателей интенсивности физиологических затрат – $УИФЗ_{чсс}$ и относительного вклада анаэробных источников – $АнВ_{чсс}$ можно определять энергетическую направленность физических нагрузок, а также величину и направленность изменений в работоспособности у спортсмена за определенный этап подготовки, сравнивая эти показатели в стандартных упражнениях на начальном и конечном срезе применительно к каждому этапу. Снижение $УИФЗ_{чсс}$ у спортсмена после этапа подготовки в одинаковом непредельном по времени специальном упражнении (например, пробегание неполной дистанции с желаемой соревновательной скоростью) может свидетельствовать о повышении его работоспособности. Снижение или повышение в таком упражнении показателя $АнВ_{чсс}$ может показывать энергетическую направленность изменений в работоспособности спортсмена.

Для количественной оценки воздействия физической нагрузки в тренировочном занятии, предложены новые показатели: доза воздействия нагрузки ($ДН_{чсс}$ и $ДНан_{чсс}$), а также нагрузочная экспозиция ($НЭ_{чсс}$ и $НЭан_{чсс}$).

Нагрузочные характеристики различных упражнений, выполненные в рамках одной тренировки должны суммироваться.

Суммарная оценка доз нагрузки разных упражнений необходима для анализа тяжести тренировки в целом. Такой анализ тренировочных занятий можно использовать для распределения тренировок различной тяжести в микроцикле, а также для планирования тренировочной нагрузки в микро- и макроциклах подготовки, и сопоставления объемов тренировочной работы с результативностью спортсмена.

В случае, если упражнения различаются по виду деятельности, или при невозможности измерять мощность/скорость упражнений, для количественной оценки можно суммировать величины нагрузочной экспозиции.

Если у спортсменов нет возможности периодически проходить тестирование для оценки АИП в специальной лаборатории, то рекомендуется применять предложенный нами графический метод расчета АИП, для этого необходимо использовать регистратор ЧСС и устройство, дозирующее нагрузку. Метод можно использовать в тестировании при непрерывной нагрузке на любых тренажерных устройствах, на которых установлены датчики скорости/мощности, либо в полевых протоколах, в которых скорость повышается ступенчато и может рассчитываться по параметрам времени и расстояния.

Все эти методические приёмы направлены на усовершенствование информационного обеспечения тренера для анализа функционального состояния спортсменов, что позволит повысить качество оперативного контроля и уровень индивидуализации нагрузки для спортсменов.

Литература

1. Акимов Е. Б. и др. Температурный портрет человека и его связь с аэробной производительностью и уровнем лактата в крови // Физиология человека. – 2010. – Т. 36. – №. 4. – С. 89-101.
2. Акимов Е. Б., Алексеев В. М. Эффекты продуцирования сенсорной напряженности во время велоэргометрической работы // Физиология человека. – 2008. – Т. 34. – №. 6. – С. 126-130.
3. Акимов Е. Б., Сонькин В. Д. Кожная температура и лактатный порог во время мышечной работы у спортсменов // Физиология человека. – 2011. – Т. 37. – №. 5. – С. 120-128.
4. Алексеев В. М., Акимов Е. Б. Эффекты продуцирования сенсорной напряженности во время аэробной велоэргометрической работы // Теория и практика физической культуры. – 2008. – №. 8. – С. 66-70.
5. Биохимия мышечной деятельности / Под ред. Н.И. Волкова, Э.Н. Несен, А.А. Осипенко, С.Н. Корсун. - Киев: Олимпийская литература, 2000. - 503 с
6. Бондарева Э. А. и др. Полиморфизм гена UCP2 реципрокно ассоциирован с аэробной и анаэробной производительностью у спортсменов // Физиология человека. – 2018. – Т. 44. – №. 6. – С. 79-85.
7. Волков Н. И. Биохимический контроль в спорте: проблемы и перспективы // Теория и практика физической культуры. – 1975. – №. 11. – С. 35.
8. Волков Н. И. и др. Физиологические критерии нормирования тренировочных и соревновательных нагрузок в спорте высших достижений // Физиология человека. – 2005. – Т. 31. – №. 5. – С. 125-134.
9. Волков Н. И., Корниенко Т. Г., Тамбовцева Р. В. Показатели вентиляционной стоимости и респираторного ответа в критических режимах мышечной деятельности у спортсменов,

- специализирующихся в беге на средние и длинные дистанции //Физиология человека. – 2014. – Т. 40. – №. 5. – С. 80-80.
10. Волков Н. И., Попов О. И., Самборский А. Г. Пульсовые критерии энергетической стоимости упражнения //Физиология человека. – 2003. – Т. 29. – №. 3. – С. 98-103.
 11. Волков Н. И., Савельев И. А. Кислородный запрос и энергетическая стоимость напряженной мышечной деятельности человека //Физиология человека. – 2002. – Т. 28. – №. 4. – С. 80-93.
 12. Волков Н.И. Энергетический обмен и работоспособность человека в условиях напряженной мышечной деятельности: дис. канд. биол. наук: Москва, 1968. - 738 с.
 13. Волков Н.И., Олейников В.И. Биоэнергетика спорта / Н. И. Волков, В. И. Олейников. – Москва: Советский Спорт, 2011. – 160 с.
 14. Гланц С. Медико-биологическая статистика. Пер. с англ. — Москва: Практика, 1998. — 459 с.
 15. Исследования по физиологии физических упражнений, [Текст], труды Государственного центрального научно-исследовательского института физической культуры, Всесоюзный комитет по делам физической культуры и спорта при СНК СССР ; под ред. В. С. Фарфеля ; [предисл. В. Фарфеля], Вып. I Москва : Физкультура и спорт , 1939 .- 133 с
 16. Козлов А. В. и др. Взаимосвязь интенсивности накопления пульсового долга со скоростью образования кислородного запроса и накопления лактата в крови при выполнении предельных циклических упражнений различной продолжительности //Спортивная медицина: наука и практика. – 2023. – Т. 12. – №. 3. – С. 43-50.
 17. Козлов А. В. и др. Метод определения анаэробного порога по динамике ЧСС в процессе работы и восстановления при выполнении теста нарастающей мощности до отказа //Физиология человека. – 2019. – Т. 45. – №. 2. – С. 78-86.

18. Козлов А. В., Сонькин В. Д. Инфракрасная тепловизионная диагностика подкожных термогенераторов несократительного теплообразования // Физиология человека. – 2019. – Т. 45. – №. 6. – С. 86-102.
19. Корниенко И. А., Сонькин В. Д. Энергетическая и физиологическая «стоимость» мышечной работы детей 7-17 лет // Физиология человека. – 1991. – Т. 17. – №. 5. – С. 130-141.
20. Король В. М., Сонькин В. Д., Ратушная Л. И. Мышечная работоспособность и частота сердечных сокращений у подростков в зависимости от уровня полового созревания // Теория и практика физической культуры. – 1985. – Т. 8. – С. 27.
21. Коц Я. М. Спортивная физиология: учеб. для институтов физ. культуры – Москва: Физкультура и спорт, 1986. – 240 с.
22. Коц, Я.М Физиология мышечной деятельности: Учебник для институтов физической культуры. - Москва: Физкультура и спорт, 1982. - 347 с.
23. Мак-Дугалл Д., Уэнгер Г. Э., Грин Г. Д. Физиологическое тестирование спортсмена высокого класса // Киев: Олимпийская литература. – 1998. – С. 7-47.
24. Попов, Д. В. Физиологические основы оценки аэробных возможностей и подбора тренировочных нагрузок в лыжном спорте и биатлоне / Д. В. Попов, А. А. Грушин, О. Л. Виноградова. – Москва : Советский спорт, 2014. – 80 с.
25. Попов Д. В. и др. Валидация метода для оценки анаэробного порога в работающей мышце // Физиология человека. – 2019. – Т. 45. – №. 2. – С. 70-77.
26. Селуянов В. Н. и др. Определение анаэробного порога по данным легочной вентиляции и вариативности кардиоинтервалов // Физиология человека. – 2011. – Т. 37. – №. 6. – С. 106-110.

27. Сонькин, В. Д. Развитие мышечной энергетики и работоспособности в онтогенезе / В. Д. Сонькин, Р. В. Тамбовцева. - Изд. стереотип. - Москва: ЛЕНАНД, 2023. - 365 с
28. Фарфель В. С. Исследования по физиологии физических упражнений / Москва : Физкультура и спорт, 1939. - 133 с.
29. Шепард Р. и др. Максимальное потребление кислорода. Международный эталон кардиореспираторной способности //Бюлл. ВОЗ. – 1968. – Т. 38. – №. 5. – С. 760-768.
30. Шерер Ж. Физиология труда: Эргономика / Москва: Медицина, 1987. – 584 с
31. Abe M. et al. A method of determining anaerobic threshold from percutaneous oxygen saturation //Scientific Reports. – 2022. – Т. 12. – №. 1. – С. 20081.
32. Anderson G. S., Rhodes E. C. A review of blood lactate and ventilatory methods of detecting transition thresholds //Sports Medicine. – 1989. – Т. 8. – С. 43-55.
33. Atkinson D. E. Energy charge of the adenylate pool as a regulatory parameter. Interaction with feedback modifiers //Biochemistry. – 1968. – Т. 7. – №. 11. – С. 4030-4034.
34. Baker J. S., McCormick M. C., Robergs R. A. Interaction among skeletal muscle metabolic energy systems during intense exercise //Journal of nutrition and metabolism. – 2010. – Т. 2010.
35. Banister E. W. Modeling elite athletic performance //Physiological testing of elite athletes. – 1991. – Т. 347. – С. 403-422.
36. Banister E. W., Hamilton C. L. Variations in iron status with fatigue modelled from training in female distance runners //European journal of applied physiology and occupational physiology. – 1985. – Т. 54. – С. 16-23.
37. Beam W.C., Adams G.M. Exercise physiology: Laboratory manual. 8th ed. // New York: McGraw-Hill, 2019. 338 p.

