

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

**по созданию индивидуальной математической модели
энергообеспечения мышечной деятельности
высококвалифицированных спортсменов и ее идентификации по
результатам функционального тестирования**

Москва 2013

Оглавление

Введение.....	3
Роль системы энергообеспечения мышечной работы в процессе адаптации спортсмена к физическим нагрузкам	3
Взаимосвязь структуры и биоэнергетики мышц	15
Оценка параметров энергетики по величине констант уравнения Мюллера .	22
Оценка параметров энергетики по величине скорости накопления пульсового долга.....	25
Математическое моделирование энергообеспечения в спортивной деятельности	33
Математические модели энергообеспечения мышечной работы	39
Оценка физической работоспособности при помощи нагрузочного тестирования.....	41
Эргоспирометрическое тестирование	44
Усовершенствованная методика тестирования физической работоспособности.....	50
Математическая модель, описывающая динамику получения и расхода энергии в процессе мышечной работы различной направленности.....	55
Алгоритм математической модели мониторинга энергообеспечения	57

Введение

Недостаточная определенность механизмов энергообеспечения при тренировочных и соревновательных нагрузках в различных видах спорта не позволяет давать эффективные рекомендации спортсменам и тренерам по составлению тренировочных программ. Специфичность спортивной подготовки требует объяснения механизмов производства энергии в конкретных спортивных упражнениях и точный количественный расчет параметров нагрузок. Математическое моделирование процессов энергообеспечения мышечной работы в различных видах спорта может оказать существенную помощь в разработке, оптимизации и коррекции тренировочных программ спортивной подготовки с учетом особенностей вида спорта и индивидуальных способностей спортсмена. При этом математическая модель должна учитывать все виды энергообеспечения, особенности вида спорта и конкретного спортивного упражнения и быть подстроена под спортсмена.

Создание математической модели системы энергообеспечения мышечной деятельности спортсмена, ее подстройка (идентификация) под конкретного атлета на определенном этапе спортивной подготовки, применение для обоснования и расчета интенсивности, длительности и объема нагрузок позволит более рационально подойти к планированию и контролю тренировочного процесса.

Оценка функциональных изменений в механизмах энергообеспечения мышечной деятельности имеет важное значение для контроля за развитием физических качеств спортсмена, оптимизации и совершенствования тренировочного процесса.

Роль системы энергообеспечения мышечной работы в процессе адаптации спортсмена к физическим нагрузкам

Выделяют два вида адаптации - срочную и долговременную. Показано, что «срочная» адаптация, к физической нагрузке характеризуется

мобилизацией функциональной системы, ответственной за адаптацию, до предельно достижимого уровня, выраженной стресс-реакцией. Физиологические процессы при долговременной адаптации протекают:

1. с перестройкой регуляторных механизмов;
2. с мобилизацией и использованием физиологических резервов организма;
3. с формированием специальной функциональной системы адаптации к конкретной трудовой (спортивной) деятельности человека.



Рис. 1. Система резервов адаптации организма спортсмена

Биохимические резервы - это возможности увеличения скорости протекания и объема биохимических процессов, связанных с экономичностью и интенсивностью энергетического и пластического обменов и их регуляцией.

Физиологические резервы представляют собой возможности органов и систем органов изменять свою функциональную активность и взаимодействие между собой с целью достижения оптимального для конкретных условий функционирования организма.

Психические резервы могут быть представлены как возможности психики, связанные с проявлением таких качеств, как память, внимание, мышление и т. д., с мотивацией деятельности человека и определяющие его тактику поведения и особенности психологической и социальной адаптации.

В рамках подсистемы физиологических резервов целесообразным считается выделение четырех ее компонентов: 1) блок сенсорных систем, воспринимающий и производящий первичную обработку пусковых и корректирующих сигналов; 2) блок управления движением; 3) блок регуляции гомеостаза; 4) блок реализации деятельности (мышечная система).

Отдельные части формирующейся сложной системы функциональных резервов взаимодействуют между собой. Некоторые из них обуславливают взаимные положительные (на схеме «+») и отрицательные («-») (т.е. стимулирующие и угнетающие) воздействия, а некоторые оказывают односторонние влияния.

Биохимические резервы определяются мощностью энергетических систем организма:

1. анаэробной фосфогенной (алактатной);
2. лактаcidной (гликолитической);
3. аэробной (окислительной);

а также биохимическими процессами, направленными на восполнение энергетических ресурсов организма и воспроизводство разрушенных при адаптации и вновь синтезируемых клеточных структур. Биохимические резервы обеспечивают не только энергетический и пластический обмен, но и гомеостаз организма и связаны в основном с клеточным и тканевым уровнем.

Функциональные пределы различных физиологических систем не могут быть увеличены в равной мере. Поэтому разные физиологические показатели кумулятивных тренировочных эффектов изменяются в пределах своих диапазонов. Рис. 2 показывает пределы варьирования большинства

информативных физиологических показателей в результате долгосрочной систематической тренировки.

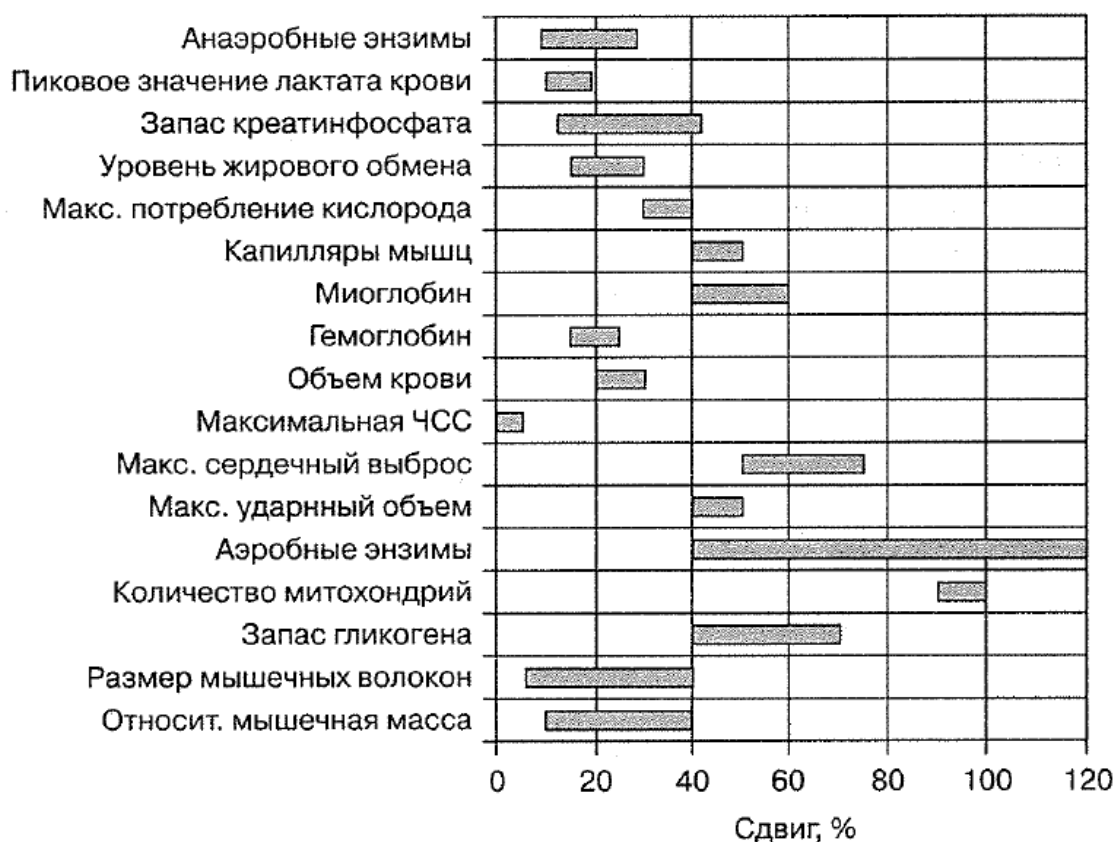


Рис. 2. Сдвиг некоторых физиологических параметров вызванных длительной систематической тренировкой

Наиболее явные изменения могут быть достигнуты в развитии аэробных способностей, т.е. долгосрочный тренировочный процесс, направленный на развитие выносливости, может вызвать увеличение количества ферментов аэробного метаболизма до 230%. Точно так же количество митохондрий, содержание миоглобина и уровень капилляризации мышечной ткани увеличиваются значительно. В результате максимальное потребление кислорода может сильно возрасти, хотя результаты генетических исследований в спорте указывают на то, что на этот показатель очень сильно влияет наследственность.

В отличие от детерминантов аэробных способностей характеристики анаэробного метаболизма могут быть улучшены в меньшей степени. Это относится к анаэробным ферментам и, особенно, к пиковому значению лактата крови, увеличение которого бывает относительно небольшим даже

после очень интенсивной тренировки. Запас креатинфосфата как важный фактор максимальных скоростных способностей может немного увеличиться в результате тренировки на выносливость (приблизительно на 12%), но может быть значительно увеличен после применения спринтерских нагрузок (до 42%).

Возможности сердечно-сосудистой системы в значительной степени определяют двигательную отдачу и в аэробных, и в анаэробных упражнениях. Действительно, максимальный сердечный выброс увеличивается на 50-75%, но он вызывается увеличением ударного объема почти без связи с ЧСС (наблюдается слабая тенденция к его изменению).

Явные изменения происходят и в опорно-двигательном аппарате, например мышечная масса увеличивается на 10-40%. Здесь наблюдаются большие тендерные различия. Мышечные волокна могут быть увеличены в аналогичной пропорции, однако у быстрых и медленных волокон это происходит по-разному: быстрые подвержены большей гипертрофии.

Вышеупомянутые данные характеризуют долговременные кумулятивные эффекты многолетнего тренировочного процесса.

Энергию для мышечного сокращения дает расщепление аденозинтрифосфата (АТФ) до аденозиндифосфата (АДФ) и неорганического фосфата (Фн). Количество АТФ в мышцах очень невелико и его достаточно для обеспечения высокоинтенсивной работы лишь в течение 1—2 с. Для продолжения работы необходим ресинтез АТФ, который производится за счет энергодающих реакций различных типов. Восполнение запасов АТФ в мышцах позволяет поддерживать постоянный уровень его концентрации, необходимый для полноценного мышечного сокращения. Существенное снижение уровня АТФ может наблюдаться только в начале высокоинтенсивной работы в силу определенной инертности процессов, в результате которых производится энергия, или при явном утомлении в момент отказа от работы, когда системы энергообеспечения уже не в состоянии поддерживать необходимый уровень АТФ.

Ресинтез АТФ обеспечивается как в анаэробных, так и в аэробных реакциях с привлечением в качестве энергетических источников запасов креатинфосфата (КФ) и АДФ, содержащихся в мышечных тканях, а также богатых энергией субстратов (гликоген мышц и печени, живые запасы липозной ткани и мышц, отдельные белки, различные метаболиты). Химические реакции, приводящие к обеспечению мышц энергией, протекают в трех энергетических системах: 1) анаэробной алактатной, 2) анаэробной лактатной (гликолитической), 3) аэробной.

Образование энергии в первых двух системах осуществляется в процессе химических реакций, не требующих наличия кислорода. Третья система предусматривает энергообеспечение мышечной деятельности в результате реакций окисления, протекающих с участием кислорода. Наиболее общие представления о последовательности включения и количественных соотношениях в энергообеспечении мышечной деятельности каждой из указанных систем приведены на рис. 3.

Возможности каждой из указанных энергетических систем определяются мощностью, т.е. скоростью освобождения энергии в метаболических процессах, и емкостью, которая определяется величиной и эффективностью использования субстратных фондов.

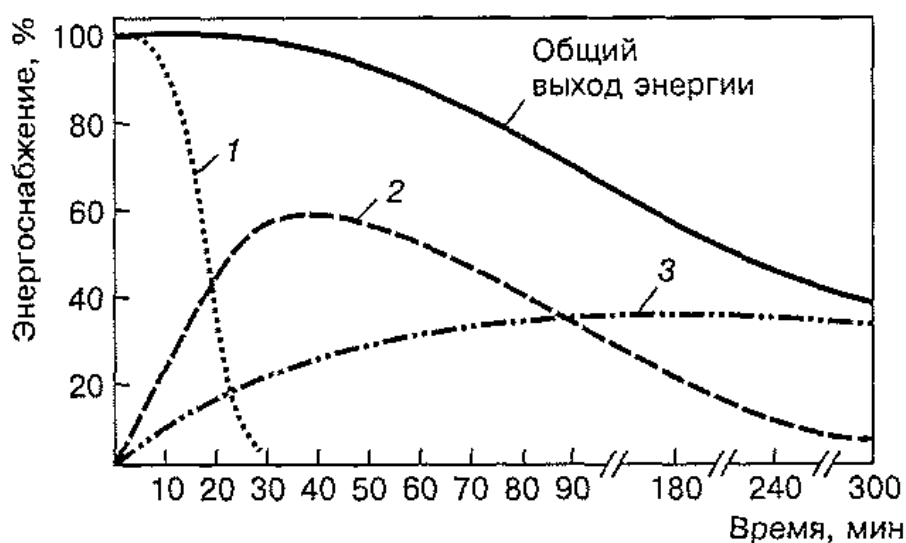


Рис.3. Последовательность и количественные соотношения процессов энергообеспечения мышечной деятельности у квалифицированных спортсменов в различных энергетических системах (схема): 1 — алактатной; 2 — лактатной; 3 — аэробной

Алактатная система энергообеспечения является наименее сложной, отличается высокой мощностью освобождения энергии и кратковременностью действия. Образование энергии в этой системе происходит за счет расщепления богатых энергией фосфатных соединений — аденозинтрифосфата (АТФ) и креатинфосфата (КФ). АТФ включает четыре компонента — аденозин, состоящий из аденина и связанного с ним 5-углеродного сахара, и три богатые энергией фосфатные группы (высокоэнергетичные соединения). Энергия, образующаяся в результате распада АТФ, в полной мере включается в процесс энергообеспечения работы уже на ее первой секунде. Однако уже на второй секунде выполнение работы осуществляется за счет креатинфосфата (КФ), депонированного в мышечных волокнах и содержащего, как и АТФ, богатые энергией фосфатные соединения. Расщепление этих соединений приводит к интенсивному высвобождению энергии. Конечными продуктами расщепления КФ являются креатин (Кр) и неорганический фосфат (Фн).

В лактатной системе энергообеспечения ресинтез АТФ происходит за счет расщепления глюкозы и гликогена при отсутствии кислорода. Этот процесс принято обозначать как анаэробный гликолиз, хотя этим термином правильнее обозначать расщепление глюкозы с участием гликолитических ферментов. Что касается распада гликогена, то здесь правильнее говорить не о гликолизе, а о гликогенолизе. Однако поскольку после первого этапа распада гликогена обе реакции протекают одинаково, весь процесс анаэробного образования углеводов принято обозначать как анаэробный гликолиз. В процесс анаэробного гликолиза используется глюкоза, находящаяся в крови, а также образующаяся в результате расщепления гликогена, содержащегося в мышцах и печени. Анаэробный гликолиз обеспечивает неполное расщепление глюкозы — образование АТФ сопровождается накоплением побочного продукта метаболизма — молочной кислоты.

Аэробная система энергообеспечения значительно уступает алактатной и лактатной по мощности энергопродукции, скорости включения в обеспечение мышечной деятельности, однако многократно превосходит по емкости и экономичности.

Особенностью аэробной системы является то, что образование АТФ в клеточных органелах-митохондриях, находящихся в мышечной ткани и примыкающих к миофибриллам или разбросанных по саркоплазме, происходит при участии кислорода, доставляемого кислородтранспортной системой, что предопределяет высокую экономичность аэробной системы, а достаточно большие запасы гликогена в мышечной ткани и печени, а также практически неограниченные запасы липидов в адипозной и мышечной тканях — ее емкость.

Потенциал аэробной системы энергообеспечения обуславливается различными факторами. В числе важнейших — мощность и эффективность внешнего дыхания и сердечно-сосудистой системы; величина фондов субстратов; соотношение мышечных волокон разного типа; плотность и количество капилляров в мышечной ткани; количество, величина и плотность митохондрий в мышечных клетках; количество и активность многочисленных окислительных ферментов и ко-ферментов, гормонов и других регуляторов окислительных процессов.

Показано, что приспособление к мышечной деятельности сопряжено как с повышением мощности и физиологической эффективности процессов окисления и фосфорилирования, так и существенным увеличением КПД мышц при их деятельности.

Хорошо тренированный спортсмен может потреблять до 50 мл кислорода на 1 кг веса тела в минуту. Эта аэробная система позволяет производить работу невысокой мощности (с расходом энергии порядка 1 моля АТФ в минуту, что составляет примерно 25% от мощности фосфагенной системы), но работу эту можно производить в течение весьма длительного времени. В организме достаточно гликогена, для того чтобы

обеспечить в этом режиме порядка 10000 мышечных сокращений. Такая работа характерна для бега на длинные дистанции, включая марафонский бег, и для упражнений на выносливость. При таком уровне активности содержащийся в мышцах гликоген будет исчерпан в течение нескольких часов (от 1,5 до 4 часов). Другой эффективный механизм, позволяющий производить долговременную работу, состоит в том, что циркулирующая в крови глюкоза может трансформироваться в пировиноградную кислоту, которая, в свою очередь, может в присутствии кислорода использоваться в клеточных митохондриях для образования АТФ.

При аэробной работе скорость потребления кислорода линейно возрастает с ростом минутного объема кровообращения. Для средне-тренированного человека максимальное потребление кислорода организмом составляет примерно 2,8 л/мин, а максимальный минутный объем кровообращения примерно равен 19 л/мин. Для хорошо тренированного спортсмена эти величины, соответственно, равны 4 л/мин и 25 л/мин.

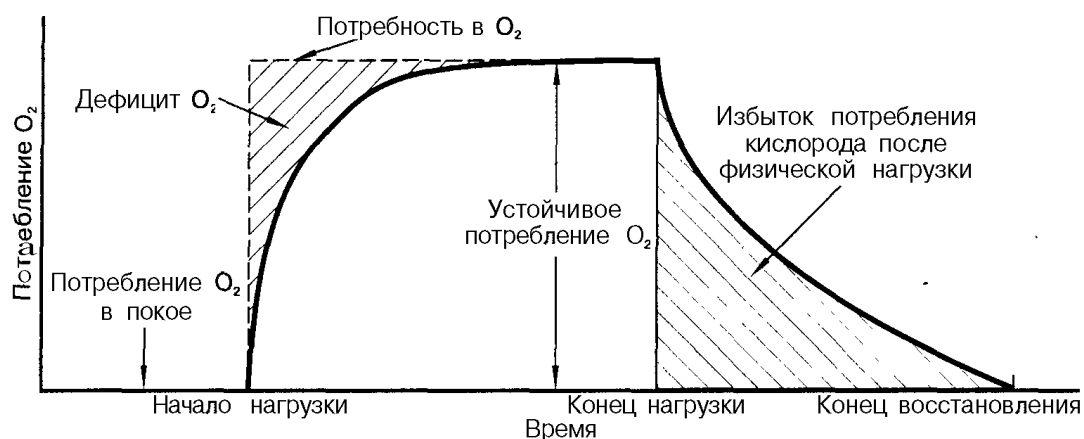


Рис. 4. Кинетика потребления кислорода во время и после физической нагрузки

В таблице 1. представлены концентрации (в миллимолях на килограмм мышечной массы) и общее количество молекул (в миллимолях), в виде которых запасается энергия в организме, а также величина энергии, которая может быть получена из этих молекул мужчиной массой 70 кг, мышечная масса которого составляет 30 кг. У женщин концентрация АТФ и

фосфокреатина такая же, как и у мужчин, но сама по себе мышечная масса у женщин меньше.

Таблица 1.

Оценка энергии, запасенной в теле человека массой 70 кг с мышечной массой 30 кг. Дана концентрация на кг массы и (в скобках) общее количество энергии, в предположении, что 1 моль АТФ соответствует 10 ккал [15]

Система	Содержание в мышцах (в моль/кг мышечной массы) (общее)	Полезная энергия (в ккал/кг мышечной массы) (общая энергия)
Фосфагенная система (АТФ-ФК)		
АТФ	4-6 (120-180)	0,04-0,06 (1,2-1,8)
ФК	15-17 (450-510)	0,15-0,17 (4,5-5,1)
АТФ + ФК	19-23 (570-690)	0,19-0,23 (5,7-6,9)
Анаэробный гликолиз		
Образование АТФ	33-38 (1000-1200)	0,33-0,38 (10,0-12,0)
Аэробный метаболизм		
Из запасов гликогена	13-15 г(400-450)	
Образование АТФ	2800-3200 (87000-98000)	28-32 (870-980)

Энергетические ресурсы, хранящиеся в организме человека в виде химических (макроэргических) соединений, даны в таблице 2.

Таблица 2.

Запасы источников энергии и самой по себе энергии в теле человека весом 65 кг, 12% из которых составляет жир

	Количество (г)	Энергия (ккал)
Углеводы		
Гликоген печени	110	451
Гликоген мышц	500	2050
Глюкоза в жидкостях	15	62
Общие углеводы	625	2563
Жир		
Подкожный и внутренний	7800	73320
Внутримышечный	161	1513
Общий жир	7961	74833

Под **мощностью** источника понимается то количество энергии (выраженное, например, в количестве молекул АТФ), которое может данный биохимический процесс вырабатывать в единицу времени. Иными словами, это показатель пропускной способности всего цикла биохимических

превращений — от субстрата (молекулы углевода или жирной кислоты) до углекислоты и воды — сопряженного с процессами фосфорилирования.

Под **емкостью** источника энергии понимается то количество энергии, которое может быть выработано за счет функционирования данного источника до полного исчерпания его ресурса.

Экономичность энергетического источника — это его термодинамическая эффективность, или к. п. д.

Термин *эффективность* может обозначать различные вещи, поэтому при употреблении этого термина нужно проявлять известную аккуратность и давать точные определения. *Метаболическая или мышечная эффективность* представляет собой отношение общей механической работы, совершенной всеми мышцами, к метаболической работе мышц (к затратам метаболической энергии). Другая мера эффективности, *механическая эффективность*, представляет собой отношение всей произведенной механической работы (как внутренней, так и внешней) к дополнительной метаболической энергии (к превышению израсходованной метаболической энергии над метаболической энергией покоя). Такой более жестко ограничивающий термин как *эффективность работы* представляет собой отношение внешней механической работы к метаболической «плате» за совершение этой работы (затраченной метаболической энергии минус метаболическая энергия при нулевой внешней работе). Неэффективность при осуществлении той или иной работы связана с тем, что не вся метаболическая энергия переходит в механическую энергию по совершению работы.

Таблица 3. Параметры производительности 3-х источников энергии в скелетных мышцах человека

Источник энергии	Мощность, Моль АТФ/мин	Емкость, кДж	Экономичность, %
Аэробный	0,8	∞	25-30
Лактацидный	1,2	60	12-14

У квалифицированных спортсменов уровень анаэробного порога значительно выше, чем у нетренированных лиц, как по абсолютной величине, так и в процентах от МПК. Отмечается, что у нетренированных молодых людей анаэробный порог обнаруживается при мощности нагрузки соответствующей потреблению кислорода около 50% от МПК и частоте сердечных сокращений 130 в минуту. У тренированных спортсменов мужчин АП отмечают при 70-80% от МПК и ЧСС - 160-180 в минуту.

Увеличение уровня АП при систематических физических напряжениях является важной адаптационной реакцией, благодаря которой устанавливается оптимальное для данного состояния организма соотношение вкладов аэробных и анаэробных механизмов в энергообеспечение организма при мышечной работе. Однако анаэробный порог не является показателем максимальных возможностей мышечной работы и даже не характеризует полностью аэробные возможности организма. Максимальная мощность развивается за счет активизации резервов креатинфосфата и может в 5-10 раз превышать анаэробный порог.

Полное раскрытие аэробных возможностей организма осуществляется в условиях максимального потребления кислорода (МПК). Установлено, что все энергетические траты организма, в том числе произведенные за счет анаэробных процессов, связаны в конечном итоге с окислительным фосфорилированием, поэтому МПК является чувствительным показателем аэробных возможностей. Отмечается, что величина МПК зависит от функционального развития систем, ответственных за транспорт кислорода и субстратов к мышечным волокнам, а также от мощности митохондриальных окислительных систем в мышцах.

Развитие биоэнергетики клетки, появление представлений о компарментализации цитоплазматических структур привело к предположению об универсальной роли креатинкиназной системы в качестве регулятора энергопродукции в клетке.

Изменился взгляд на роль анаэробного гликолиза в работающих мышцах: оказалось, что определенный уровень зачисления необходим для полноценной работы окислительных механизмов. Следствием таких биохимических особенностей организации энергетического метаболизма в скелетных мышцах является принципиальная возможность влиять на весь комплекс энергопродуцирующих механизмов за счет изменения отдельных элементов под воздействием целенаправленной тренировки.

Взаимосвязь структуры и биоэнергетики мышц

Энергетика мышц определяется составом мышечных волокон. Так, преобладание в основных смешанных мышцах быстрых мышечных волокон с анаэробной энергетикой или более медленных волокон с аэробными (окислительными) механизмами энергообеспечения во многом определяет целый ряд морфофункциональных особенностей организма.

Скелетные мышцы состоят из нескольких типов волокон, каждый из которых характеризуется своими специфическими особенностями и метаболизмом.

Согласно современным представлениям, большинство скелетных мышц человека представляют гетерогенные морфофункциональные системы, состоящие из мышечных волокон, отличающихся по структуре, метаболизму и функции.

В наиболее удачной из классификаций, в основу положено разделение мышечных волокон по содержанию в них СДГ (сукцинатдегидрогеназы) и АТФазы миозина. При этом сукцинатдегидрогеназа рассматривается как маркер активности окислительных процессов, а АТФаза миозина - как показатель скорости гидролиза АТФ, и, следовательно, скорости мышечного сокращения. При использовании метода определения миофибриллярной АТФазы после преинкубации в щелочной среде в скелетных мышцах обнаруживаются два основных типа мышечных волокон. Получаемые по окрашиванию светлые и темные структуры именуются соответственно

волокнами I и II типа. Волокна, дающие светлую окраску при использовании данного метода, обладают невысокой АТФ-азной активностью миозина и медленно сокращаются, а волокна, дающие темную окраску, обладают высокой АТФ-азной активностью и быстро сокращаются, в практике нашли также применение термины «медленносокращающиеся» и «быстрособкорщающиеся».

В соответствии с этой терминологией установили тесную зависимость между временем сокращения различных скелетных мышц и выявляемым гистохимическими методами распределением типов мышечных волокон. Исходя из разной чувствительности активности миозина АТФ-азы к сдвигу рН в кислую сторону, волокна II типа разделяются на две подгруппы IIА и IIВ.

По одной из последних классификаций, эти волокна обозначают как быстрособкорщающиеся гликолитические (FTG, FG или тип А), медленно сокращающиеся оксидативные (STO, SO или тип С) и быстро сокращающиеся оксидативно-гликолитические (FTOY, FOG или тип В). Существуют и промежуточные волокна, являющиеся производными волокон SO, но стоящие по своим свойствам между ними и FG. Показано, что медленно сокращающиеся оксидативные волокна характеризуются большими возможностями окислительных ферментов, аэробной энергопродукции и дыхательным ресинтезом АТФ.

Быстрособкорщающиеся гликолитические волокна обладают непродолжительным временем сокращения, высокой АТФ-азной активностью миозина, низким уровнем активности окислительных и высоким уровнем активности гликолитических ферментов, низким содержанием миоглобина.

Быстрособкорщающиеся окислительно-гликолитические волокна (FOG) характеризуются непродолжительным временем сокращения, высокой АТФ-азной активностью, высоким уровнем активности окислительных и гликолитических ферментов, высоким содержанием миоглобина.

Структурно-метаболическая организация мышечных волокон определяется специфическим набором изоформ миозина (фенотипом волокна). Установлено, что молекула миозина образована двумя основными видами полипептидных цепей - легкими (LC) и тяжелыми (HC). Существуют три изоформы HC и пять изоформ LC. Преобладание того или иного набора изоформ определяет характеристику соответствующего типа или подтипа мышечных волокон, в том числе их сократительные свойства.

Волокна характеризуются более низкой по сравнению с волокнами второго типа скоростью сокращения, повышенным порогом возбуждения и высокой устойчивостью к утомлению. Специфический набор изоформ миозина определяется характером иннервации волокна, то есть подконтрольность «быстрому» или «медленному» типу мотонейронов. Трофическое влияние мотонейронов на фенотип мышечного волокна осуществляется за счет устойчивого частотного характера импульсации мотонейронов. Установлено, что частота импульсации «медленных» мотонейронов составляет 10-15 Гц, «быстрых» - 40-50 Гц. Процентные соотношения двух основных типов мышечных волокон в той или иной мышце человека принято называть мышечной композицией.

Содержание волокон первого типа в мышцах находится в тесной положительной взаимосвязи с аэробной производительностью, анаэробным порогом, локальной выносливостью мышц и периодом их полураспада. Содержание волокон второго, «быстрого» типа достоверно коррелирует со скоростно-силовыми показателями: скоростью одиночного сокращения мышц, градиентом произвольного сокращения, характером кривой «сила-скорость».

Мышечные волокна типа I в мировой номенклатуре обозначают как красные, окислительные, медленные, устойчивые к утомлению. В мышечных волокнах I типа хорошо выражена Z полоска, которая толще, чем в мышечных волокнах других типов. Полоска M состоит из 5 параллельных полосок, саркоплазматический ретикулум развит в меньшей степени, чем в

других типах мышечных волокон. В данных структурах выявляется много митохондрий с поперечной ориентацией. В митохондриях находится большое количество крист с более электронноплотным матриксом. В саркоплазме обнаруживаются липидные капли, которые часто контактируют с митохондриями. Мышечные волокна I типа характеризуются также высокой степенью кровообращения. Каждое мышечное волокно I типа контактирует с 5-6 кровеносными капиллярами. В этих волокнах отмечается самое высокое содержание миоглобина. В МВ I типа обнаруживается более низкая активность креатинфосфокиназы, чем в других МВ. Креатинфосфокиназа в МВ I типа представлена четырьмя изоферментами. Содержание АТФ в мышечных волокнах I типа такое же, как в МВ II А и более низкое, чем в мышечных волокон типа II В. АТФаза миозина в волокнах МВ I более устойчива к воздействию формалина и кислой среды и ингибируется в щелочной среде. Содержание гликогена в данных мышечных структурах меньше, чем в других МВ. Электрофоретически в МВ I типа преимущественно выявляется первый изофермент лактатдегидрогеназы. Данные структуры отличаются высокой интенсивностью бета-окисления жирных кислот и реакции на бутирил-КоА-дегидрогеназу. В них активны и процессы окисления кетоновых тел. По активности ферментов обмена аминокислот МВ типа I занимают промежуточное положение между МВ типа II А и II В. В мышечных волокнах I типа очень высока интенсивность реакций цикла Кребса и окисления восстановленных никотинамидных нуклеотидов. Данные структуры занимают промежуточное положение по содержанию цитохрома С и активности цитохром-С-оксидазы.

Мышечные волокна типа II В в мировой номенклатуре обозначают как белые, быстрые, гликолитические, быстроутомляемые. Данные структуры в дефинитивном состоянии характеризуются большими размерами. Линия г в мышечных волокнах типа II В более тонкая, чем в МВ других типов, а полоска М при большом увеличении электронного микроскопа оказывается состоящей из трех параллельных линий. В данных структурах очень хорошо

развит саркоплазматический ретикулум, системы терминальных цистерн и триад. В саркоплазме МВ II В типа сравнительно немного малых по размерам митохондрий, содержащих небольшое число крист. Мышечные волокна II В типа контактируют с меньшим количеством капилляров, чем мышечные волокна других типов. Кроме того, в этих волокнах имеется очень мало миоглобина. Именно этим объясняется их более светлая окраска, благодаря чему они и получили название «белых» МВ. В МВ II В высоко содержание креатинфосфата, выше, чем в других типах мышечных волокон. Гистохимическими методами в МВ II В выявляется высокая активность креатинфосфокиназы, большая, чем в МВ типа I. В МВ данного типа выявляется только один - второй изофермент креатинфосфокиназы. АТФаза миозина в данных мышечных волокнах имеет оптимум рН 9,4-9,6, инактивируется в кислой среде, устойчива к воздействию основной среды, чувствительна к действию формалина. В данных структурах содержится очень немного липидов, не входящих в состав мембран. В них крайне низка неспецифическая эстеразная активность. В МВ ПВ низка интенсивность процессов окисления ацетоацетата до CO_2 и лишь небольшое его количество превращается в бета-оксибутират или лактат. Данные волокна характеризуются низкой активностью цикла Кребса. В них низка активность сукцинатдегидрогеназы, мало содержится цитохрома С и невелика активность цитохром-С-оксидазы [69].

Мышечные волокна типа II А в мировой номенклатуре обозначают как промежуточные, окислительно-гликолитические, быстрые, устойчивые к утомлению. Полоска Z в мышечных волокнах типа II А, по мнению ряда авторов, толще, чем в мышечных волокнах типа II В и не отличается от таковой в МВ I типа. Вместе с тем большинство авторов считают, что по данному показателю МВ II А занимают промежуточное положение между мышечными волокнами I типа и МВ II В. Линия М при большом увеличении электронного микроскопа состоит из 3 или 5 параллельных полосок. В МВ II А хорошо развит саркоплазматический

ретикулум и системы триад. Мышечные волокна типа II А богаче митохондриями, чем МВ типа II В и практически не отличаются по этому признаку от МВ I. Митохондрии в мышечных волокнах типа II А имеют преимущественно продольную ориентацию (по длинной оси МВ). Они часто образуют скопления под сарколеммой. В саркоплазме МВ II А встречается достаточно большое количество липидных капель. Мышечные волокна типа II А содержат больше миоглобина, чем мышечные структуры типа II В. Содержание креатинфосфата в МВ типа II А ниже, чем в МВ типа II В и не отличается от такового в МВ I. Мышечные волокна данного типа представляются универсальными в плане их метаболизма. В связи с тем, что мышечные волокна типа II А способны длительное время производить работу достаточно большой мощности, они должны рассматриваться и как универсальные мышечные волокна в плане их функциональных возможностей.

При использовании активности АТФазы миозина для определения различных типов мышечных волокон в некоторых мышечных структурах была выявлена высокая активность фермента как в кислой, так и в щелочной среде. Таких мышечных волокон обнаруживалось не более 0,5 - 1 % и их называли МВ ПС. Большинство авторов, описывавших эти мышечные волокна считали, что речь идет о малодифференцированных мышечных структурах, содержащих равные количества быстрого и медленного миозинов. Другие авторы полагали, что мышечные волокна типа ПС являются волокнами с нарушенной иннервацией, которые не входят в состав двигательных единиц мышцы. Мышечные волокна ПС характеризуются АТФазой, устойчивой к преинкубации при pH 10,3 и умеренно ингибируемой при воздействии среды с pH 4,3 и 4,6. Учитывая малое суммарное количество мышечных волокон данного типа, можно предположить, что они не могут существенно повлиять на общую картину функциональной характеристики скелетной мускулатуры.

Таблица 4. Морфометрические, биохимические и гистохимические характеристики мышечных волокон различных типов

Показатели	МВ I	М II А	М II В
	Медл.сокр. неутомляем	Быстрокр малоутомл	Быстрокр быстроутм
Время одиночного сокращения (мс)	80	50	30
Оптимум рН АТФазы миозина	8,6-9,2	9,4-9,6	9,4-9,6
Активность ферментов (мМ/мин.кг (-1) сухого веса)			
1. Гликолитические ферменты:			
а) активность гексокиназы	+++	+++	+
б) активность фосфоглюкоизомеразы	+	++	+++
в) активность фосфофруктокиназы	+	++	+++
г) активность альдолазы	+	++	+++
д) активность пируваткиназы	+	++	+++
е) активность лактатдегидрогеназы	+	++	+++
2. Окислительные ферменты:			
а) активность сукцинатдегидрогеназы	+++	++	+
б) активность фумаразы	+++	++	+
в) активность цитохром-С-оксидазы	+++	+++	+
г) количество миоглобина	+++	+++	+
3. Содержание субстратов (мМ/кг сухого веса):			
а) гликоген	344	386	402
б) липиды	207	179	74
4. Морфометрические показатели:			
а) количество капилляров	+++	+++	+
б) количество митохондрий	+++	+++	+

Примечание: +++ - активность высокая, ++ - активность умеренная, + - активность низкая.

В связи с тем, что содержание мышечных волокон в скелетных мышцах людей генетически детерминировано и индивидуально, то работа различной мощности и продолжительности будет неодинакова у разных индивидуумов. Содержание в мышцах свыше 60% мышечных волокон типа I способствует проявлению высокой выносливости при физической работе в зонах большой и умеренной мощности; суммарное содержание в мышце свыше 80-90% мышечных волокон типов II А и II В способствует проявлению скоростно-силовых качеств, соответствующих зонам максимальной и субмаксимальной мощности; содержание в мышцах до 60% мышечных волокон типа II А и 20-40% мышечных волокон типа I способствует проявлению выносливости как при выполнении физической работы большой и умеренной мощности, так и при работе максимальной мощности.

Оценка параметров энергетики по величине констант уравнения Мюллера

Простейшее уравнение динамики показывает, что в обычных системах между энергетической емкостью (E), величина которой определяется запасами носителей энергии (горючего или иного субстрата) и длительностью предельной работы ($t_{пред.}$) существует простая линейная зависимость при любой мощности выполняемой работы (W):

$$t_{пред.} = E / W$$

Уравнение Мюллера может быть представлено в виде:

$$t_{пред.} = \frac{e^b}{W^a}$$

где $t_{пред.}$ - предельное время работы при данной нагрузке;

W - мощность;

e - основание натуральных логарифмов;

a и b - коэффициенты.

Достаточно при двух мощностях нагрузки определить время, в течение которого может удерживаться эта нагрузка, что вычислить коэффициенты уравнения Мюллера и, следовательно, оценить работоспособность при любой интересующей нас нагрузке.

Величина показателя коэффициента « a » зависит от преобладания того или иного источника энергии мышц у данного субъекта и может быть оценена по результатам двухнагрузочного тестирования:

$$a = \frac{\ln \frac{t_{пред.3}}{t_{пред.5}}}{\ln \frac{W_5}{W_3}}$$

Установлено, что если при заданной мощности работы функционирует только алактатный (креатинфосфатный) источник с уже готовым запасом энергетических ресурсов, показатель коэффициента « a » близок к единице. При преобладающем вкладе анаэробно-гликолитического (лактацидного)

источника энергии, показатель коэффициента « a » возрастает до 2-3. Величина « a » резко увеличивается при подключении к работе значительно более сложно устроенного аэробного (окислительного) источника и достигает 4-5. Таким образом, физиологический смысл этого показателя можно связать с отношением возможностей аэробного и анаэробно-лактацидного источников энергии.

Коэффициент « b », характеризующий емкость энергетических систем, также может быть оценен по результатам двухнагрузочного тестирования:

$$b = \ln(t_{пред3} \cdot W_3^a) = \ln(t_{пред5} \cdot W_5^a),$$

Показано, что все учитываемые уравнением Мюллера изменения рабочих возможностей связаны с этим показателем. Его абсолютная величина соответствует времени предельной работы при нагрузке, равной единице мощности, и характеризует возможности устойчивого функционирования двигательного аппарата, т.е. общую выносливость испытуемого.

Если выразить

$$e^b = K,$$

то уравнение Мюллера можно записать в более упрощенном виде:

$$t_{пред.} = \frac{K}{W^a}$$

$$K = W^a \cdot t_{пред.}$$

Таким образом, K представляет собой величину, имеющую размерность работы, по смыслу близкую к понятию емкости источника энергии (с точностью до величины КПД). Величину K можно определить как предельно возможный объем выполненной работы при нагрузке W . С помощью этих уравнений, можно рассчитать значение этого параметра для широкого диапазона нагрузок, в энергообеспечении которых принимают участие анаэробно-гликолитические процессы. Установлено, что показатель

K позволяет количественно представить потенциальную рабочую возможность испытуемого, его способность к длительному удержанию заданной нагрузки, безотказной работе. В связи с этим, данный показатель может использоваться для контроля за индивидуальными сдвигами работоспособности под влиянием целенаправленной тренировки.

Важнейшим из количественных эргометрических показателей является величина предельной (до появления явных признаков утомления при данной интенсивности нагрузки) работы A .

Используя уравнение динамики: $P-V=W$, где W - мощность заданной работы, можно написать основное эргометрическое уравнение, широко используемое и в настоящее время:

$$A_{пред} = W t_{пред}, \text{ КДж/кг}$$

т.е. объем предельной работы прямо пропорционален мощности нагрузки и предельному времени ее удержания. Объем выполненной работы отражает емкость соответствующих энергетических источников.

$$A = C = W \cdot t_{пред.}$$

$$A = C = W t_{пред}, \quad \text{кДж/кг};$$

где C - емкость.

Показатели мощности аэробного и анаэробного источников можно оценить, рассчитывая максимальную мощность при работе длительностью 900 и 40 с (показатели W_{900} и W_{40}). При этом можно применить формулы:

$$W_{900} = \frac{e^b}{900^{1/a}}, \quad (\text{Вт/кг});$$

$$W_{40} = \frac{e^b}{40^{1/a}}, \quad (\text{Вт/кг});$$

Используя уравнение Мюллера, можно с большой точностью рассчитать величину такой мощности, которую испытуемый сможет удерживать ровно в течение 900 и 40 секунд.

Емкость аэробного источника может быть оценена величиной числителя уравнения Мюллера:

$$C_{aэр.} = e^b \quad (\text{Дж/кг});$$

Это длительность работы при нагрузке мощностью 1 Вт/кг.

Таким образом, модель Мюллера позволяет оценивать мощностные показатели, опираясь на величины коэффициентов «*a*» и «*b*», можно вычислить любую фиксированную мощность, характеризующую тот или иной источник энергии.

Оценка параметров энергетики по величине скорости накопления пульсового долга

Суммарно степень изменения гомеостатических параметров можно оценить по величине кислородного долга, то есть по количеству энергии, которую необходимо затратить после окончания работы на восстановительные процессы. Приблизленно эти затраты можно оценить и по величине *пульсового долга* (ПД). Накопление пульсового долга за время работы стандартной интенсивности в свое время было использовано для оценки общей работоспособности при разработке Гарвардского теста. В этой пробе, как известно, используется величина пульс-суммы за 5 минут после завершения работы. Но такой показатель можно сделать еще более чувствительным, вычитая (как и при вычислении кислородного долга) величину пульса покоя (1111) по схеме:

$$\text{ПД} = (\text{П1} + \text{П2} + \dots + \text{П5}) - 5\text{ПП}$$

В то же время оказалось, что величина ПД при предельной работе является довольно стабильной величиной, постепенно снижающейся при увеличении нагрузки.

Величина ПД при выполнении предельной работы является как бы верхней границей накопления пульсового долга, и по величине этого показателя можно судить о степени отклонений гомеостаза от его исходных

значений, достижение которого субъективно связано с появлением ощущений утомления. По мере увеличения мощности выполняемой работы и скорости накопления пульсового долга величина ПД постепенно снижается.

Имеется связь энергетической стоимости упражнений с параметрами пульсового долга. Показано, что в наибольшей степени от мощности нагрузки и состояния работоспособности испытуемого зависит именно скорость накопления пульсового долга, обозначенного как *Индекс Накопления Пульсового Долга* (ИНПД). Величина этого показателя может быть определена по формуле:

$$\text{ИНПД} = \text{ПД} / t_{\text{пред}}, \text{ сс./с.}$$

Это тот самый показатель, с помощью которого можно интегрально оценить изменение гомеостатических параметров во время совершения работы. Приведенные данные показывают, что при увеличении мощности выполняемой работы величина ИНПД резко возрастает в соответствии со степенной функцией при показателе степени > 1 .

Применение эргометрических и пульсометрических методов значительно расширяет возможности при оценке мощностных и емкостных параметров энергетики скелетных мышц спортсменов.

Три основных типа адаптации мышц:

- рабочая гипертрофия, когда наиболее значительные изменения наблюдаются в отношении белковой массы мышц;
- повышение «аэробной производительности», когда наибольшие изменения происходят в дыхательных системах мышц;
- повышение «анаэробной производительности», связанной с увеличением креатинкиназного и гликолитического ресинтеза АТФ.

Общим для всех форм адаптации является повышение эффективности мобилизации и утилизации источников энергии (адекватно характеру мышечной деятельности).

Структурные изменения в значительной мере определяются спецификой мышечной нагрузки, к которым адаптируется организм. В

основе формирования этих структурных изменений лежит активация синтеза белков преимущественно тех клеточных структур и ферментов, которые лимитируют функцию скелетных мышц в нетренированном организме при данном конкретном виде нагрузки.

Этапы метаболизма, определяющие деятельность этих систем, регулируются обратными связями и управляющим механизмом. После окончания активной деятельности каждой из этих систем, следует период восстановления. Время восстановления к исходному уровню энергетических резервов, «выплаты» кислородного долга и уменьшения концентрации молочной кислоты после окончания работы приведено в таблице 6.16. Длительность анаэробной работы лимитируется концентрацией молочной кислоты в мышцах, максимальная величина которой составляет 2,0-2,3 г/кг мышечной массы. Это значит, что при мышечной массе равной 30 кг максимальное количество молочной кислоты в организме может составлять 60-70 г.

Таблица 5. Время восстановления после изнурительной работы

	Минимум	Максимум
Восстановление системы АТФ + ФК	2 мин	5 мин
Пополнение запасов мышечного гликогена	5-10 час	24-46 час
Восстановление запасов гликогена печени	неизвестно	12-24 час
Восстановление O_2 в плазме и миоглобине	10-15 с	1 мин
Длительность быстрой составляющей восстановления O_2	3 мин	6 мин
Длительность медленной составляющей восстановления O_2	30 мин	1 час
Уменьшение молочной кислоты в крови и мышцах	30-60 мин>	1-2 час

Таблица 6. Приблизительный вклад анаэробных и аэробных механизмов энергообеспечения в общем энергетическом балансе у высококвалифицированных спортсменов на различных легкоатлетических дистанциях

Дистанция	Рекордное время	Аэробный механизм, %	Анаэробный механизм, %
100 м	0:09.79	10	90
400 м	0:43.29	30	70
800 м	1:41.11	60	40
1500 м	3:26.00	80	20
5000 м	12:39.36	95	5
10 000 м	26:22.75	97	3
42.2 м	2:05.42	>99	< 1

Таблица 7. Концентрация различных метаболитов мышцы в покое и после 6, 10 и 20 с нагрузки у высококвалифицированных спортсменов на различных спринтерских дистанциях [14]

Метаболиты	Отдых	6 с	10 с	20 с	30 с
Гликоген	404	-	357	330	281
Креатинфосфат	81	53	36	21	14
АТФ	25.6	23.2	20.2	19.8	19.6
Пируват	2.9	-	14.8	17.4	16.2
Лактат	5	28	51	81	108

У спортсменов высокого класса, специализирующихся в видах спорта, требующих проявления выносливости при аэробной работе, отмечаются абсолютные величины максимального потребления кислорода, достигающие 6,0—7,0 л·мин⁻¹, относительные величины могут достигать 80—90 мл·кг⁻¹·мин⁻¹. У женщин, достигших высшего спортивного мастерства в видах спорта, предъявляющих особо высокие требования к аэробным возможностям, абсолютные величины $\dot{V}O_{2\max}$ могут достигать 4,0—4,5 л·мин⁻¹, относительные — 70—75 мл·кг⁻¹·мин⁻¹. Требования, которые предъявляют различные виды спорта к мощности аэробной системы энергообеспечения, достаточно наглядно отражают данные, представленные в таблице.

Таблица 8. Типичные значения МПК в различных видах спорта

Виды спорта	Максимальное потребление кислорода, мл·кг ⁻¹ ·мин ⁻¹	
	Мужчины	Женщины
<i>Циклические</i>		
Бег на длинные дистанции	75—80	65—70
Лыжные гонки	75—78	65—70
Биатлон	75—78	—
Велоспорт (шоссе)	70—75	60—65
Велоспорт (трек)	65—70	55—60
Бег на длинные дистанции	70—75	65—68
Конькобежный спорт	65—72	55—60
Плавание	60—70	55—60
Гребля	65—69	60—64
<i>Спортивные игры</i>		
Футбол	50—57	—
Гандбол	55—60	48—52
Хоккей на льду	55—60	—
Волейбол	55—60	48—52
Баскетбол	50—55	40—45
Теннис	48—52	40—45
Теннис настольный	40—45	38—42
Единоборства		
Бокс	60—65	—
Борьба	60—65	—
Дзюдо	55—60	50—55
Фехтование	45—50	40—45
<i>Скоростно-силовые</i>		
Спринтерская гонка на треке	55—60	45—50
Легкоатлетический спринт (100 м, 200 м)	48—52	43—47
Прыжки в длину	50—55	45—50
Тяжелая атлетика	40—50	—
Метание диска, толкание ядра	40—45	35—40
Метание копья	45—50	42—47
Прыжки с шестом	45—50	—
Прыжки на лыжах с трамплина	40—45	—
<i>Сложнокоординационные</i>		
Скоростной спуск на лыжах	60—65	48—53
Фигурное катание	50—55	45—50
Гимнастика спортивная	45—50	40—45
Гимнастика художественная	—	40—45
Парусный спорт	50—55	45—50
Стрелковый спорт	40—45	35—40

Таблица 9. Процентный вклад различных источников энергии в ресинтез АТФ в разных видах бега

Виды бега, м	Процентный склад в ресинтез АТФ				
	Креатин-фосфат	Гликоген		Глюкоза крови (гликоген печени)	Триглицерид (жирные кислоты)
		анаэробный	аэробный		
100	50	50	—	—	—
200	25	65	10	—	—
400	12,5	62,5	25	—	—
800	*	50	50	—	—
1500	*	25	75	—	—
5000	*	12,5	87,5	—	—
10000	*	3	97	—	—
Марафон	—	—	75	5	20
Супермарафон (84 км)	—	—	35	5	60
24-часовой забег	—	—	10	2	88

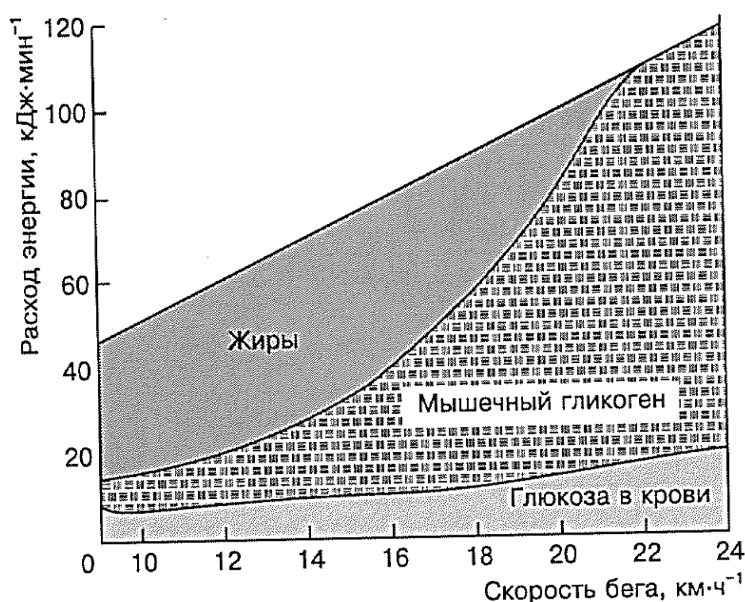


Рис. 5. Относительный вклад углеводов и жиров в беге в зависимости от его интенсивности

Пробегание 200-метровой дистанции за 20 с, например, требует потребления кислорода (в случае если ресинтез АТФ осуществляется аэробным путем) около 45—50 л·мин⁻¹ или 15,0—16,6 л за 20 с, что примерно в 10 раз превышает мощность аэробной системы энергообеспечения хорошо подготовленного спортсмена.

Анаэробные лактатные источники являются основными в энергообеспечении работы, продолжительность которой колеблется от 30 с

до 6 мин, и именно они в значительной мере определяют выносливость спортсмена в беге на дистанции 400, 800 и 1500 м, плавании на дистанции 100 и 200 м, гонках на треке на дистанции 1000 и 4000 м. Эти источники обеспечивают высокий уровень работоспособности в художественной гимнастике, различных видах борьбы, фигурном катании, горнолыжном спорте и др. Велико значение анаэробных источников в ряде спортивных игр, особенно связанных с жестким единоборством (хоккей, водное поло).

Аэробный путь энергообеспечения является основным при длительной работе: беге на дистанции 5000 и 10 000 м, марафонском беге, велосипедных гонках на шоссе, лыжных гонках, плавании на дистанции 800 и 1500 м, беге на коньках на дистанции 5000 и 10 000 м.

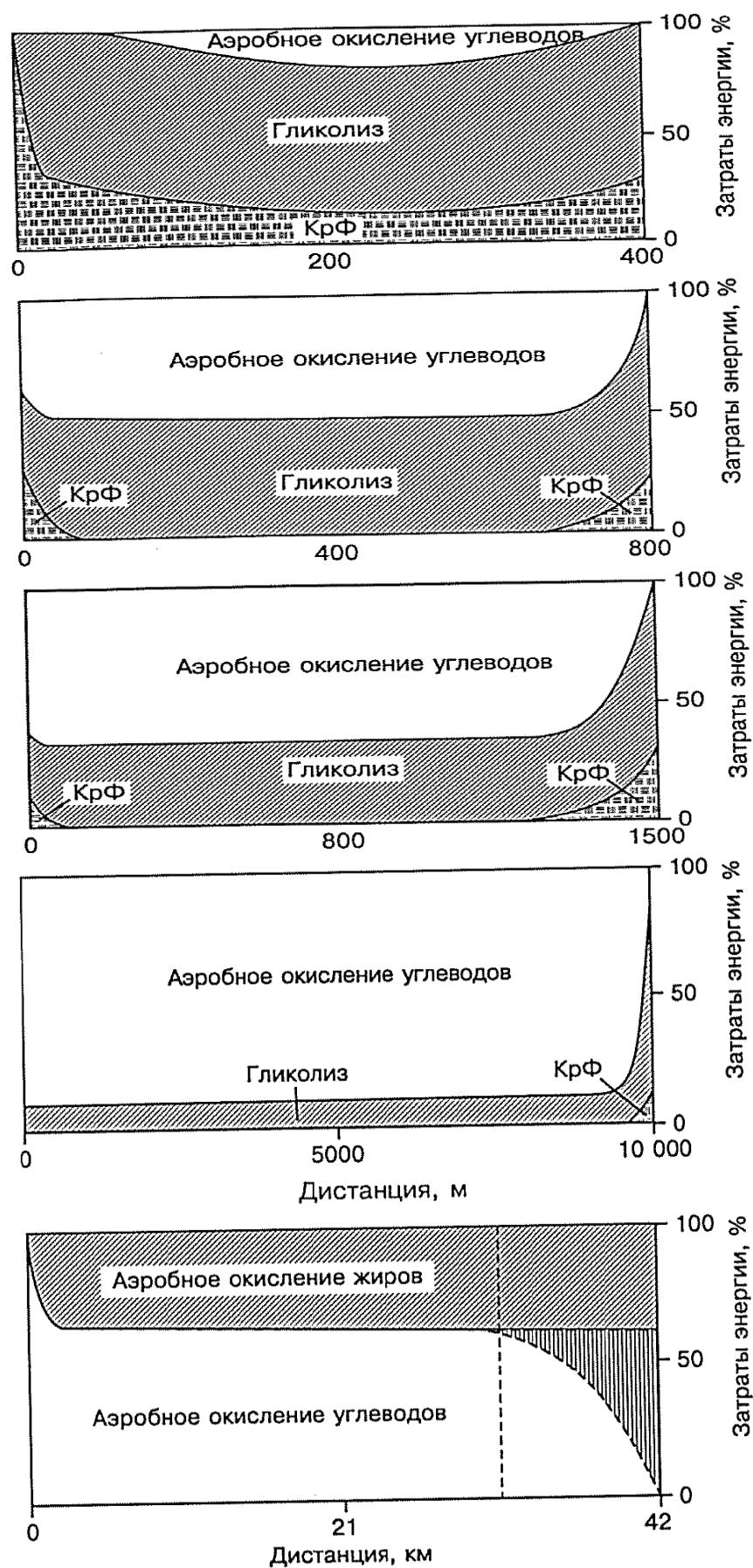


Рис. 6. Соотношение различных путей энергообеспечения бега на дистанции 400 м, 600 м, 1500 м, 10000 м. 42 км 195 м [53]

Математическое моделирование энергообеспечения в спортивной деятельности

В основе математического моделирования в спортивной лежат математические модели энергетического обеспечения двигательной работы, которые, в свою очередь, делятся на две группы.

К первой группе относятся регрессионные уравнения, связывающие механическую мощность (или скорость передвижения) с величиной энергетических затрат в единицу времени. По существу, это функциональные модели, содержащие информацию о характеристиках оптимальных режимов равномерной по интенсивности мышечной работы. Расчет оптимальной (наиболее экономичной) механической мощности осуществлялся по известным формулам, элементами которых служили коэффициенты нелинейных уравнений.

Во второй группе - модели, более или менее полно отображающие структуру физиологических механизмов энергообеспечения спортивной деятельности. Чем точнее такая модель воспроизводит закономерности энергообразования, тем она сложнее и тем труднее в рамках той же модели подробно рассматривать процессы использования механической энергии.

При изучении такой сложной системы как человек очень важно сформулировать набор по возможности наиболее «простых» моделей, агрегирующих в небольшом числе переменных информацию о системе и поддающихся аналитическому исследованию.

Так энергетические ресурсы организма можно разделить на два вида: свободные ресурсы, непосредственно расходуемые на поддержание жизнедеятельности, и резервные ресурсы (энергетическое депо), мобилизуемые при недостатке свободных ресурсов. Благодаря такому разделению ресурсов организма стало возможным в разрабатываемой модели учитывать и оценивать накопление неблагоприятных эффектов в организме человека при длительном (хроническом) воздействии на него факторов

условий тренировочного и соревновательного процесса. Для этого была разработана структурная схема модели энергетического обмена (рис. 7).

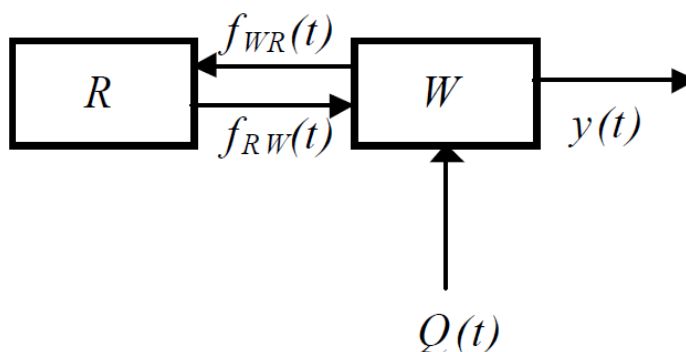


Рис.7. Структурная схема модели энергетического обмена

В два блока схемы выделены (см. рис. 3.2): R - запасы энергетического депо (ккал) и W - запасы «свободной» энергии (ккал), получаемой организмом извне (функция $Q(t)$, ккал/мин), либо мобилизуемой из энергетического депо (функция $f_{RW}(t)$, ккал/мин). Расход свободной энергии обусловлен воздействием факторов тренировочного процесса (функция $y(t)$, ккал/мин). В случае положительного энергобаланса избыточное количество свободной энергии депонируется в энергетическом депо (функция $f_{WR}(t)$ ккал/мин).

Достоинство разработанной структурной схемы модели состоит в возможности анализировать баланс потоков энергозатрат и энергопродукции организма спортсмена, избежав при этом необходимости в многократном применении специальных медицинских, морфологических методик для непосредственной оценки запасов энергетического депо.

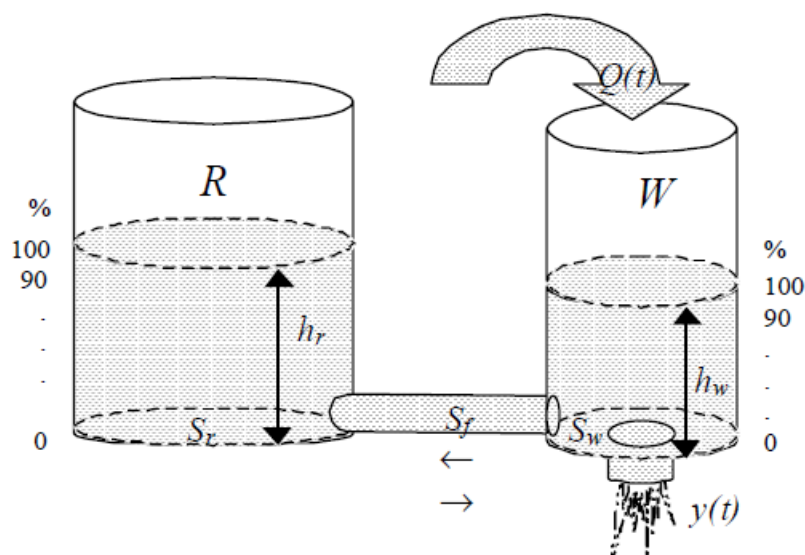


Рис.8. Модель энергетического обмена

Разработанная модель (см. рис. 8 содержит два сосуда R и W , параметр h_r определяет высоту жидкости в сосуде R и, соответственно, концентрацию макроэргических веществ в энергетическом депо организма, h_w - высота жидкости в сосуде W (концентрация свободной энергии). Произведение высоты уровня жидкости в сосуде на площадь его основания дает объем жидкости (т.е. запас энергии, в ккал). Параметр S_f - площадь сечения соединительного канала - определяет объем жидкости, перетекающей между сосудами.

Объем сосуда W можно трактовать не только как уровень свободной энергии, но и как характеристику функциональных возможностей организма по скорости и плотности потока энергозатрат. Так, чем больше объем W , тем большую моментальную мощность может спортсмен развить человек для выполнения нагрузки, либо тем дольше он сможет выполнять умеренную нагрузку без привлечения ресурсов депо. Объем сосуда W можно считать также показателем тренированности либо физической формы конкретного индивида.

Функциональная нагрузка $y(t)$ имитируется на модели «открытием» спускового клапана сосуда W . Объем жидкости, покидающей сосуд, определяется величиной энергозатрат $y(t)$ и соответствует оценке тяжести и напряженности тренировочного процесса. Восполнение затрат энергии

происходит благодаря активации энергопродукции организма, выражаемой функцией $Q(t)$. При исчерпании свободной энергии и недостаточном уровне $Q(t)$ мобилизуются ресурсы энергетического депо (запасы сосуда R). Восстановление первоначального уровня сосуда R происходит при избыточном уровне свободной энергии.

Для возможности исследовать динамику параметров модели при нагрузках, различных по величине, времени начала и продолжительности воздействия, а также различных типах кривой биологического ритма температуры тела было получено математическое описание модели.

Данная простейшая математическая модель может использоваться спортсменом и тренером для индивидуальной профилактики состояний переутомления, для выявления оптимального периода времени для начала выполняемой работы и ее предельной интенсивности.

Для вывода модели используются уравнения энергетического баланса организма. С системных позиций описанные явления означают нарушение равенства темпов потоков вещества и энергии, поступающих в систему и покидающих ее, и мобилизацию резервных источников в случае отрицательного баланса.

Процесс воспроизводства энергии (катаболизм) является частью обмена веществ организма и заключается в расщеплении с освобождением энергии сложных органических веществ (в т.ч. пищевых) в результате совокупности ферментативных реакций. Так как повышение интенсивности обмена веществ сопровождается усилением теплообразования, то изменение температуры тела человека может служить показателем, по которому можно судить об изменении интенсивности обменных процессов (в том числе и катаболизма) в организме: период нарастания температуры тела рассматривается как фаза прогрессирующего возбуждения физиологической системы, а период снижения, наоборот, - как фаза прогрессирующего торможения.

Для возможности выявить для индивидуумов с одним из пяти типов ритма температуры тела наиболее благоприятные и неблагоприятные периоды для выполнения работы необходимо провести имитационное моделирование.

Величина нагрузки (уровень энергозатрат) задается в зависимости от графика и напряженности тренировок (в пределах 1,225 – 7,14 ккал/мин), что соответствует состоянию покоя, либо выполнению крайне напряженной работы.

Известны факты многолетних наблюдений суточной цикличности физиологических процессов у спортсменов. Анализ получаемых данных позволил систематизировать индивидуальные особенности ритма температуры тела спортсменов и выделить несколько типичных кривых, отличающихся по уровню, характеру и амплитуде суточной динамики температуры. Наиболее полная классификация содержит описание пяти различных типов (рис. 3.5):

1. нормальный тип кривой с максимальным увеличением функций (акрофазой) к 16 ч и понижением в позднее вечернее и ночное время;
2. уплощенный тип кривой, характеризующийся малой амплитудой колебаний;
3. падающий тип кривой (снижение функций в интервале 6-16 часов и повышение к 20-21 ч);
4. кривые со смещенной акрофазой (акрофаза смещается с 16 к 22-24 ч);
5. кривые с искажениями (парадоксальный тип кривой с максимальным значением функций в ночное время, минимальным - днем).

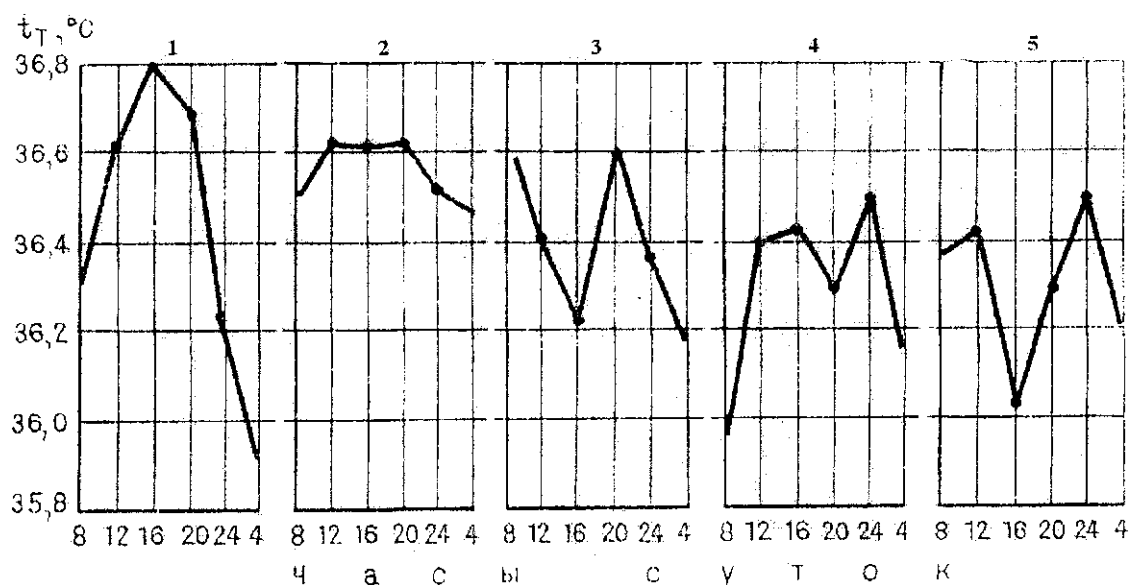


Рис. 9. Типы суточных кривых ритма температура тела
1 - нормальный тип, 2 - уплощенный, 3 - падающий, 4 - смещенный, 5 – парадоксальный.

Для построения суточной кривой биологического ритма проводится анализ хронограмм, регистрирующих изменения значений исследуемого физиологического показателя.

Анализируя темпы потоков энергообмена (интенсивности энергозатрат при заданных силе, времени начала, продолжительности воздействия и интенсивности энергопродукции, оцениваемой по кривой биологического ритма температуры тела) возможно прогнозировать изменение первоначального уровня запасов энергетического депо и давать оценку величине индивидуального профессионального риска для спортсмена, определять наиболее благоприятные периоды для выполнения тренировочных нагрузок и оценивать уровень восстановления.

Модель процессов расхода и восстановления организмом человека энергетических ресурсов может использоваться спортсменом для личной профилактики состояний переутомления, для выявления оптимального периода времени для начала выполняемой работы и ее предельной интенсивности у спортсменов.

Поэтому уровень ресурсов энергетического депо организма предлагается использовать в качестве показателя профессионального риска

спортсмена и трактовать снижение уровня ресурсов как рост вероятности ухудшения состояния здоровья и болезни организма.

Поэтому предлагается оценивать потоки энергозатрат и энергопродукции организма, а по результатам их сравнения давать искомую оценку динамики запасов энергетических депо относительно их первоначального уровня.

Математические модели энергообеспечения мышечной работы

Предложена трехкомпонентная гидравлическая модель биоэнергетики мышечной работы (рис. 10).

Данная модель предложена, чтобы представить биоэнергетические процессы во время механической работы спортсмена и последующего его восстановления. Во время упражнения потоки жидкости от трех сообщающихся сосудов в системе аналогичны циркуляции высокоэнергетических фосфатов, потребления кислорода и производства молочной кислоты (лактата) в организме. Во время восстановления пополнение жидкостью сосудов представляет собой восполнение кислородного долга. Модель согласуется с наблюдаемыми экспериментальными данными.

Чтобы вывести дифференциальные уравнения модели соответствующие каждой фазе, необходимо составить энергетический баланс:

$$W = \dot{V}O_2 - \dot{V}_P - \dot{V}_L \quad (3.3.1)$$

где W – выходная мощность; $\dot{V}O_2$ – скорость потребления кислорода; $\dot{V}_P$ – производительность (мощность) креатинфосфатного источника; $\dot{V}_L$ – производительность (мощность) лактаcidного источника.

где h – высота израсходованной части креатинфосфатного источника;

A_P – площадь поперечного сечения креатинфосфатного источника;

где A_L – площадь поперечного сечения лактаcidного источника.

$(1-\phi)$ - высота неизрасходованной части аэробного источника; M_0 – МПК.

l – высота израсходованной части анаэробного лактаcidного источника;

M_L – максимальная производительность анаэробного лактаcidного источника;

λ – разность уровней дна между креатинфосфатным и лактаcidным источниками; θ – разность уровней между максимальной высотами аэробного и анаэробного источников.

Общее решение будет иметь вид:

$$l = c_1 e^{r_1 t} + c_2 e^{r_2 t} + c/b$$

$$h = k_1 e^{r_1 t} + k_2 e^{r_2 t} + c/b + \theta$$

Для фазы восстановления решение будет выглядеть:

$$l = c'_1 e^{r_1 t} + c'_2 e^{r_2 t} + c'/b$$

$$h = k'_1 e^{r_1 t} + k'_2 e^{r_2 t} + c'/b + \theta$$

где A_L – площадь поперечного сечения лактаcidного источника.

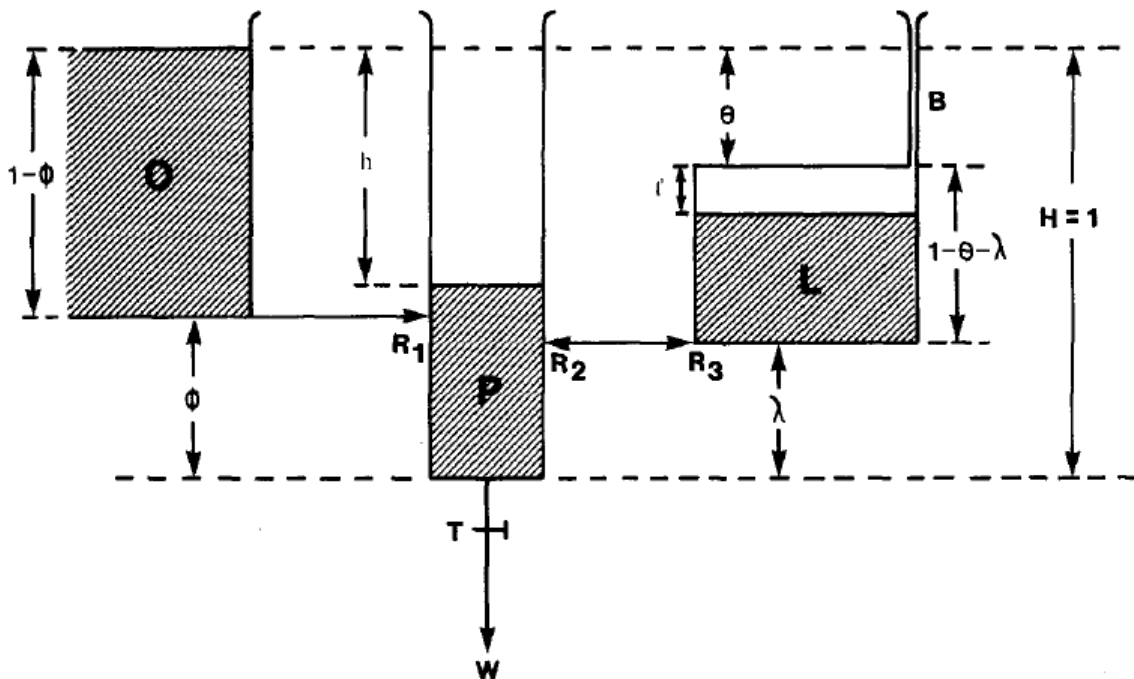


Рис. 10. Обобщенная трехкомпонентная гидравлическая биоэнергетическая модель мышечной работы при физической нагрузке

Количество кислорода, необходимое для полного обеспечения выполняемой работы, называют *кислородным запросом*. Но органы кислородного снабжения инерционны и они не могут быстро удовлетворить

кислородный запрос. Поэтому образуется *кислородный долг*. Обычно в общем кислородном долге различают две фракции: алактатную и лактатную. Первую связывают с ресинтезом АТФ и с восполнением израсходованных кислородных резервов организма (рис. 11). Эта часть кислородного долга оплачивается очень быстро (не более чем за 1-1,5 мин.) Вторая фракция отражает окислительное устранение лактатов (молочной кислоты). Ликвидация лактатной фракции кислородного долга происходит более медленными темпами (от нескольких минут до полутора часов).

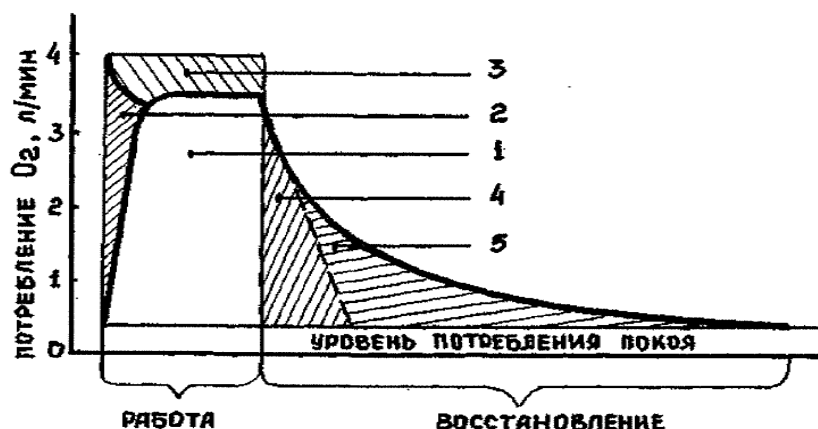


Рис.11. Схематическое изображение: кислородный запрос и его составляющие (1-аэробная, 2-алактатная, 3-гликолитическая) и кислородный долг и его составляющие (4-алактатная, 5-лактатная) (Н.И.Волков) [13]

Оценка физической работоспособности при помощи нагрузочного тестирования

Три основных подхода к оценке физической работоспособности:

Таблица 4.1. Подходы к оценке работоспособности

Условное название	Основные измеряемые характеристики
Эргометрический	Время (t), Мощность (W), Работа (A)
Физиологический	ЧСС, МПК, АП, PWC170, МКД
Энергетический	Мощность (W) и Емкость (E) 3-х источников энергии

Не существует и принципиально не может существовать единый тест, позволяющий оценить все энергетические параметры всех трех источников энергии. Даже измерить мощность и емкость одного источника в одном тесте невозможно. Дело в том, что мощность нагрузки, определяющая активацию

того или иного источника энергии, и ее предельная длительность, отражающая емкость активного источника, связаны между собой нелинейной зависимостью. Для измерения максимальной мощности того или иного источника мы можем использовать либо нарастающую нагрузку, либо фиксированное время выполнения нагрузки с оценкой средней (либо пиковой) мощности произведенной работы. В обоих случаях одновременное измерение максимальной емкости источника невозможно: в первом случае – из-за кумулятивного эффекта нарастающего утомления, во втором – по определению, так как экспериментатор сознательно ограничивает время выполнения работы и регистрирует ее объем. Если же мы измеряем емкость, то вынуждены задавать фиксированную мощность, иначе неясно, емкость какого именно источника мы измеряем. В этом проявляется своеобразный физиологический «принцип неопределенности», сходный по своей сути с аналогичным принципом квантовой физики. Точно так же, как по законам квантовой механики невозможно одновременно измерить массу и скорость движения элементарной частицы, так же и в мышечной физиологии невозможно одновременно измерить предельную мощность и емкость активного источника энергии. Осознание этого важнейшего фундаментального положения важно для правильной трактовки получаемых результатов.

В табл. 10 представлены основные тесты и показатели, используемые сегодня для оценки различных сторон работоспособности. Следует подчеркнуть, что наиболее разработанными являются тесты для измерения аэробной мощности и экономичности циклической аэробной работы. Все остальные тесты разработаны значительно в меньшей степени, а трактовка их результатов порой вызывает серьезные споры среди специалистов. Так, например, весьма популярным показателем в спортивной практике является максимальный уровень лактата в периферической крови. Между тем этот показатель зависит от множества факторов, и его прямолинейная трактовка вызывает серьезные возражения авторитетных ученых.

Таблица 10. Тесты и показатели для оценки мощности, емкости и экономичности энергетических источников при циклической мышечной работе

Источник	Мощность	Емкость	Экономичность
Аэробный	МПК PWC170 АП ЧСС _{макс} W900	–	Ватт-пульс Пульсовая стоимость единицы работы Кислородная стоимость единицы работы
Лактаcidный	Вингейтский тест Тест Tornval Е. W240 W40	МФ МКД Максимальная концентрация лактата в крови Тест удержания критической мощности Коэффициент <i>K</i> уравнения Мюллера	Гарвардский степ-тест ИНПД
Фосфагенный	Лестничный тест Margaria Тест MAM W _{max}	БФ МКД	ИНПД
Расшифровка сокращений	МПК – максимальное потребление кислорода PWC170 – мощность нагрузки, при которой пульс достигает 170 уд./мин АП – анаэробный порог ЧСС_{макс} – максимальная частота сокращений сердца W40 – мощность циклической работы, которую человек способен поддерживать в течение 40 с (рассчитывается с помощью уравнения Мюллера на основании результатов двух циклических тестов на предельное время удержания нагрузки в двух разных зонах мощности), примерно соответствует верхней границе зоны субмаксимальной мощности W240 – мощность циклической работы, которую человек способен поддерживать в течение 240 с, примерно соответствует верхней границе зоны большой мощности W900 – мощность циклической работы, которую человек способен поддерживать в течение 900 с, примерно соответствует верхней границе зоны умеренной мощности W_{max} – мощность циклической работы, которую человек способен поддерживать в течение 1 с, примерно соответствует MAM MAM – максимальная анаэробная мощность в циклическом упражнении МФ МКД – медленная (лактаcidная) фракция максимального кислородного долга БФ МКД – быстрая (алактаcidная) фракция максимального кислородного долга ИНПД – интенсивность накопления пульсового долга		

MAM — максимальная анаэробная мощность в циклическом упражнении;

МФ МКД — медленная (лактаcidная) фракция максимального кислородного долга;

БФ МКД — быстрая (алактаcidная) фракция максимального кислородного долга;

ИНПД — интенсивность накопления пульсового долга.

Анализ эргометрических зависимостей показывает, что увеличение мощности энергетической системы на 20–30% приводит к 5–10-кратному повышению емкости. По этой причине показатели емкости, если их удастся измерить, оказываются не только намного чувствительнее, но и значительно информативнее, чем показатели мощности.

Любое воздействие, которое предполагается оказывать на организм, в том числе тренировочное, должно быть тщательно соизмерено с его реальными функциональными возможностями, с уровнем развития тех функций организма, на которые будет в первую очередь направлено воздействие. Это – одна из причин, почему столь необходимы точные, корректные и адекватные средства контроля за динамикой работоспособности.

Эргоспирометрическое тестирование

Тестирование аэробных способностей спортсмена в условиях лаборатории можно условно разделить на прямое и косвенное. Прямым и наиболее информативным тестом для оценки аэробной способности спортсмена является максимальный нагрузочный тест с газоанализом в режиме реального времени (эргоспирометрия). Работа выполняется до отказа спортсмена от ее продолжения.

Целью эргоспирометрии является получение информации о работе кардиореспираторной системы. Это осуществляется посредством непрерывной регистрации и анализа выдыхаемого воздуха по легочным объемам, а также поглощенным и выделяемым газам (O_2 и CO_2) в процессе выполнения испытуемым физической нагрузки. Анализ изменений этих показателей позволяет определить общую физическую работоспособность, аэробную и анаэробную производительность организма, анаэробный порог и другие параметры, позволяющие прогнозировать долгосрочную функциональную активность и разрабатывать рекомендации по коррекции тренировочных нагрузок.

В практике спортивных тестирований эргоспирометрию чаще всего проводят с целью определения МПК, ПАНО и других показателей газообмена при выполнении максимальных нагрузочных тестов. Для этой цели используют велоэргометрическую нагрузку под контролем ЭКГ ступенчатоповышающейся мощности «до отказа», с длительностью каждой ступени 3 мин. (для достижения стабилизации регистрируемых показателей), мощность нагрузки рассчитывают исходя из массы тела спортсмена - 1 Вт на кг.

Большинство из показателей, которые могут быть получены в ходе эргоспирометрического максимального нагрузочного теста, являются неинвазивными (за исключением определения концентрации лактата, рН и др.) и могут быть проведены в современной функционально-диагностической лаборатории. Выполняемый тест позволяет исследователю: а) количественно оценить ограничение выполняемой нагрузки; б) оценить адекватность функционирования различных компонентов в единстве легочного и клеточного газообмена; в) определить систему органов, лимитирующую выполнение нагрузки; г) установить O_2 , при котором возникает ограничение выполнения работы.

Исследование газообмена проводится ежеминутно в состоянии покоя - 3 мин. (Baseline), во время работы (Exercise) и в течение 10 минут восстановительного периода (Recovery) с регистрацией показателей газообмена с текущей и последующей компьютерной обработкой в виде таблиц и графиков.

В процессе тестирования регистрируются основные показатели газообмена: число дыханий в минуту (RR), дыхательный объем (TV), кислородный пульс (O_{2puls}), потребление кислорода (VO_2), потребление кислорода на 1 кг массы тела (VO_2/kg), вентиляция легких (VE), выделение углекислого газа (VCO_2), дыхательный коэффициент (RQ), вентиляционный эквивалент (VEO_2). В протокол тестирования включены показатели,

регистрируемые электрокардиографом и велоэргометром: ЧСС (HR), АД сист. (SBP), АД диаст. (DBP), мощность нагрузки в Вт (work).

До начала тестирования рассчитываются ряд должных индивидуальных величин, предусмотренных программой газоанализа, исходя из антропометрических данных обследуемого, возраста, пола. Рассчитывается индивидуальное должное МПК ($\text{VO}_{2\text{max}}$), потребление кислорода в покое (REST VO_2), «идеальная» масса тела (PRED WT kg), рекомендуемое потребление ккал в день (KCAL/DAY), максимально допустимый пульс (HR_{max}).

Общепризнанным критерием оценки физической работоспособности является потребления кислорода в условиях максимальной мышечной нагрузки. При этом максимальной принято считать нагрузку такой мощности, повышение которой уже не сопровождается ростом потребления кислорода, то есть нагрузку, исчерпывающую резервы организма по снабжению работающих мышц источниками энергии.

Для оценки аэробной работы, выполняемой спортсменом на практике, часто используется уровень максимального потребления кислорода (МПК) и показатель анаэробного порога (ПАНО).

Максимальное потребление кислорода представляет собой наивысший лимит утилизации O_2 и является одним из важнейших показателей физической формы или аэробной тренированности; выражается в мл/мин и мл/мин/кг. Он обычно предопределен максимальным сердечным выбросом, содержанием O_2 в крови, фракцией распределения сердечного выброса в работающие мышцы и возможностью экстракции мышцами O_2 .

Анаэробный порог с позиций физиологии может быть обозначен как уровень потребления кислорода, при котором аэробное производство энергии дополняется анаэробным энергопроизводством, что отражается повышением уровня лактата и соотношения лактат/пируват в мышце и артериальной крови, а продукция АТФ путем анаэробного гликолиза дополняет аэробное производство АТФ.

Без прямой регистрации потребления кислорода методы оценки аэробной работоспособности считаются косвенными. Среди них можно выделить:

- а) стендовые максимальные тесты без газоанализа;
- б) стендовые субмаксимальные тесты (например, тест PWC 170 и др.);
- в) полевые тесты (например, тест Купера, челночный тест и др.).

В максимальных нагрузочных тестах без газоанализа уровень МПК рассчитывается по формулам, исходя из мощности выполненной максимальной нагрузки. В процессе выполнения этих тестов может регистрироваться ряд физиологических параметров, таких как ЧСС и уровень лактата на каждой ступени и реакция артериального давления (АД) на нагрузку, по окончании теста и в восстановительном периоде.

Регистрация электрокардиограммы и уровня лактата на каждой ступени нагрузки и в восстановительном периоде, с измерением показателей АД по окончании нагрузки.

Можно сопоставлять показатели с мощностью выполняемой нагрузки, определять уровень анаэробного порога и в последующем использовать полученные параметры для контроля за тренировочным процессом.

Перед выполнением теста испытуемый выполняет 10-минутную разминку. Испытуемый надевает монитор сердечного ритма, который выполняет запись ЧСС каждые 5 с. Спортсмен начинает выполнять работу на велоэргометре с ЧСС 120 уд/мин. Мощность работы задается индивидуально по ЧСС, частота педалирования 70–80 об/мин сохраняется на протяжении всего испытания. Минутный объем дыхания определяется при помощи спирографа. Мощность, а следовательно и пульсовая интенсивность работы, повышается каждые 2 мин на 5 уд/мин. Спортсмен выполняет работу до отказа. Каждые 2 мин фиксируется среднее ЧСС и вентиляция легких на данной ступени. Предполагается, что достижению МПК соответствует мощность нагрузки, при которой прекращается дальнейший рост ЧСС, значительно падает до величины аэробного и анаэробного порогов

определяются по методике (Conconi и др., 1982) при помощи линейных уравнений в программе Microsoft Excel с применением метода V-slope.

В среднем МПК у лиц с разным физическим состоянием составляет от 2,5 ...4,5 л/мин, а у спортсменов в циклических видах спорта - 4,5 ...6,5 л/мин.

Кислородное обеспечение нагрузки и физическая работоспособность при спироэргометрии анализируются по следующим параметрам:

- Время работы (T) мин.
- Объем выполненной работы (A_{ob}) – кг-м
- Объем выполненной работы на 1 кг веса ($A_{ob/kg}$) – кг-м/кг
- Максимальная мощность выполненной нагрузки (W_{max}) - Вт
- Критическая мощность (W_{cr}) - Вт
- PWC170 – кг-м
- Максимальное потребление кислорода (VO_{2max}) - мл/мин
- Максимальное потребление кислорода на 1 кг ($VO_{2/kg}$) - мл/кг
- Кислородная стоимость работы определяется как суммарное потребление кислорода во время всей нагрузки, потраченное на выполнение 1 кгм работы (O_{2i}/A) - мл/кг-м
- Максимальная легочная вентиляция (VE_{max}) - л/мин
- Дыхательный коэффициент (RQ)
- Общий кислородный долг - дополнительное потребление кислорода в послерабочем периоде по сравнению с уровнем покоя (O_2D) - л/мин
- Общий кислородный долг на 1 кг (O_2D/kg) - мл/кг
- Кислородный долг на единицу выполненной работы (O_2D/A) - мл/кг-м
- ЧСС в покое, макс, на 5 и 10 мин. восстановления ($Ps_{bas, max, 5', 10'}$)
- АД в покое, макс, на 5 и 10 мин. восстановления ($SBP/DBP_{bas, max, 5', 10'}$)

Способов измерения работоспособности существует много, причем каждый из них пригоден для ее измерения в одной или двух соседних зонах мощности (табл. 11).

Таблица 11. Способы дозирования тестовой физической нагрузки

№ пп	Способ дозирования нагрузки	Единицы измерения нагрузки	Измеряемые показатели
1	Абсолютный уровень мощности нагрузки	Ватты, кГм/мин, м/с или другие величины, характеризующие интенсивность работы	Время выполнения или объем выполненной работы, уровень реакции физиологических показателей — ЧСС, потребление кислорода и т. п., а также объем функциональных затрат на восстановление — кислородный и пульсовой долг, уровень лактата в крови
2	Абсолютный уровень объема работы	Дж, кГм, <i>метры</i> или другие вели- чины, характери- зующие <i>объем</i> ра- боты	Средняя развиваемая мощность, уровень реакции физиологических показателей — ЧСС, потребление кислорода и т. п., а также физиологические сдвиги в процессе и после выполнения нагрузки
3	Стандартная по времени вы- полнения нагрузка	Единицы времени — секунды, минуты, часы	Объем выполненной работы, средняя развиваемая мощность, уровень реакции физиологических показателей — ЧСС, потребление кислорода и т. п., а также физиологические сдвиги в процессе и после выполнения нагрузки
л	Стандартная по объему нагрузка	Единицы объема: Дж, кГм, метры	Время, затраченное на выполнение работы, средняя развиваемая мощность, уровень реакции физиологических показателей — ЧСС, потребление кислорода и т. п., а также физиологические сдвиги в процессе и после выполнения нагрузки
5	Удельный (на 1 кг массы тела) уровень мощности или объема работы	Мощность: Вт/кг кГм/мин/кг Объем: Дж/кг кГм/кг	Уровень реакции физиологических показателей — ЧСС, потребление кислорода и т. п., а также физиологические сдвиги в процессе и после выполнения нагрузки
6	Удельный (на 1 кг массы работающих мышц) уровень мощности или объема работы	Мощность: Вт/кг м. м. кГм/мин/кг м. м. Объем; Дж/кг м. м. кГм/кг м. м.	Уровень реакции физиологических показателей — ЧСС, потребление кислорода и т. п., а также физиологические сдвиги в процессе и после выполнения нагрузки (применяется редко ввиду трудности количественной оценки массы мышц)
7	Относительный уровень мощности нагрузки (для калибруемых дозировочных устройств)	% от МПК, АП, ЧССтах или другого физиологиче- ского параметра	Эргометрические характеристики (время, объем, мощность работы) и физиологические сдвиги в процессе и после выполнения нагрузки
8	Относительный уровень интенсивности нагрузки (для некалибруемых дозировочных устройств)	(в % от макси- мальной силы, быстроты или объема выполни- мой при данной мощности работы)	Эргометрические характеристики (время, объем, мощность работы) и физиологические сдвиги в процессе и после выполнения нагрузки

Усовершенствованная методика тестирования физической работоспособности

Данная методика позволит получить информацию о системной адаптивной реакции организма в единицах мощности/работы.

В качестве объекта мышечной деятельности используется эргометр (велозергометр, ручной, гребной или любой другой работа на котором отражает специфику моделируемой спортивной деятельности), при котором нагрузка изменяется с заданной скоростью по замкнутому циклу - сначала повышается от нуля до определённой (заданной экспериментатором) величины, а затем с такой же скоростью снижается до нуля. В процессе выполнения физической работы регистрируется взаимосвязь изменения частоты сердечных сокращений и мощности выполняемой в виде так называемой петли гистерезиса, которая, представляет собой системный адаптивный ответ организма на возмущающее воздействие.

Схема изменения мощности нагрузочного тестирования и динамики частоты сердечных сокращений на её воздействие представлены на рис. 12.

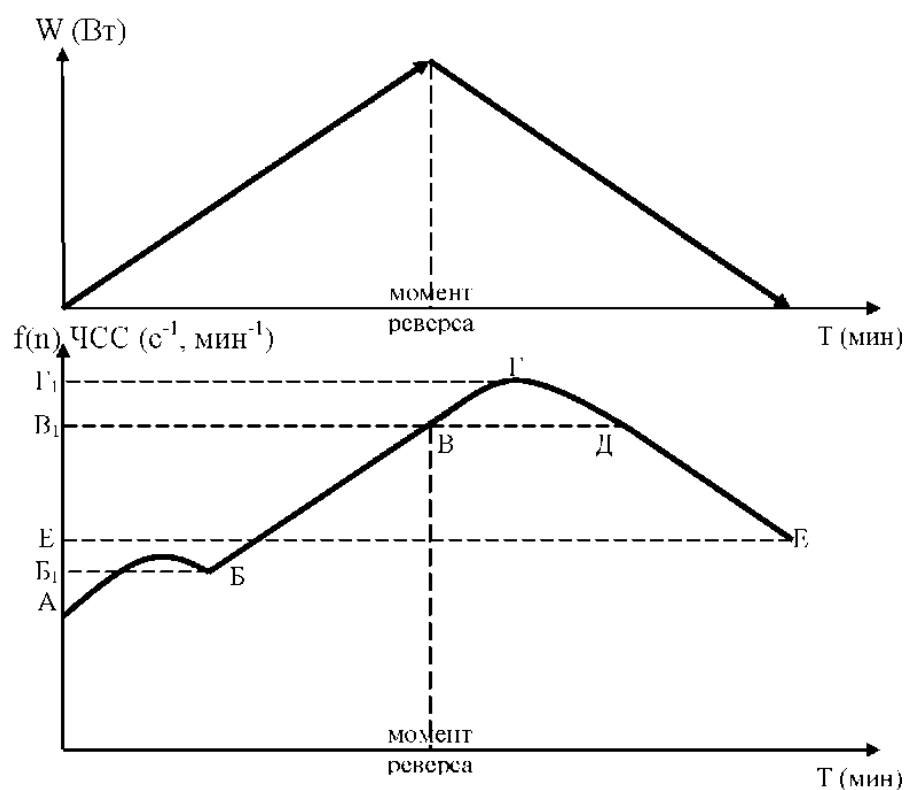


Рис. 12. Динамика мощности выполняемой работы (верхняя часть рисунка) и ЧСС (нижняя часть рисунка) в процессе тестирования.

Регистрация в системе двух координат в течение всего времени тестирования петли гистерезиса в системе координат «величина мощности - значение физиологического параметра» позволяет осуществить фазовый анализ взаимоотношения реакции организма и мощности выполняемой работы (рис. 4.2).

При анализе петли гистерезиса выделяются несколько фаз (диагностических участков) и ряд параметров. Основными фазами петли гистерезиса являются следующие (см. рис. 13).

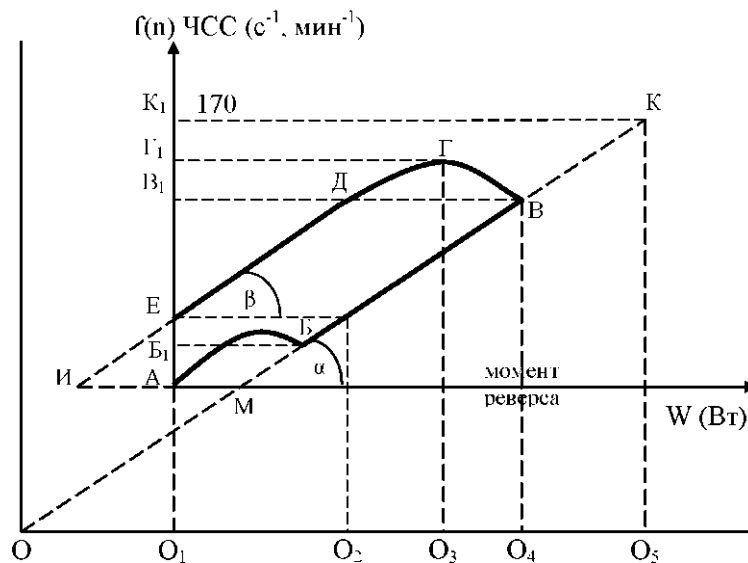


Рис. 13. Запись петли гистерезиса в абсолютной системе координат

При анализе данной экспериментальной зависимости в части, касающейся физического смысла производных от сердечной деятельности, нами построена математическая модель и получено решение:

$$u(t) = C_1 + C_2 \exp(-nt)$$

Поскольку все точки обеих изоакселерационных фаз БВ и ДЕ характеризуются постоянством изменения регистрируемого физиологического параметра при изменении мощности выполняемой работы, то очевидно, что площадь, ограниченная петлёй гистерезиса, будет соответствовать «внутренней работе» организма в процессе тестирования. По графическому изображению петли гистерезиса можно определить ряд показателей, характеризующих особенности мобилизации функциональных

резервов организма в процессе срочной адаптации к физической работе, а также показателей общей физической работоспособности.

Показатели, характеризующие функциональную пробу

1. Скорость изменения мощности выполняемой работы (V , Вт/с). Представляет собой постоянную величину, равную 0,55Вт/с (33Вт/мин).
2. Мощность реверса ($W_{рев.}$, Вт). Этот показатель будет характеризовать функциональную пробу в том случае, если момент реверса заранее планируется по значению мощности выполняемой работы (например, 230Вт).
3. Значение регистрируемого физиологического параметра (например, ЧСС=150 мин⁻¹) при реверсе ($f_{рев.}$, мин⁻¹). Этот показатель будет характеризовать функциональную пробу в том случае, если реверс планируется по значению регистрируемого физиологического показателя.

Показатели напряжения организма по частоте сердечных сокращения

1. Исходное значение регистрируемого физиологического параметра ($f_{исх.}$, мин⁻¹). На рисунке - точка А.
2. Пороговое значение регистрируемого физиологического параметра ($f_{порог.}$, мин⁻¹). На рисунке - точка Б₁. Этот параметр характеризует начало изоакселерацион- ной нагрузочной фазы и, как правило, он весьма стабилен и относительно независим от его значения, регистрируемого перед выполнением работы
3. Значение регистрируемого физиологического параметра в момент реверса ($f_{вых.}$, мин⁻¹). На рисунке - точка В₁.
4. Максимальное значение регистрируемого физиологического параметра ($f_{макс.}$, мин⁻¹). На рисунке - точка Г₁.
5. Значение регистрируемого физиологического параметра в момент окончания работы ($f_{вых.}$, мин⁻¹). На рисунке - точка Е.
6. Среднее значение регистрируемого физиологического параметра за весь период выполняемой работы (f , мин⁻¹).

Показатели эффективности мобилизации резервов

1. Скорость перераспределения напряжения организма в процессе полного цикла работы (V_1 Вт/с). Определяется площадью петли гистерезиса (на рисунке - площадь АБВГДЕА) и указывает на уровень мобилизации функциональных резервов организма в процессе выполнения функциональной пробы.

2. Скорость перераспределения напряжения организма в переходный период (V_2 , Вт/с). Определяется площадью ВГДВ.

3. Время инерции ($T_{ин.}$, с) - время, в течение которого после реверса ещё наблюдается повышение значения регистрируемого физиологического параметра. Определяется отношением O_3O_4 (Вт) к V (Вт/с) и указывает на время инерционности регуляторных механизмов.

4. Коэффициент инерции ($K_{ин}$). Определяется отношением $f_{рев.к} f_{макс.}$.

5. Коэффициент скорости перераспределения интенсивности мобилизации функциональных резервов организма ($K_{пер}$). Представляет собой частное от деления V_2 на V_1 .

6. Коэффициент эффективности регуляции организма ($K_{эфф.}$) - отношение времени инерции к общему времени функциональной пробы.

7. Максимальная скорость перераспределения интенсивности мобилизации функциональных резервов организма в переходный период ($V_{2макс.}$, Вт/с). Определяется аналогично предыдущему показателю, но в отношении к переходному периоду.

8. Коэффициент эффективности использования функциональных резервов при повышении мощности выполняемой работы (R_1) - $\cos\alpha$.

9. Коэффициент эффективности использования функциональных резервов при снижении мощности выполняемой работы (R_2) - $\cos\beta$.

Показатели энергетического уровня организма
(уровня активации, напряжения, функционирования)

1. Внешняя работа (E), соответствующая нормированному значению физиологического параметра (например, одному сердечному сокращению)

при возрастании мощности ($E_{1вн.}$, