

Тартуский государственный университет

На правах рукописи

КОНРАД Андрис Николаевич

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТАБОЛИЧЕСКИХ СОСТОЯНИЙ У ЧЕЛОВЕКА
ПРИ НАПРЯЖЕННОЙ МЫШЕЧНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

03.00.13 - физиология человека и животных

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Тарту 1978

Работа выполнена на кафедре биохимии (зав кафедрой — доцент Волков Н.И.) Государственного Центрального ордена Ленина института физической культуры (ректор института доцент Маолов В.И.).

Научный руководитель: кандидат биологических наук, доцент ВОЛКОВ Н.И.

Официальные оппоненты: доктор биологических наук, профессор ФАРФЕЛЬ В.С.

кандидат медицинских наук, доцент ПЯРНАТ Я.П.

Ведущее учреждение: Государственный ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени институт физической культуры им. П.Ф.Лесгафта.

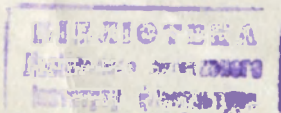
Защита диссертации состоится " 14 " апреля 1978 г. в " 15 " часов на заседании специализированного совета К.069.02.07 Тартуского государственного университета по адресу: 202400, г. Тарту ул. Пяккооли, 18.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ТГУ.

Автореферат разослан " 10 " ноября 1978 г.

Ученый секретарь специализированного совета К.069.02.07, д.м.н., проф.

Михельсон Тяхемпльд Л.Я.



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

7660
Актуальность исследования. Усиленная функциональная активность организма возникает как результат интегрирования множественных изменений метаболизма в определенных органах и тканях. Выявление сущности метаболических процессов, играющих первостепенную роль в проявлениях специфического вида функциональной активности, и количественная оценка особенностей кинетики этих процессов, имеют первостепенное значение в диагностике функционального состояния организма. Каждой метаболической функции свойствен определенный диапазон изменений, совместимый с сохранением жизни. Совокупность допустимых значений "ключевых" метаболических функций определяет метаболические состояния организма, характеризующие норму, патологию, экстремально высокую работоспособность (В.А.Запорожанов и соавт., 1968; В.В.Меньшиков, 1970; В.И.Шумаков и соавт., 1971; Ц.Ф.Консолацио и соавт., 1963).

В условиях предельной по напряженности мышечной деятельности изменение метаболических состояний организма определяется в основном сдвигами, происходящими в сфере энергетического обмена. Исследование биоэнергетики мышечной деятельности - одна из наиболее интенсивно исследуемых областей физиологии человека. История развития этой области знаний представлена блестящими страницами, написанными такими мастерами прикладных физиологических исследований, как А.Крог (1913 - 1920), А.В.Хилл (1923, 1924, 1926, 1927), Е.Симонсон (1927, 1930, 1933), Е.Христенсен (1932, 1950), П.О.Остранд (1970) и др.

Исследования функций энергетического обмена наряду с их основополагающим значением для разработки теоретических основ современной физиологии играют важную роль в решении практических вопросов физиологии труда, спортивной и клинической медицины. Изучение энергетического обмена при мышечной деятельности служит основой для установления нормативных оценок при различных видах профессиональной активности и диагностике трудоспособно-

сти в норме и патологии (Е.Н.Беркович, 1964), прогнозировании спортивных достижений (Н.И.Волков, 1964, 1969, 1970, 1975) и рационализации тренировки в спорте (В.С.Иванов, 1970; В.В.Михайлов, 1970; Е.А.Ширковец, 1968; Б.Б.Ллойд, 1966).

Несмотря на значительные достижения в изучении биоэнергетики мышечной деятельности, эта сфера прикладных физиологических проблем не может быть признана полностью исследованной. Недостаток информации особенно остро ощущается в области предельных мышечных нагрузок. Так, до сих пор окончательно не установлены закономерности процессов при напряженной мышечной деятельности, не вполне ясны причины, ограничивающие каждый из этих процессов, не установлена с достаточной достоверностью зависимость между показателями энергетического обмена и параметрами предельных физических нагрузок. Понятно, что дальнейшее совершенствование методов тренировки, разработанных с учетом данных об энергетических свойствах организма, может стать основой для создания научно обоснованных систем реабилитации и применения специальных средств, влияющих на работоспособность организма. Решение всех этих вопросов требует специального исследования особенностей энергетического обмена в условиях напряженной мышечной деятельности.

Цель работы. Основная цель настоящей работы состояла в изучении особенностей изменений метаболических функций у человека в условиях напряженной мышечной деятельности.

Научная новизна. Основные концепции биоэнергетики мышечной деятельности были сформулированы на основе накопленных ранее биохимических знаний (А.В.Хилл, 1923, 1927), что существенно затрудняет интерпретацию результатов биоэнергетических исследований с использованием современных данных биохимии. Новейшие биохимические концепции требуют основательного пересмотра теорий, основанных преимущественно не феноменологических наблюдениях. Внесение необходимых коррективов в современные представле-

ния о биоэнергетических процессах мышечной деятельности возможно лишь на основе применения современной экспериментальной техники, позволяющей учитывать кинетику быстротекущих метаболических процессов.

В целях непрерывной регистрации показателей аэробного и анаэробных процессов в настоящей работе применялись непрерывные заборы проб выдыхаемого воздуха (с помощью специального автоматического коллектора) и крови. Большинство экспериментальных данных, характеризующих кинетику аэробного и анаэробных процессов при мышечной деятельности, получены на основе данных изучения мышечных усилий, мощность которых не превышала уровня максимального усиления аэробного обмена. Экспериментальный план исследований предусматривал изучение энергетического обмена в диапазоне усилий от критической до максимальной мощности, т.е. в диапазоне усилий, ограничивающих напряженную мышечную деятельность.

Применение техники быстрых измерений при напряженной мышечной работе позволило выявить ряд существенно новых деталей в динамике функций аэробного и анаэробного обмена. Так, выявлено наличие временной задержки в ответе на начало работы, показателей потребления O_2 , выделения $HxCO_2$ и образования молочной кислоты, установлено существование выраженных осцилляций метаболических функций при резком переходе от покоя к напряженной работе и обратно, установлены зависимости кинетических параметров аэробного и анаэробного обмена от мощности и предельной продолжительности упражнения, проведена градация метаболических состояний в условиях напряженной мышечной деятельности.

Практическая значимость. Градация метаболических состояний, осуществленная на основе детального изучения функций аэробного и анаэробного обмена при напряженной мышечной деятельности, может служить научной основой при систематизации физических упражнений в спорте и классификации предельно тяжелых форм профессионального труда. Выявленные закономерности изменения показателей

аэробного и анаэробных процессов могут быть использованы при нормировании тренировочных нагрузок и осуществлении биохимического контроля в процессе подготовки спортсменов. Предлагаемые стандартные методы тестирования и оценки результатов испытаний в различных видах предельных упражнений могут найти применение при диагностике физической работоспособности и специальной профессиональной пригодности.

Объем работы и структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, обзорной главы, описания методики исследования, двух глав с анализом результатов собственных экспериментальных исследований, главы, посвященной обсуждению полученных результатов, выводов и библиографии. Общий объем диссертации 325 страниц, включая 2 таблицы и 127 иллюстраций. Библиографический указатель содержит 367 наименований, 44 из них на русском языке.

П. ЗАДАЧИ, МЕТОДЫ И ОРГАНИЗАЦИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исходя из результатов проведенного нами анализа современного состояния вопроса о кинетике функций энергетического обмена у человека при мышечной деятельности, основными задачами настоящей работы были избраны следующие:

- 1) изучить динамику показателей аэробных и анаэробных процессов при напряженной мышечной деятельности разной мощности и продолжительности;
- 2) исследовать взаимоотношения между показателями аэробного и анаэробного обмена при различных видах напряженной мышечной деятельности;
- 3) установить наиболее информативные критерии оценки метаболических состояний у человека при напряженной мышечной деятельности;
- 4) провести градацию метаболических состояний у человека при напряженной мышечной деятельности.

В экспериментах приняли участие шесть высокотренированных спортсменов, специализировавшихся в беге, велосипедном спорте, лыжных гонках и скоростном беге на коньках. В целях определения индивидуального значения максимума аэробных и анаэробных способностей каждый из них предварительно был подвергнут лабораторным испытаниям по трем стандартным программам:

1) в тесте со ступенчатым повышением нагрузки вплоть до полного изнеможения (П.О.Остранд, 1970; Н.И.Волков, 1975);

2) в тесте на удержание критической мощности (Н.И.Волков, 1975);

3) в тесте максимальной анаэробной мощности (Р.Маргариа, 1966; Н.И.Волков, 1975).

Результаты испытаний по тесту на удержание критической мощности и максимальной анаэробной мощности были использованы в качестве исходных данных при планировании дальнейших экспериментов. В основу планирования была положена зависимость "мощность - предельное время" (рис. I).

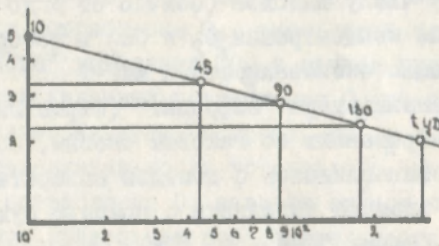


Рис. I. Определение мощности по избранным значениям продолжительности упражнений.

На ординате (логарифмическая шкала) - мощность, кг/мин, на абсциссе (логарифмическая шкала) - время, с. Обозначения на графике: 10 - работа максимальной мощности; 45, 90, 180 - работа предельной мощности, соответствующая указанной продолжительности; $t_{кр}$ - время удержания критической мощности.

Прямая, соединяющая экспериментальные точки, соответствующие результатам испытаний в тестах максимальной анаэробной мощности и удержания "критической" мощности, позволяет путем интерполяции установить значения мощности, соответствующие избранным величинам предельного времени в указанном диапазоне. Таким путем были определены значения мощности, которым соответствовало предельное время 45, 90 и 180 с. Наряду с выполнением упражнений предельной продолжительности план экспериментов предусматривал упражнения установленной мощности с ограничением их продолжительности до 10, 45 и 90 с.

С целью оценки воспроизводимости измерений все опыты с предельной продолжительностью работы были повторены дважды. Заборы проб выдыхаемого воздуха в покое, после разминки перед началом эксперимента, непрерывно во время выполнения упражнений и в течение 30 мин восстановительного периода осуществлялись с помощью автоматического газового коллектора (Е.А.Ширковец, 1974). Конструкция автоматического коллектора позволяла осуществлять заборы непрерывно, от вдоха к выдоху или по заранее установленному кратному числу выдохов (обычно от 3 до 8).

Определение концентрации O_2 и CO_2 в заборных емкостях производили с помощью оксиганализатора ММГ-7

и CO_2 -анализатора "Инфролит" (фирма "Юнкалор", ГДР), тщательно откалиброванных по газовым смесям, состав которых предварительно устанавливался с помощью аппарата Холдена. Измерения объемов проб воздуха выполняли с помощью сухого газометра высокой точности (фирма "Юнкалор" ГДР).

Пробы артериальной крови для определения содержания молочной кислоты забирали из предварительно разогретых кончиков пальцев рук в покое перед началом упражнения, непрерывно во время работы и в течение 30 мин восстановительного периода. Концентрацию молочной кислоты в пробах измеряли с помощью колориметрического метода Баркера и Саммерсона (1941).

Статистическую обработку данных экспериментов осуществляли общепринятыми методами (Н.Т.Бейли, 1970; В.Ю.Урбах, 1963). Расчет кинетических констант по данным газометрических определений проводили по специально составленной программе на БЭСМ-6, а также с помощью графоаналитического метода (Н.И.Волков, 1969).

III. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

I. Кинетика процессов аэробного и анаэробного обмена при напряженной мышечной деятельности. Наиболее важная информация о метаболических состояниях организма может быть получена на основе непрерывных измерений показателей аэробного и анаэробного обмена в процессе выполнения напряженной мышечной деятельности. Применение техники непрерывных заборов проб выдыхаемого воздуха и образцов крови позволило выявить ряд дополнительных деталей в динамике метаболических функций при напряженной мышечной работе, которые обычно ускользают из сферы внимания исследователей при применении традиционных методов регистрации метаболических изменений в организме. Так, было отмечено некоторое отставание в увеличении потребления O_2 , уменьшение или полное исчезновение "избыточного" выделения CO_2 в начале упражнения и осцилляционный характер динамики потребления O_2 во время работы.

При детальном анализе кинетики потребления O_2 в упражнениях разной мощности и продолжительности установлено, что степень увеличения скорости потребления O_2 зависит от мощности выполняемого упражнения и его предельной продолжительности. Максимальные значения потребления O_2 зафиксированы при выполнении упражнений в течение 90 и 180 с. При краевременных усилиях (продолжительность 10 и 45 с) уровень потребления O_2 не достигал максимальных значений. При выполнении упражнений в течение 10 с наибольший уровень потребления O_2 отмечался после окончания работы на 1-й минуте восстановительного периода. В кинетике потребления O_2 отмечены выраженные колебания, отчетливо проявляющиеся

как во время выполнения работы, так и в период восстановления. В частности, обнаружена существенная неравномерность в приросте потребления O_2 при переходе от покоя к выполнению упражнения.

Уровень потребления O_2 заметно повышается уже на старте упражнения. Это предрабочее усиление окислительного метаболизма отражает предстартовые реакции, связанные с выделением катехоламинов (А.А.Виру, 1977; Г.Шафер, 1973; У.С.Булер, 1969). Наиболее высокие значения потребления O_2 , достигаемые к началу работы, составляют около 1,5 л/мин. С началом работы в первые 10 - 15 с уровень потребления O_2 существенно не изменится. После непродолжительного лаг-периода, отличающегося большим разбросом индивидуальных значений, наблюдается дальнейшее экспоненциальное возрастание кривой потребления O_2 (рис. 2), что описано в более ранних исследованиях (Н.И.Волков, 1968; Р.О.Остранд, 1961; Ф.М.Генри, 1956; С.Робинсон, 1961). При традиционной технике изучения газообмена, когда заборы проб выдыхаемого воздуха осуществлялись через большие промежутки времени (30 - 60 с), отмеченное своеобразие поведения кинетической кривой потребления O_2 в начале упражнения выпадало из поля зрения исследовате-

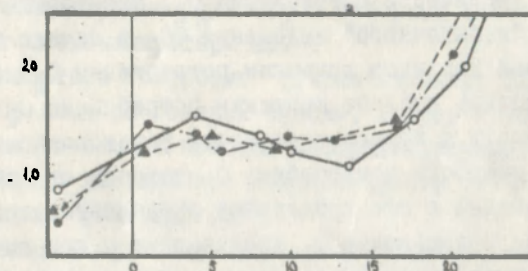


Рис. 2. Начальная задержка в уровне потребления кислорода при разных мощностях и продолжительности выполняемой работы у одного испытуемого. На ординате - уровень кислородного потребления, л/мин, на абсциссе - время, с. Белые кружки соответствуют работе 45/90, черные - 45, треугольники - 90.

лей. Однако эти особенности кинетики одного из наиболее интегральных показателей аэробного обмена отчетливо выявляются при регистрации потребления O_2 от вдоха к выдоху и могут иметь существенное значение при оценке метаболических состояний в начальный период упражнения. Начальный лаг-период продолжительностью 15 - 20 с сменяется фазой быстрого экспоненциального нарастания с выходом на стационарный режим работы. При обычной технике расчета экспоненциальных констант, основанной на исследовании проб выдыхаемого воздуха без учета начального лаг-периода, существует опасность ошибки в определении констант скорости потребления O_2 . Наши данные по определению констант экспоненциального увеличения потребления O_2 при напряженной мышечной деятельности с учетом начального лаг-периода и медленного компонента оказались более высокими, чем было установлено без учета этих существенных обстоятельств.

Абсолютные значения констант скорости увеличения потребления O_2 варьировали от 2,0 до 10,0 мин⁻¹. Значения констант быстрого экспоненциального возрастания потребления O_2 обнаруживают систематическую зависимость от мощности выполняемого упражнения. При выполнении кратковременных упражнений (продолжительностью менее 45 с) на кинетической кривой потребления O_2 не удалось выделить второй медленный компонент, который при более длительных упражнениях присутствовал постоянно. Константа скорости медленного компонента потребления O_2 также обнаруживала тесную зависимость от мощности выполняемого упражнения.

Быстрое экспоненциальное увеличение обычно связывается с наличием дыхательного контроля в митохондриях скелетных мышц, осуществляемого АДФ (Б.Чейна, 1956; Х.А.Ларди, 1952). Повышение мощности упражнения вызывает пропорциональное увеличение скорости расщепления АТФ с одновременным усилением переноса электронов по дыхательной цепи. Если принять, что в нормальных условиях поставка кислорода к работающим мышцам не является лимитирующим фактором для утилизации O_2 , то логично ожидать наличия ли-

нейной зависимости между константой скорости в быстрой фазе увеличения потребления O_2 и мощностью работы. Такая зависимость установлена в наших экспериментах во всем изученном диапазоне предельных упражнений. Наличие свободных количеств АДФ перестает быть фактором, лимитирующим скорость потребления O_2 , лишь тогда, когда в действие вступают циркуляторные лимиты и напряжение O_2 в работающих мышцах падает ниже критического значения.

Интересная закономерность наблюдается в выделении "неметаболического избытка" CO_2 на начальной фазе вработывания. Выделение избыточного CO_2 быстро увеличивается от старта упражнения, достигая максимума через 5 - 10 с от начала работы, а затем также быстро снижается вплоть до нуля. Вторичное усиление "избыточного" выделения CO_2 обнаруживается лишь через 30 - 40 с работы. Начальная "вспышка" выделения $ExsCO_2$ тем продолжительнее, чем больше интенсивность выполняемого упражнения.

После начального лаг-периода избыточное выделение CO_2 экспоненциально увеличивается в соответствии с накоплением молочной кислоты, однако скорость этого выделения, как свидетельствуют результаты наших опытов, не обнаруживает выраженной корреляции с мощностью выполняемой работы. Она оставалась постоянной в опытах разной предельной продолжительности. Создается впечатление, что в результате усиленного образования молочной кислоты на начальных этапах напряженной мышечной деятельности полностью насыщаются буферные механизмы, приводящие к избыточному выделению CO_2 . Наблюдающиеся различия в скорости накопления молочной кислоты не оказывают заметного влияния на выделение $ExsCO_2$, однако максимальный уровень $ExsCO_2$, время его удержания и общее количество выделенного избытка CO_2 зависят от продолжительности предельного упражнения.

При выполнении упражнений максимальной мощности в течение 10 с $ExsCO_2$ быстро повышается, однако сразу же после окончания упражнения в первые 20 с скорость его выделения резко снижает-

ся, а затем вновь быстро повышается, стремясь к выраженному максимуму в конце 1-й минуты восстановления. После достижения максимума уровень ExsCO_2 экспоненциально понижается. При выполнении непределных 10-секундных упражнений с мощностью, соответствующей 45 %- и 90-секундной предельной продолжительности, ExsCO_2 также увеличивается во время работы, но после окончания быстро понижается, полностью исчезая на 10-й секунде восстановления. Вторичное усиление выделения ExsCO_2 в период восстановления после окончания 10-секундного упражнения наблюдается в конце 1-й минуты и продолжается на протяжении 2-3 мин восстановительного периода. Особенности кинетики ExsCO_2 при выполнении предельных упражнений 45-, 90- и 180-секундной продолжительности показаны на рис. 3. На этом графике хорошо виден довольно выра-

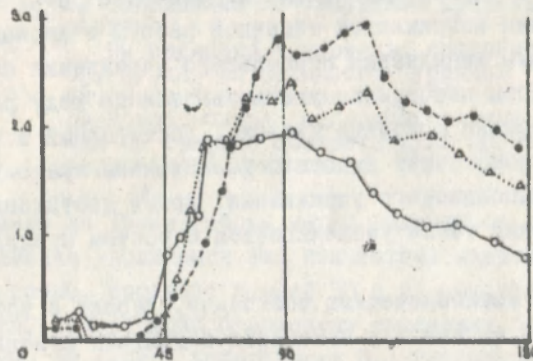


Рис. 3. Кинетика "неметаболического излишка" CO_2 при выполнении упражнений разной мощности и продолжительности (средние данные 6 испытуемых).

На ординате - уровень "неметаболического излишка" CO_2 , л/мин, на абсциссе - время, с. Сплошная линия соединяет точки, соответствующие ExsCO_2 при 45-секундной предельной работе, точечная - при выполнении упражнения предельной продолжительностью 90 с, пунктирная - 180 с.

женный лаг-период в выделении EхсСО_2 в начале работы, продолжительность которого не обнаруживает зависимости от мощности упражнения. Начиная с 30 - 40-й секунды работы EхсСО_2 обнаруживает тенденцию к увеличению вплоть до достижения максимальных значений. Скорость выделения EхсСО_2 в этом случае не зависит от мощности предельного упражнения: все три кривые практически совпадают. Повышение скорости выделения EхсСО_2 происходит на протяжении всей работы при выполнении 45- и 90-секундных упражнений и первых 120 с при выполнении 180-секундных предельных упражнений. Максимум выделения EхсСО_2 и время его достижения обнаруживают четкую зависимость от предельной продолжительности упражнений.

Наиболее заметные изменения в содержании молочной кислоты в крови, как и в случае выделения "избыточного" СО_2 , отмечаются после окончания напряженной мышечной работы в период восстановления. Во время выполнения предельного упражнения концентрация молочной кислоты непрерывно увеличивается по ходу работы. Максимум концентрации молочной кислоты, достигаемый в период восстановления, возрастает вместе с увеличением предельной продолжительности выполняемого упражнения. Время достижения максимальной концентрации также увеличивается с ростом предельной продолжительности.

При оценке метаболических состояний, наряду с установлением величины и направленности изменения отдельных функций, важное значение имеет определение характера взаимоотношений между отдельными функциями. Удобным методическим приемом для осуществления анализа такого рода служит составление так называемых фазовых диаграмм, отражающих взаимосвязь текущих измерений отдельных метаболических функций. Пример фазовой диаграммы, отражающей взаимоотношения показателей уровня потребления O_2 и "избыточного" выделения СО_2 во время работы, приведен на рис. 4, откуда видно, что в динамике соотношения показателей азотного и

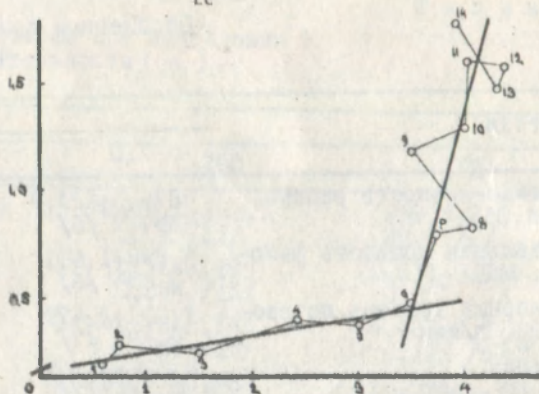


Рис. 4. фазовая диаграмма показателей аэробного и анаэробного процессов во время выполнения 90-секундной предельной работы.

На ординате - уровень потребления O_2 , л/мин. на абсциссе - уровень "избыточного" выделения CO_2 , л/мин. Порядковые номера экспериментальных точек на графике соответствуют последовательности измерений.

анаэробного обмена во время работы четко выделяются две фазы. С началом выполнения упражнения эти показатели изменяются одновременно, но в точке, соответствующей 50 с от момента старта, происходит сдвиг, совпадающий с моментом изменения собственной частоты колебаний на кривой потребления O_2 . Рассмотренный пример взаимоотношения между различными метаболическими переменными на разных этапах выполнения напряженной мышечной работы наглядно свидетельствует в пользу того, что метаболические состояния быстро изменяются в процессе выполнения упражнения.

2. Метаболические состояния у человека при напряженной мышечной деятельности определяются конкретными значениями наиболее существенных переменных и характером их взаимосвязи, устанавливаемым в процессе напряженной мышечной деятельности.

Обобщенные показатели аэробного
предельной работы

Показатели	Работа	
	10	45
Абсолютная мощность работы, кгм/мин	4876,3±623,9 254,7/6/	335,5±450,3 124,9/13/
Относительная мощность рабо- ты, ед. WMR	5,898±1,601 0,654/6/	2,843±0,647 0,179/13/
Стационарный уровень потреб- ления O ₂ , л/мин	1,671±0,479 0,181/7/	4,378±0,288 0,080/13/
O ₂ -приход, л	0,126±0,062 0,024/7/	1,638±0,207 0,057/12/
Суммарный O ₂ -долг, л	4,909±0,862 0,326/7/	8,784±2,002 0,555/13/
Быстрый компонент O ₂ -долга, л	1,609±0,299 0,122/6/	2,387±0,502 0,139/13/
Медленный компонент O ₂ -долга, л	3,185±0,125 0,473/7/	6,149±1,835 0,508/13/
Максимум накопления молочной кислоты в крови, мг%	49,8±13,7 6,1/5/	128,6±19,7 5,7/12/
Уровень "неметаболического из- лишка" CO ₂ , л/мин	1,008±0,343 0,130/7/	2,137±0,444 0,123/13/
Общий O ₂ -запрос, л	5,097±0,899 0,340/7/	10,44±2,10 0,58/13/
Уровень O ₂ -запроса, л/мин	32,4±12,6 4,78/7/	13,64±2,82 0,782/13/
Уровень общей энергопродукции, кал/кг.мин	608,3±344,7 154,1/5/	516,3±66,9 19,3/12/
Уровень аэробной энергопродук- ции, кал/кг.мин	54,7±32,9 12,5/7/	154,1±21,0 5,8/13/
Уровень анаэробной гликолити- ческой энергопродукции, кал/кг.мин	39,5±24,3 10,6/5/	245,7±48 13,9/
Уровень анаэробной алактатной энергопродукции, кал/кг.мин	437,4±273,3 103/7/	127,6±31,4 8,7/13/

Т а б л и ц а I

и анаэробного обмена при выполнении
разной продолжительности (с)

90	180	1УД
2604,7+360,5 114,9 /13/	2118,5+182,7 50,7 /13/	1859,3+220,4 89,9 /6/
1,960+0,469 0,141 /11/	1,236+0,195 0,054 /13/	0,911+0,134 0,054 /6/
4,479+0,352 0,106 /11/	4,525+0,343 0,101 /13/	4,680+0,272 0,111 /6/
3,775+0,469 0,141 /11/	8,197+0,982 0,272 /13/	16,598+3,786 1,564 /6/
9,878+2,154 0,681 /10/	9,768+1,969 0,453 /13/	9,373+1,499 0,612 /6/
2,573+0,498 0,150 /11/	2,630+0,493 0,137 /13/	2,248+0,517 0,211 /6/
7,348+2,065 0,653 /10/	7,416+1,819 0,525 /12/	7,134+1,680 0,686 /6/
152,9+18,4 5,5 /11/	160,0+28,1 8,1 /12/	141,4+28,1 12,6 /5/
2,419+0,414 0,125 /11/	2,386+0,569 0,158 /13/	1,953+0,436 0,179 /6/
14,300+3,102 0,935 /11/	18,034+2,510 0,696 /13/	26,327+4,566 1,864 /6/
9,415+2,091 0,631 /11/	5,903+0,703 0,283 /13/	4,391+0,613 0,250 /6/
415,8+63,4 19,1 /11/	309,3+38,3 11,1 /12/	263,1+24,6 11,0 /5/
177,9+20,6 6,2 /11/	195,0+25,5 7,1 /13/	202,3+28,7 11,7 /6/
150,0+21,5 6,5 /11/	79,9+16,8 4,8 /12/	38,5+11,6 5,2 /5/
68,8+13,5 4,1 /11/	35,4+7,1 1,9 /13/	16,7+5,1 2,1 /6/

7660



Изменение метаболических переменных при выполнении упражнений разной мощности и продолжительности приводит к характерным особенностям развития утомления и снижению работоспособности человека. Для выявления наиболее чувствительных критериев, с помощью которых можно провести градацию метаболических состояний, целесообразно проанализировать изменения, происходящие в сфере аэробного и анаэробного обмена в зависимости от мощности и продолжительности упражнения.

Обобщенные кинетические показатели аэробного и анаэробного обмена и рассчитанные на их основе величины энергетической стоимости упражнения суммированы в табл. I. В целях более детального анализа эти данные представлены в форме регрессионных зависимостей от продолжительности и мощности упражнения. Для установления влияния мощности выполняемого упражнения на обобщенные кинетические показатели при составлении регрессионных зависимостей целесообразно использовать не абсолютные значения мощности, а эквивалентные им значения относительного метаболического уровня.

Для установления градации метаболических состояний необходимо проанализировать зависимость метаболических переменных не только от мощности выполняемых упражнений, но и от предельной продолжительности работы. Соотношение аэробной, гликолитической и алактатной энергопродукции в общих энергозатратах упражнения различной предельной продолжительности иллюстрирует график, приведенный на рис. 5.

Наивысшие значения энергетической стоимости отмечены при предельной продолжительности нагрузки 10 с; в дальнейшем показатель энергетической стоимости экспоненциально понижается. Уровень удельной энергопродукции в аэробном процессе экспоненциально возрастает с увеличением предельного времени работы, в то время как уровень энергопродукции в анаэробном гликолитическом процессе при кратковременных упражнениях повышается, достигая максимума при предельной продолжительности 45 с, а затем

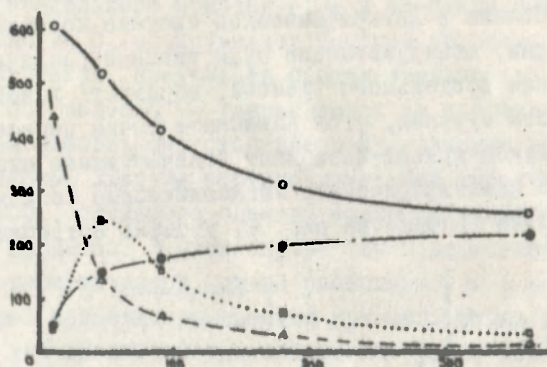


Рис. 5. Соотношение аэробной, анаэробной гликолитической, анаэробной алактатной и общей энергопродукции при выполнении упражнений различной предельной продолжительности.

На ординате - уровень образования энергопродукции, кал/кг.мин, на абсциссе - предельное время упражнения, с. Кружок - значения общей энергопродукции, треугольник - анаэробной алактатной, квадратик - анаэробной гликолитической, черный кружок - аэробной энергопродукции.

экспоненциально понижается при более продолжительной работе. Скорость энергопродукции в алактатном анаэробном процессе находится в полном соответствии с теоретическими предположениями и результатами ряда прежних определений (Н.И.Волков, 1969; В.И.Иванов, 1970; П.Церретелли, 1976); она экспоненциально понижается с увеличением предельного времени упражнения.

Эффективным инструментом выявления особенностей метаболических сдвигов при работе предельной продолжительности служит построение зависимостей наиболее существенных метаболических переменных от предельного времени на логарифмическом графике. Идея и использования такого рода графической трансформации в

целях систематизации физических упражнений принадлежит А.В.Хиллу (1927). Обычно в логарифмической системе координат метаболические функции, обнаруживающие существенные различия на отдельных диапазонах предельного времени, образуют линейно-кусочные кривые. Высота стояния, угол наклона и точка пересечения каждого участка такой кривой позволяют количественно охарактеризовать и четко идентифицировать метаболические состояния.

Как видно из графика на рис. 6, уровень потребления O_2 , до-

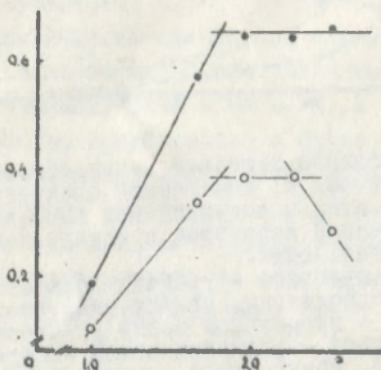


Рис. 6. Зависимость уровня потребления O_2 , достигнутого в конце упражнения, и показателей "неметаболического излишка" CO_2 от предельной продолжительности упражнения (в логарифмической системе координат).

На ординате — логарифм уровня потребления O_2 и $ExhCO_2$, л/мин, на абсциссе — логарифм предельного времени упражнения, с. Черные кружки — средние значения уровня потребления O_2 , светлые — средние значения уровня $ExhCO_2$.

стигнутый к концу упражнения, в зависимости от предельного времени образует линейно-кусочную кривую с точкой пересечения в районе координаты логарифма предельного времени 1.8. При мень-

ших значениях предельного времени (10- и 45-секундные нагрузки) уровень потребления O_2 обнаруживает быстрое возрастание. При всех других нагрузках, предельная продолжительность которых выше указанной, потребление O_2 удерживается на постоянном уровне, соответствующем наибольшему стационарному значению потребления O_2 во время работы. Сходная картина изменений характерна для показателя $HxCO_2$, служащего оценкой мощности анаэробного гликолитического процесса. В этом случае точка пересечения линейно-кусочной логарифмической кривой располагается в районе координаты логарифма предельного времени 2,5 мин. Столь же четкое разделение на два диапазона предельных нагрузок, различающихся по характеру метаболических сдвигов, проявляется на графиках скорости отдельных видов энергопродукции (аэробного, гликолитического и алактатного).

Исходя из рассмотренных зависимостей можно заключить, что в изученном диапазоне предельного времени упражнения имеют место два метаболических состояния. Первое из них соответствует выполнению упражнений предельной продолжительностью до 90 с при явном преобладании анаэробных процессов и относительно небольшом объеме аэробных превращений. Это состояние можно обозначить как смешанное анаэробное (алактатно-гликолитическое). Другое метаболическое состояние, наблюдаемое при предельной продолжительности упражнения от 90 с и более, характеризуется максимальным усилением дыхательной активности в работающих мышцах и прогрессивно затухающими анаэробными процессами. Это состояние носит смешанный аэробно-анаэробный характер.

Графоаналитические приемы многомерной регрессии позволили установить, что в пределах рассматриваемых метаболических состояний возможны дополнительные градации, отражающие особенности некоторых метаболических функций. С этой точки зрения нам представлялось целесообразным проанализировать изменения уровня энергопродукции в аэробном, алактатном и гликолитическом процессах в зависимости от относительной мощности. График, суммирую-

ший данные такого анализа, приведен на рис. 7. Здесь на единой шкале относительной метаболической мощности отложены показатели скорости энергопродукции всех трех основных метаболических процессов, ответственных за производство энергии. Как видно на

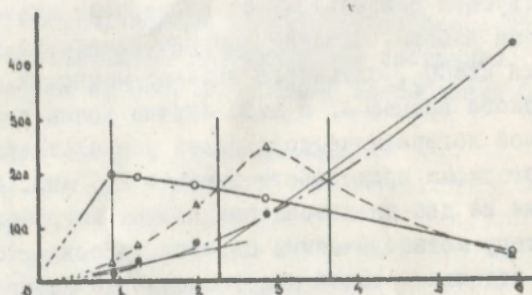


Рис. 7. Изменения уровня энергопродукции в аэробных, анаэробном гликолитическом, анаэробном алактатном процессах в зависимости от относительной мощности. На ординате - уровень энергопродукции, кал/кг.мин, на абсциссе - значения относительной метаболической мощности, ед. MMR. Кружками обозначены значения аэробной энергопродукции, треугольниками - анаэробной гликолитической, черными кружками - анаэробной алактатной энергопродукции.

графике, уровень аэробного образования энергии непрерывно понижается во всем диапазоне напряженной мышечной деятельности. После достижения уровня критической мощности снижение аэробной энергопродукции относительно невелико. Этому диапазону относительной мощности соответствует предельное время до 90 с (2,4 ед. MMR). В диапазоне относительной метаболической мощности от 2,4 до 3,5 ед. MMR, соответствующем смешанному анаэробному состоянию, скорость падения аэробной энергопродукции за-

метно нарастает. Снижение уровня аэробной энергопродукции может быть обусловлено обратным пастеровским эффектом, проявляющимся при значительной интенсификации анаэробного обмена.

Кривая скорости энергопродукции, соответствующая гликолитическому анаэробному процессу, обнаруживает быстрое экспоненциальное возрастание с достижением максимума в точке, соответствующей выполнению 45-секундного предельного упражнения (около 3 ед. MMR) с последующим быстрым снижением. Скорость энергопродукции при алактатном анаэробном процессе медленно увеличивается по экспоненциальному закону вплоть до достижения максимума гликолитической энергопродукции. Затем она линейно возрастает (в противоположность регулярному снижению в этой области гликолитической и аэробной энергопродукции).

На графике, представленном на рис. 7, обнаруживается существование нескольких точек пересечения. Так, точка пересечения кривой скорости гликолитической и аэробной энергопродукции локализуется на уровне 2,4 ед. MMR, где наблюдается резкое снижение скорости образования аэробной энергии. Эта точка соответствует переходу метаболического состояния смешанного аэробно-анаэробного характера в состояние энергообмена преимущественно анаэробного характера. Здесь наблюдается пересечение касательных, проведенных по верхней части кривой скорости алактатной энергопродукции. Следуя логике установления порога анаэробного обмена по показателям накопления молочной кислоты в крови, соответствующий критический уровень относительной метаболической мощности можно обозначать как алактатный анаэробный порог, от которого начинается зона усилий с преимущественно анаэробным характером энергообеспечения.

Точка пересечения кривой энергопродукции аэробного и алактатно-анаэробного процессов локализуется на оси относительной метаболической мощности, соответствующей 2 ед. MMR. Для этой точки характерна и наибольшая анаэробная гликолитическая энер-

гопродукция. Обычно эта точка обозначается как мощность истощения. Точка пересечения кривых гликолитической и алактатной анаэробной энергопродукции локализуется на уровне, соответствующем 3,5 ед. MMR. С этого момента в энергетике напряженной мышечной работы начинает преобладать алактатный анаэробный процесс. Эту точку можно обозначить как мощность истощения алактатных резервов.

Учитывая существование отмеченных критических моментов в сфере энергообразования при напряженной мышечной деятельности, целесообразно внести следующие уточнения в градацию метаболических состояний. Метаболическое состояние со смешанным аэробно-анаэробным характером энергетического обмена распространяется на диапазон нагрузок от критической мощности (1 ед. MMR) до 2,4 ед. MMR. Диапазон нагрузок, заключенных между алактатным анаэробным порогом и мощностью, где отмечается истощение алактатных резервов (3,6 ед. MMR), характеризуется наибольшим усилением гликолитической анаэробной энергопродукции. Метаболическое состояние, соответствующее этому диапазону, носит анаэробный характер с преобладанием гликолиза. В диапазоне нагрузок, лежащих выше мощности истощения алактатных резервов (более 3,6 ед. MMR), метаболическое состояние имеет преимущественно анаэробный характер с явным преобладанием алактатного анаэробного процесса. Подтверждением правомерности подобной систематизации могут служить данные анализа анаэробной энергопродукции при кратковременных видах напряженной мышечной деятельности, приводимые Р.Маргарда (1968, 1970, 1973). Предлагаемая систематизация различных видов напряженной мышечной деятельности находится в соответствии с результатами анализа кривой мировых рекордов в беге (Н.И.Волков, 1963; Ф.М.Генри, 1954; Б.Б.Джонс, 1966).

IV. В Ы В О Д Ы

1. Метаболические состояния, характерные для определенных форм жизнедеятельности человека, зависят от большого числа переменных и особенностей взаимосвязей, устанавливающихся между этими переменными. В условиях напряженной мышечной деятельности метаболические состояния определяются преимущественно сдвигами, происходящими в сфере энергетического обмена. Показатели, отражающие метаболическую активность аэробного, гликолитического и алактатного анаэробного процессов, обнаруживают закономерные связи с параметрами мощности и продолжительности выполнения упражнения.

2. Применение техники быстрых измерений показателей газообмена и химического состава крови позволило выявить ряд характерных особенностей в кинетике метаболических функций при напряженной мышечной деятельности. При регистрации газометрических показателей в режиме от вдоха к выдоху выявляется значительное повышение уровня потребления O_2 (до 1,5 л/мин) и выделения "неметаболического избытка" CO_2 (до 0,3 л/мин) перед началом напряженной мышечной работы. Степень этих предстартовых изменений в аэробном и анаэробном обмене зависит от тяжести предстоящей работы.

В первые 15-20 с после начала напряженной мышечной деятельности уровень потребления O_2 остается неизменным или понижается. "Избыточное" выделение CO_2 в первые 5 - 10 с продолжает увеличиваться, а затем быстро уменьшается и полностью исчезает к 20 - 30-й секунде работы.

3. После начального лаг-периода в кинетике показателей потребления O_2 , "избыточного" выделения CO_2 и накопления молочной кислоты в крови обнаруживается быстрое экспоненциальное стремление каждой функции к максимальным значениям. Скорость экспоненциального прироста метаболических функций увеличивается в зависимости от тяжести выполняемого упражнения. При достижении

стационарного уровня потребления O_2 в условиях напряженной мышечной деятельности отмечаются непрерывно нарастающие сдвиги показателей анаэробного обмена. Значение показателя дыхательного коэффициента на протяжении всей работы сохраняется на уровне 1,0 - 1,3.

4. На протяжении первых 10 - 15 с восстановительного периода после окончания напряженной работы потребление O_2 остается неизменным ил. обнаруживает резкое "западание" с последующим восстановлением начальных значений. После этой отставленной задержки в поддержании высокого уровня потребления O_2 наблюдается быстрое экспоненциальное снижение показателей окислительной активности тканей. Показатели $ExsCO_2$ и накопления молочной кислоты в крови после выполнения кратковременных упражнений продолжительностью не более 90 с в период восстановления продолжают увеличиваться до достижения максимума. Для $ExsCO_2$ фаза отставленного увеличения весьма непродолжительна - от нескольких секунд до полуминуты. Для показателей накопления молочной кислоты в крови отставленное достижение максимума растягивается на период до 10 - 15 мин. Время восстановления, в течение которого сохраняется повышенная продукция $ExsCO_2$, отражает отставленное усиление гликолиза и нарастающее выделение молочной кислоты из работающих мышц в кровь.

5. В динамике метаболических функций при напряженной мышечной деятельности обнаруживаются осцилляторные изменения. Отчетливые осцилляции при выполнении работы и в период восстановления наблюдаются на кинетической кривой потребления O_2 и накопления молочной кислоты в крови. Они хорошо воспроизводятся от опыта к опыту и обнаруживают закономерную связь с мощностью выполняемого упражнения.

6. Показатели метаболической активности аэробных и анаэробных процессов обнаруживают закономерные изменения в зависимости от мощности и предельной продолжительности выполняемого уп-

ражнения. По направленности и относительной скорости этих изменений можно дифференцировать метаболические состояния, характерные для различных диапазонов напряженной мышечной деятельности. После достижения максимального уровня потребления O_2 на уровне критической мощности дальнейшее увеличение относительной тяжести работы вызывает снижение окислительной активности работающих мышц, особенно выраженное после того, как достигается максимум усиления дыхательной активности. Заметный рост алактатной анаэробной энергопродукции обнаруживается в момент резкого снижения скорости аэробного процесса на уровне около 2,4 ед. MMR. До этого метаболическое состояние носит смешанный аэробно-анаэробный характер. В диапазоне упражнений, начиная от алактатного анаэробного порога (2,4 ед. MMR) и вплоть до значения мощности истощения алактатных анаэробных резервов (3,5 ед. MMR), в энергетическом обмене при напряженной мышечной деятельности преобладающую роль играет анаэробный гликолиз. Наиболее заметные сдвиги в показателях анаэробного гликолиза зафиксированы при выполнении 45-секундных предельных упражнений. Когда относительный метаболический уровень выполняемого упражнения становится выше мощности истощения алактатных анаэробных резервов (более 3 ед. MMR), метаболическое состояние приобретает исключительно анаэробный характер с явным преобладанием алактатного процесса.

Установленная градация метаболических состояний при напряженной мышечной деятельности может быть использована как физиологическая основа систематизации физических упражнений.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Влияние интенсивности и продолжительности упражнения на характер и величину срочного тренировочного эффекта. - Тезисы докладов межвузовской научно-методической конференции по вопросам физического воспитания и спортивной тренировки. Рига, 1973, с. 55 (в соавторстве).
2. Динамика метаболических состояний у человека при мышечной деятельности. - Отчет по научно-исследовательской работе "Динамика молочной кислоты, КЩР, потребления кислорода и оплаты кислородного долга при напряженной мышечной деятельности". М., 1973, с. 70 - 78.
3. Эргометрические критерии метаболических состояний у спортсменов в циклических видах спорта. - Тезисы докладов XI научной конференции молодых ученых ГЦОЛИФК. М., 1974, с. 23.
4. Особенности метаболических состояний у человека при напряженной мышечной деятельности циклического характера. - XI Всесоюзная конференция по физиологической и биохимической характеристике циклических видов спорта. Таллин, 1974, с. 47 - 49 (в соавторстве).
5. Эргометрические критерии метаболических состояний у спортсменов в циклических видах спорта. - XII Всесоюзная конференция по физиологической и биохимической характеристике циклических видов спорта. Таллин, 1974, с. 119 - 120 (в соавторстве).
6. Новые возможности исследования биоэнергетических процессов у спортсменов. - Теория и практика физической культуры, 1974, № 10, с. 60 - 63 (в соавторстве).
7. Энергетические критерии спортивной работоспособности и тренировочного эффекта упражнений. - Тезисы докладов Всемирного научного конгресса "Спорт в современном обществе". М., 1974, с. 178 (в соавторстве).
8. Количественный анализ восстановительных процессов после тренировочной нагрузки. - Материалы Всесоюзного симпозиума

"Научные основы и методы повышения спортивной работоспособности". М., 1976, с. 16 (в соавторстве).

9. Метаболические состояния у спортсменов при критических режимах мышечной деятельности. - Материалы Всесоюзного симпозиума "Научные основы и методы повышения спортивной работоспособности". М., 1976, с. 11 - 12 (в соавторстве).

10. Метаболические состояния у спортсменов при напряженной мышечной деятельности. - Материалы шестой научно-методической конференции республик Прибалтики и Белоруссии по проблемам спортивной тренировки. Вильнюс, 1976, с. 163 - 164.

11. Использование углеводных ресурсов при мышечной деятельности, кинетика потребления кислорода и выделения "излишка" CO_2 в период восстановления. - Материалы Всесоюзного симпозиума "Механизм адаптации к спортивной деятельности". М., 1977, с. 78 - 80 (в соавторстве).

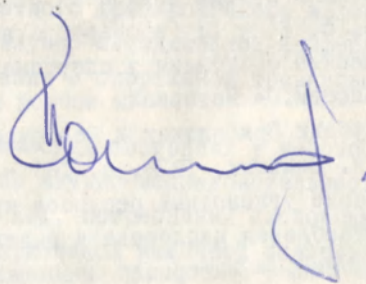
12. Кинетика кислородного потребления, выделения "неметаболического излишка" CO_2 и дыхательного коэффициента в периоде восстановления. - В кн.: Физическая культура и спорт. Рига, 1977, с. 7 - 9.

13. Проблемы диагностики специальной работоспособности легкоатлетов. - В кн.: Актуальные вопросы спортивной медицины и лечебной физкультуры. Таллин, 1977, с. 26 (в соавторстве).

14. Порог истощения алактатных анаэробных резервов у легкоатлетов. - Тезисы УП научно-методической конференции республик Прибалтики и Белоруссии по проблемам спортивной тренировки. Рига, 1978, с. 60 - 61.

15. Кинетика потребления кислорода при напряженной мышечной деятельности и разработка технических устройств для непрерывной регистрации скорости потребления кислорода. - В кн.: Проблемы оптимизации тренировочного процесса. Биоэнергетические критерии спортивной работоспособности. М., 1978, с. 31 - 47 (в соавторстве).

16. Кинетика потребления кислорода и выделения избыточного CO_2 в начальной фазе напряженной мышечной деятельности. - В кн.: Проблемы оптимизации тренировочного процесса. Биоэнергетические критерии спортивной работоспособности. М., 1978, с. 55 - 73 (в соавторстве).



КОНРАД Андрис Николаевич

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТАБОЛИЧЕСКИХ СОСТОЯНИЙ У ЧЕЛОВЕКА
ПРИ НАПРЯЖЕННОЙ МЫШЕЧНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Автореферат

Подписано к печати 28.X.1978 г. ЯТ04288. Тираж 150.

Ф/б 60x84/18. Бумага №1. Физ. печ. л. 1,5. Уч. издат. л. 1,0.^а

Заказ №1342.

Бесплатно

Роталитный участок ЛГУ, г. Рига, улица Вейденбаума, 5.