38. Beaver W. L., Wasserman K., Whipp B. J. A new method for detecting anaerobic threshold by gas exchange //Journal of applied physiology. – 1986. – T. 60. – №. 6. – C. 2020-2027.
39. Beaver W. L., Wasserman K., Whipp B. J. Improved detection of lactate threshold during exercise using a log-log transformation //Journal of applied physiology. – 1985. – T. 59. – №. 6. – C. 1936-1940.
40. Belardinelli R. et al. Changes in skeletal muscle oxygenation during incremental exercise measured with near infrared spectroscopy //European journal of applied physiology and occupational physiology. – 1995. – T. 70. – №. 6. – C. 487-492.
41. Bertuzzi R. et al. GEDAE-LaB: a free software to calculate the energy system contributions during exercise //PloS one. – 2016. – T. 11. – №. 1. – C. e0145733.
42. Bhambhani Y. N., Buckley S. M., Susaki T. Detection of ventilatory threshold using near infrared spectroscopy in men and women //Medicine and Science in Sports and Exercise. – 1997. – T. 29. – №. 3. – C. 402-409.
43. Billat V. et al. The sustainability of VO₂max: effect of decreasing the workload //European journal of applied physiology. – 2013. – T. 113. – C. 385-394.
44. Binder R. K. et al. Methodological approach to the first and second lactate threshold in incremental cardiopulmonary exercise testing //European Journal of Preventive Cardiology. – 2008. – T. 15. – №. 6. – C. 726-734.
45. Bodner M. E., Rhodes E. C. A review of the concept of the heart rate deflection point //Sports Medicine. – 2000. – T. 30. – C. 31-46.
46. Bonilla A. V. et al. Training zones through muscle oxygen saturation during a graded exercise test in cyclists and triathletes //Biology of Sport. – 2022. – T. 40. – №. 2. – C. 439-448.
47. Borg E., Borg G. A comparison of AME and CR100 for scaling perceived exertion //Acta psychologica. – 2002. – T. 109. – №. 2. – C. 157-175.

48. Borg G. A. Psychophysical bases of perceived exertion //Medicine and science in sports and exercise. – 1982. – T. 14. – №. 5. – C. 377-381.
49. Borg G., Hassmén P., Lagerström M. Perceived exertion related to heart rate and blood lactate during arm and leg exercise //European journal of applied physiology and occupational physiology. – 1987. – T. 56. – C. 679-685.
50. Bouchard C., Taylor A., Dulac J. Physiological testing of the elite athlete. – 1983.
51. Cannon B., Nedergaard J. A. N. Brown adipose tissue: function and physiological significance //Physiological reviews. – 2004.
52. Cerretelli P. Oxygen Debt: Definition, Role and Significance //Physiological chemistry of training and detraining. – Karger Publishers, 1984. – T. 17. – C. 68-80.
53. Checkoway H., Pearce N., Kriebel D. Research methods in occupational epidemiology. – Monographs in Epidemiology and, 2004. – T. 34.
54. Cheng B. et al. A new approach for the determination of ventilatory and lactate thresholds //International journal of sports medicine. – 1992. – T. 13. – №. 07. – C. 518-522.
55. Chidnok W. et al. Effects of high intensity interval training on peak aerobic power output and time trial performance in Thai amateur cyclists //Songklanakarin J. Sci. Technol. – 2020. – T. 42. – №. 6. – C. 1227-1232.
56. Christie C. The Wingate Anaerobic Test: A Comprehensive Literature Review and Update on Reference Values in Athletes. – 2021.
57. Cicchella A. The Problem of Effort Distribution in Heavy Glycolytic Trials with Special Reference to the 400 m Dash in Track and Field //Biology. – 2022. – T. 11. – №. 2. – C. 216.
58. Conconi F. et al. Determination of the anaerobic threshold by a noninvasive field test in runners //Journal of Applied physiology. – 1982. – T. 52. – №. 4. – C. 869-873.

59. Costill D. Inside running: basics of sports physiology. – Benchmark Press, 1986.
60. Cypess A. M. et al. Identification and importance of brown adipose tissue in adult humans //New England journal of medicine. – 2009. – T. 360. – №. 15. – C. 1509-1517.
61. Czuba M. et al. Lactate threshold (D-max method) and maximal lactate steady state in cyclists //Journal of Human Kinetics. – 2009. – T. 21. – №. 2009. – C. 49-56.
62. Davis J. A., Convertino V. A. A comparison of heart rate methods for predicting endurance training intensity //Medicine and science in sports. – 1975. – T. 7. – №. 4. – C. 295-298.
63. Davison R. et al. (ed.). Sport and exercise physiology testing guidelines: volume I-sport testing: the british association of sport and exercise sciences guide. – Routledge, 2022.
64. De Matteis R. et al. Exercise as a new physiological stimulus for brown adipose tissue activity //Nutrition, metabolism and cardiovascular diseases. – 2013. – T. 23. – №. 6. – C. 582-590.
65. Desgorces F. D. et al. Training load quantification of high intensity exercises: discrepancies between original and alternative methods //Plos one. – 2020. – T. 15. – №. 8. – C. e0237027.
66. Dill D. B. The economy of muscular exercise //Physiological Reviews. – 1936. – T. 16. – №. 2. – C. 263-291.
67. Dotan R. A critical review of critical power //European journal of applied physiology. – 2022. – T. 122. – №. 7. – C. 1559-1588.
68. Dotan R., Inbar O. 30-sec all-out ergometric test-its reliability and validity for anaerobic capacity //Israel journal of medical sciences. – 2 ETZEL ST, FRENCH HILL, JERUSALEM 97853, ISRAEL : ISRAEL JOURNAL MED SCIENCES, 1977. – T. 13. – №. 3. – C. 326-327.

69. Driss T. et al. The measurement of maximal (anaerobic) power output on a cycle ergometer: a critical review //BioMed research international. – 2013. – T. 2013.
70. Edwards S. The Heart Rate Monitor Book. – 5th ed. - Polar CIC, 1993. - 170 p.
71. Ekblom B. Factors determining maximal aerobic power //Acta Physiologica Scandinavica. Supplementum. – 1986. – T. 556. – C. 15-19.
72. Fabre N. et al. A novel approach for lactate threshold assessment based on rating of perceived exertion //International journal of sports physiology and performance. – 2013. – T. 8. – №. 3. – C. 263-270.
73. Ferguson B. S. et al. Lactate metabolism: historical context, prior misinterpretations, and current understanding //European journal of applied physiology. – 2018. – T. 118. – C. 691-728.
74. Fitz-Clarke J. R., Morton R. H., Banister E. W. Optimizing athletic performance by influence curves //Journal of Applied Physiology. – 1991. – T. 71. – №. 3. – C. 1151-1158.
75. Foster C. et al. A new approach to monitoring exercise training //The Journal of Strength & Conditioning Research. – 2001. – T. 15. – №. 1. – C. 109-115.
76. Fox E. L. Measurement of maximal alactic (phosphagen) capacity in man //Medicine and Science in Sports and Exercise. – 351 WEST CAMDEN ST, BALTIMORE, MD 21201-2436 : WILLIAMS & WILKINS, 1973. – T. 5. – №. 1. – C. 66-66.
77. Friedmann B. et al. Exercise with the intensity of the individual anaerobic threshold in acute hypoxia //Medicine and science in sports and exercise. – 2004. – T. 36. – №. 10. – C. 1737-1742.
78. Gabbett T. J. Reductions in pre-season training loads reduce training injury rates in rugby league players //British journal of sports medicine. – 2004. – T. 38. – №. 6. – C. 743-749.

79. Galán-Rioja M. Á. et al. Relative proximity of critical power and metabolic/ventilatory thresholds: systematic review and meta-analysis //Sports Medicine. – 2020. – T. 50. – C. 1771-1783.
80. Gastin P. B. Energy system interaction and relative contribution during maximal exercise //Sports medicine. – 2001. – T. 31. – C. 725-741.
81. Ghosh A. K. Anaerobic threshold: its concept and role in endurance sport //The Malaysian journal of medical sciences: MJMS. – 2004. – T. 11. – №. 1. – C. 24.
82. Gillespie B. D. et al. Talk test as a practical method to estimate exercise intensity in highly trained competitive male cyclists //The Journal of Strength & Conditioning Research. – 2015. – T. 29. – №. 4. – C. 894-898.
83. Gollnick P. D., Hermansen L. Biochemical adaptations to exercise anaerobic metabolism //Exercise and sport sciences reviews. – 1973. – T. 1. – №. 1. – C. 1-44.
84. Grassi B. et al. Blood lactate accumulation and muscle deoxygenation during incremental exercise //Journal of Applied Physiology. – 1999. – T. 87. – №. 1. – C. 348-355.
85. Grassi B. et al. Muscle oxygenation and pulmonary gas exchange kinetics during cycling exercise on-transitions in humans //Journal of applied physiology. – 2003. – T. 95. – №. 1. – C. 149-158.
86. Green S. Measurement of anaerobic work capacities in humans //Sports Medicine. – 1995. – T. 19. – C. 32-42.
87. Gregory Haff G., Ch D. Laboratory Manual for Exercise Physiology, 2E //Human Kinetics. – 2018.
88. Gronwald T., Rogers B., Hoos O. Fractal correlation properties of heart rate variability: a new biomarker for intensity distribution in endurance exercise and training prescription? //Frontiers in Physiology. – 2020. – T. 11. – C. 550572.

89. Hagen T., Vidal-Puig A. Mitochondrial uncoupling proteins in human physiology and disease //Minerva medica. – 2002. – T. 93. – №. 1. – C. 41-57.
90. Hamaoka T. et al. The use of muscle near-infrared spectroscopy in sport, health and medical sciences: recent developments //Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. – 2011. – T. 369. – №. 1955. – C. 4591-4604.
91. Hargreaves M., Spriet L. L. Skeletal muscle energy metabolism during exercise //Nature metabolism. – 2020. – T. 2. – №. 9. – C. 817-828.
92. Harris R. C., Sahlin K., Hultman E. Phosphagen and lactate contents of m. quadriceps femoris of man after exercise //Journal of Applied Physiology. – 1977. – T. 43. – №. 5. – C. 852-857.
93. Heck H. et al. Justification of the 4-mmol/l lactate threshold //International journal of sports medicine. – 1985. – T. 6. – №. 03. – C. 117-130.
94. Heuberger J. A. A. C. et al. Repeatability and predictive value of lactate threshold concepts in endurance sports //PloS one. – 2018. – T. 13. – №. 11. – C. e0206846.
95. Hill A. V. The physiological basis of athletic records //The Scientific Monthly. – 1925. – T. 21. – №. 4. – C. 409-428.
96. Hnizdil J. et al. The Conconi Test-Searching for the deflection point //Physical Activity Review. – 2019. – №. 7. – C. 160-167.
97. Hollmann W., Hettinger T. Sportmedizin, Arbeits-und Trainingsgrundlagen // (No Title). – 1980.
98. Hopkins W. G., Schabert E. J., Hawley J. A. Reliability of power in physical performance tests //Sports medicine. – 2001. – T. 31. – C. 211-234.
99. Hug F. et al. EMG threshold determination in eight lower limb muscles during cycling exercise: a pilot study //International journal of sports medicine. – 2005. – C. 456-462.
100. Impellizzeri F. M. et al. Understanding training load as exposure and dose //Sports Medicine. – 2023. – C. 1-13.

101. Inbar O., Bar-Or O., Skinner J. S. The Wingate anaerobic test //(No Title). – 1996.
102. Issekutz Jr B., Birkhead N. C., Rodahl K. Use of respiratory quotients in assessment of aerobic work capacity //Journal of Applied Physiology. – 1962. – T. 17. – №. 1. – C. 47-50.
103. Issekutz Jr B., Rodahl K. Respiratory quotient during exercise //Journal of applied physiology. – 1961. – T. 16. – №. 4. – C. 606-610.
104. James Breese Maximum Aerobic Power: The ultimate performance program for everyday athletes over thirty who want to build a powerful aerobic engine and forge a heart of elastic steel / Strength Matters, 2020. - 150c
105. Jamnick N. A. et al. Manipulating graded exercise test variables affects the validity of the lactate threshold and $\dot{V}O_2$ peak //PloS one. – 2018. – T. 13. – №. 7. – C. e0199794.
106. Jones A. M. et al. The maximal metabolic steady state: redefining the ‘gold standard’ //Physiological reports. – 2019. – T. 7. – №. 10. – C. e14098.
107. Jones A. M., Doust J. H. Lack of reliability in Conconi's heart rate deflection point //International journal of sports medicine. – 1995. – T. 16. – №. 08. – C. 541-544.
108. Jones A. M., Doust J. H. The Conconi test is not valid for estimation of the lactate turnpoint in runners //Journal of sports sciences. – 1997. – T. 15. – №. 4. – C. 385-394.
109. Jones A.M..THE “CRITICAL POWER” CONCEPT AND HIGH-INTENSITY EXERCISE PERFORMANCE // Sports Science Exchange. - 2018. - №181. - C. 1-5.
110. Joyner M. J., Coyle E. F. Endurance exercise performance: the physiology of champions //The Journal of physiology. – 2008. – T. 586. – №. 1. – C. 35-44.

111. Karvonen M.J., Kentala E., Mustala O. The effects of training on heart rate: a longitudinal study // *Ann Med Exp Biol Fenn.* – 1957. – V. 35. – № 3. – P. 307.
112. KATCH V. L., WELTMAN* A. Interrelationship between anaerobic power output, anaerobic capacity and aerobic power // *Ergonomics.* – 1979. – T. 22. – №. 3. – C. 325-332.
113. Keir D. A. et al. Identification of non-invasive exercise thresholds: methods, strategies, and an online app // *Sports Medicine.* – 2022. – T. 52. – №. 2. – C. 237-255.
114. Kenney, W. L., Wilmore J. H., Costill D. L. *Physiology of Sport and Exercise: Edition 7* // Human Kinetics, 2019. –648 P.
115. Kominami K. et al. Gas exchange threshold to guide exercise training intensity of older individuals during cardiac rehabilitation // *Medicine.* – 2021. – T. 100. – №. 42.
116. Kriebel D., Checkoway H., Pearce N. Exposure and dose modelling in occupational epidemiology // *Occupational and environmental medicine.* – 2007. – T. 64. – №. 7. – C. 492-498.
117. Kuijpers, Wesley. “An Introduction to Metabolic Energy Pathways Utilized during Sporting Activities and Fatigue in Sports.” *An introduction to metabolic energy pathways utilized during sporting activities and fatigue in sports*, 2020. - 6 p
118. Kuipers H. et al. Comparison of heart rate as a non-invasive determinant of anaerobic threshold with the lactate threshold when cycling // *European journal of applied physiology and occupational physiology.* – 1988. – T. 58. – C. 303-306.
119. Latasa I. et al. Evaluation of the electromyography test for the analysis of the aerobic-anaerobic transition in elite cyclists during incremental exercise // *Applied Sciences.* – 2019. – T. 9. – №. 3. – C. 589.
120. Lehman G. *Psychologie pratique du travail.* Edit. d,Organisation. Paris, – 1955, – 1 vol., – 446 p

121. Lidell M. E., Betz M. J., Enerbäck S. Brown adipose tissue and its therapeutic potential //Journal of internal medicine. – 2014. – T. 276. – №. 4. – C. 364-377.
122. Lima J. R. P., Kiss M. A. P. D. M. Limiar de variabilidade da frequência cardíaca //Revista Brasileira de Atividade Física & Saúde. – 1999. – T. 4. – №. 1. – C. 29-38.
123. Lipková L., Kumstát M., Struhár I. Determination of critical power using different possible approaches among endurance athletes: A review //International Journal of Environmental Research and Public Health. – 2022. – T. 19. – №. 13. – C. 7589.
124. Lopes T. R., Pereira H. M., Silva B. M. Perceived exertion: revisiting the history and updating the neurophysiology and the practical applications //International Journal of Environmental Research and Public Health. – 2022. – T. 19. – №. 21. – C. 14439.
125. Lortie G. et al. Responses of maximal aerobic power and capacity to aerobic training //International journal of sports medicine. – 1984. – T. 5. – №. 05. – C. 232-236.
126. Lucía A. et al. Analysis of the aerobic-anaerobic transition in elite cyclists during incremental exercise with the use of electromyography //British journal of sports medicine. – 1999. – T. 33. – №. 3. – C. 178-185.
127. Lucía A. et al. Tour de France versus Vuelta a Espana: which is harder? //Medicine & Science in Sports & Exercise. – 2003. – T. 35. – №. 5. – C. 872-878.
128. Lundby C., Robach P. Performance enhancement: what are the physiological limits? //Physiology. – 2015.
129. Mader A. Zur Beurteilung der sportartspezifischen Ausdauerleistungsfähigkeit //Sportarzt Sportmed. – 1976. – T. 27. – C. 80-88.

130. Maidaniuk E. Comparison of ventilation and lactate threshold in elite athletes. *Sporto mokslas / Sport Science* 2016, Nr. 1(83), p. 68–72 / No. 1(83), pp. 68–72.
131. Manzi V. et al. Dose-response relationship of autonomic nervous system responses to individualized training impulse in marathon runners // *American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology*. – 2009. – T. 296. – №. 6. – C. H1733-H1740.
132. Manzi V. et al. Relation between individualized training impulses and performance in distance runners // *Medicine & Science in Sports & Exercise*. – 2009. – T. 41. – №. 11. – C. 2090-2096.
133. Margaria R., Edwards H. T., Dill D. B. The possible mechanisms of contracting and paying the oxygen debt and the role of lactic acid in muscular contraction // *American Journal of Physiology-Legacy Content*. – 1933. – T. 106. – №. 3. – C. 689-715.
134. Margaria R. *Biomechanics and energetics of muscular exercise*. - Oxford: Clarendon Press, 1976. – 146 c.
135. Margaria, R., Aghemo, P., Sassi, G., 1971. Lactic acid production in supramaximal exercise. *Pflü'g. Arch.* 326, 152–161.
136. Matsuura H. et al. Validity of simplified, calibration-less exercise intensity measurement using resting heart rate during sleep: A method-comparison study with respiratory gas analysis // *BMC Sports Science, Medicine and Rehabilitation*. – 2019. – T. 11. – №. 1. – C. 1-8.
137. Miller F. L. et al. Exercise dose, exercise adherence, and associated health outcomes in the TIGER study // *Medicine and science in sports and exercise*. – 2014. – T. 46. – №. 1.
138. Mj K. The effects of training on heart rate: a longitudinal study // *Ann med exp biol fenn*. – 1957. – T. 35. – C. 307-315.
139. Mo S., Chow D. H. K. Stride-to-stride variability and complexity between novice and experienced runners during a prolonged run at anaerobic threshold speed // *Gait & Posture*. – 2018. – T. 64. – C. 7-11.

140. Monod H., Scherrer J. The work capacity of a synergic muscular group //Ergonomics. – 1965. – T. 8. – №. 3. – C. 329-338.
141. Moritani T. ANAEROBIC THRESHOLD DETERMINATION BY SURFACE ELECTROMYOGRAPHY. – 1981.
142. Morton R. H., Fitz-Clarke J. R., Banister E. W. Modeling human performance in running //Journal of applied physiology. – 1990. – T. 69. – №. 3. – C. 1171-1177.
143. NAGATA A. et al. Anaerobic threshold determination by blood lactate and myoelectric signals //The Japanese journal of physiology. – 1981. – T. 31. – №. 4. – C. 585-597.
144. Nakahara H., Ueda S., Miyamoto T. Low Frequency Severe-Intensity Interval Training Markedly Alters Respiratory Compensation Point During Incremental Exercise in Untrained Male //Frontiers in Physiology. – 2020. – T. 11. – C. 1100.
145. Nicholson R. M., Sleivert G. G. Indices of lactate threshold and their relationship with 10-km running velocity //Medicine and science in sports and exercise. – 2001. – T. 33. – №. 2. – C. 339-342.
146. Noakes T. Lore of Running. – 4th ed. - Human Kinetic, 2003. - 931 p.
147. Novelli F. I. et al. Reproducibility of heart rate variability threshold in untrained individuals //International Journal of Sports Medicine. – 2019. – T. 40. – №. 02. – C. 95-99.
148. Olek R. A. et al. Adaptive changes after 2 weeks of 10-s sprint interval training with various recovery times //Frontiers in physiology. – 2018. – T. 9. – C. 392.
149. Oliveira B. A. P. et al. UCP1 and UCP3 expression is associated with lipid and carbohydrate oxidation and body composition //PloS one. – 2016. – T. 11. – №. 3. – C. e0150811.
150. Pallarés J. G. et al. Validity and reliability of ventilatory and blood lactate thresholds in well-trained cyclists //PloS one. – 2016. – T. 11. – №. 9. – C. e0163389.

151. Perrey S., Ferrari M. Muscle oximetry in sports science: a systematic review //Sports Medicine. – 2018. – T. 48. – C. 597-616.
152. Petot H. et al. A new incremental test for VO₂max accurate measurement by increasing VO₂max plateau duration, allowing the investigation of its limiting factors //European journal of applied physiology. – 2012. – T. 112. – C. 2267-2276.
153. Pettitt R. W. et al. A theoretical method of using heart rate to estimate energy expenditure during exercise //International Journal of Sports Science & Coaching. – 2007. – T. 2. – №. 3. – C. 319-327.
154. Piucco T. et al. Validity of different EMG analysis methods to identify aerobic and anaerobic thresholds in speed skaters //Journal of Electromyography and Kinesiology. – 2020. – T. 52. – C. 102425.
155. Poole D. C. et al. Critical power: an important fatigue threshold in exercise physiology //Medicine and science in sports and exercise. – 2016. – T. 48. – №. 11. – C. 2320.
156. Poole D. C. et al. The anaerobic threshold: 50+ years of controversy //The Journal of physiology. – 2021. – T. 599. – №. 3. – C. 737-767.
157. di Prampero PE, Ferretti G. The energetics of anaerobic muscle metabolism: a reappraisal of older and recent concepts. *Respir Physiol.* 1999 Dec 1;118(2-3):103-15.
158. Queiroz M. G. et al. Heart rate variability estimates ventilatory threshold regardless body mass index in young people //Science & Sports. – 2018. – T. 33. – №. 1. – C. 39-46.
159. Racinais S., Buchheit M., Girard O. Breakpoints in ventilation, cerebral and muscle oxygenation, and muscle activity during an incremental cycling exercise //Frontiers in physiology. – 2014. – T. 5. – C. 142.
160. Römer C., Wolfarth B. Prediction of Relevant Training Control Parameters at Individual Anaerobic Threshold without Blood Lactate Measurement //International Journal of Environmental Research and Public Health. – 2023. – T. 20. – №. 5. – C. 4641.

161. Sacks H., Symonds M. E. Anatomical locations of human brown adipose tissue: functional relevance and implications in obesity and type 2 diabetes //Diabetes. – 2013. – T. 62. – №. 6. – C. 1783-1790.
162. Satiroglu R. et al. Four-second power cycling training increases maximal anaerobic power, peak oxygen consumption, and total blood volume //Med Sci Sports Exerc. – 2021. – T. 53. – №. 12. – C. 2536-42.
163. Saunoriene L. et al. The characterization of the transit through the anaerobic threshold based on relationships between RR and QRS cardiac intervals //PloS One. – 2019. – T. 14. – №. 5. – C. e0216938.
164. Shcherbina A. et al. Accuracy in wrist-worn, sensor-based measurements of heart rate and energy expenditure in a diverse cohort //Journal of personalized medicine. – 2017. – T. 7. – №. 2. – C. 3.
165. Shephard R. S., Denolin H. Fundamentals of Exercise Testing Geneva. – 1971.
166. Shiraishi Y. et al. Real-time analysis of the heart rate variability during incremental exercise for the detection of the ventilatory threshold //Journal of the American Heart Association. – 2018. – T. 7. – №. 1. – C. e006612.
167. Silva M. L. D., Ferreira R. C. A. Anaerobic power analysis and training methods in professional soccer athletes //Int Phys Med Rehab J. – 2019. – T. 4. – №. 4. – C. 198-202.
168. Simoneau J. A. et al. Tests of anaerobic alactacid and lactacid capacities: description and reliability //Canadian journal of applied sport sciences. Journal canadien des sciences appliquees au sport. – 1983. – T. 8. – №. 4. – C. 266-270.
169. Simonson E., Enzer N. Physiology of muscular exercise and fatigue in disease // Medicine. - 1942. – T. 26.- C. 345-419.
170. Simonson E. Keys A. Physiology of work capacity and fatigue. - Springfield, IL.: Ch. Thomas. - 1971. – 571 c.

171. Sikorski S. et al. Intensity control in swim training by means of the individual anaerobic threshold //The Journal of Strength & Conditioning Research. – 2012. – T. 26. – №. 12. – C. 3304-3311.
172. Soller B. R. et al. Noninvasive determination of exercise-induced hydrodgen ion threshold through direct optical measurement //Journal of Applied Physiology. – 2008. – T. 104. – №. 3. – C. 837-844.
173. Son'kin V. D. et al. Brown adipose tissue participate in lactate utilization during muscular work //International Congress on Sport Sciences Research and Technology Support. – SCITEPRESS, 2014. – T. 2. – C. 97-102.
174. SOULA C. et al. Muscular, sensorial, psychological and social aspects of fatigue //Archives des maladies professionnelles de medecine du travail et de securite sociale. – 1961. – T. 22. – C. 419-445.
175. Spencer M. R., Gastin P. B. Energy system contribution during 200-to 1500-m running in highly trained athletes //Medicine & Science in Sports & Exercise. – 2001. – T. 33. – №. 1. – C. 157-162.
176. Stefanov L. G. Comparison between determination of second anaerobic threshold by respiratory compensating point and X-method in rowers //Pedagogy of Physical Culture and Sports. – 2022. – T. 26. – №. 2. – C. 101-110.
177. Stegmann H., Kindermann W., Schnabel A. Lactate kinetics and individual anaerobic threshold //International journal of sports medicine. – 1981. – T. 2. – №. 03. – C. 160-165.
178. Swanwick E., Matthews M. Energy systems: A new look at aerobic metabolism in stressful exercise //MOJ Sports Med. – 2018. – T. 2. – №. 1. – C. 00039.
179. Szögy A., Cherebețiu G. Minutentest auf dem Fahrradergometer zur Bestimmung der anaeroben Kapazität //European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology. – 1974. – T. 33. – №. 2. – C. 171-176.

180. Tanner R. et al. Physiological tests for elite athletes. – Human kinetics, 2012.
181. Taylor A. D., Bronks R. Reproducibility and validity of the quadriceps muscle integrated electromyogram threshold during incremental cycle ergometry //European journal of applied physiology and occupational physiology. – 1995. – T. 70. – C. 252-257.
182. Thomson E. A. et al. Heart rate measures from the Apple Watch, Fitbit Charge HR 2, and electrocardiogram across different exercise intensities //Journal of sports sciences. – 2019. – T. 37. – №. 12. – C. 1411-1419.
183. Thorland W., Podolin D. A., Mazzeo R. S. Coincidence of lactate threshold and HR-power output threshold under varied nutritional states //International journal of sports medicine. – 1994. – T. 15. – №. 06. – C. 301-304.
184. Tipton C. M. History of exercise physiology. – Human Kinetics, 2014.
185. Uth N. et al. Estimation of $\dot{V}O_{2\max}$ from the ratio between HR max and HR rest—the Heart Rate Ratio Method //European journal of applied physiology. – 2004. – T. 91. – C. 111-115.
186. Vachon J. A., Bassett Jr D. R., Clarke S. Validity of the heart rate deflection point as a predictor of lactate threshold during running //Journal of applied physiology. – 1999. – T. 87. – №. 1. – C. 452-459.
187. Vehrs P. R., Tafuna'i N. D., Fellingham G. W. Bayesian Analysis of the HR–VO₂ Relationship during Cycling and Running in Males and Females //International Journal of Environmental Research and Public Health. – 2022. – T. 19. – №. 24. – C. 16914.
188. Viru A. Adaptation in sport training. - Boca Raton, FL: CRC Press, 1995. - 102 c.
189. Viru A. et al. Invited paper DETERMINANTS AND MODULATORS OF HORMONAL RESPONSES TO EXERCISE //Biology of Sport. – 1996. – T. 13. – №. 3. – C. 169.

190. Wackerhage H. et al. Lactate thresholds and the simulation of human energy metabolism: Contributions by the cologne sports medicine group in the 1970s and 1980s //Frontiers in Physiology. – 2022. – C. 1308.
191. Walker J., Eisenman P. Validity of a heart rate inflection point or a 3.2 kilometer performance pace as estimators of maximal steady- state running velocity in high school runners //Research in Sports Medicine: An International Journal. – 1995. – T. 6. – №. 3. – C. 215-222.
192. Wang L. et al. Which common NIRS variable reflects muscle estimated lactate threshold most closely? //Applied physiology, nutrition, and metabolism. – 2006. – T. 31. – №. 5. – C. 612-620.
193. Wasfy M. M., Baggish A. L. Exercise dose in clinical practice //Circulation. – 2016. – T. 133. – №. 23. – C. 2297-2313.
194. Wasserman K. Principles of exercise testing and interpretation //Measurements during integrative cardiopulmonary exercise test. – 1999.
195. Wasserman K., Burton G.G., Van Kessel A.C. The physiological significance of the "anaerobic threshold" // Physiologist. - 1964. - V.7. - P.279-284.
196. Wasserman K., McIlroy M. B. Detecting the threshold of anaerobic metabolism in cardiac patients during exercise //The American journal of cardiology. – 1964. – T. 14. – №. 6. – C. 844-852.
197. Wells J. G., Balke B., Van Fossan D. D. Lactic acid accumulation during work. A suggested standardization of work classification //Journal of Applied Physiology. – 1957. – T. 10. – №. 1. – C. 51-55.
198. Whipp B. J., Davis J. A., Wasserman K. Ventilatory control of the 'isocapnic buffering' region in rapidly-incremental exercise //Respiration physiology. – 1989. – T. 76. – №. 3. – C. 357-367.
199. William McArdle, Frank I. Kutch, Victor L. Kutch Exercise Physiology: Nutrition, Energy, and Human Performance Ninth, North American Edition, 2022. - 1176 P.

200. Yang L. et al. Evaluation of physiological workload assessment methods using heart rate and accelerometry for a smart wearable system //Ergonomics. – 2019. – T. 62. – №. 5. – C. 694-705.
201. Yodh A., Chance B. Spectroscopy and imaging with diffusing light //Physics today. – 1995. – T. 48. – №. 3. – C. 34-40.
202. ZAJAC A., JARZABEK R., WASKIEWICZ Z. The diagnostic value of the 10- and 30-second Wingate test for competitive athletes //The Journal of Strength & Conditioning Research. – 1999. – T. 13. – №. 1. – C. 16-19.
203. Zinoubi B. et al. Relationships between rating of perceived exertion, heart rate and blood lactate during continuous and alternated-intensity cycling exercises //Biology of sport. – 2018. – T. 35. – №. 1. – C. 29-37.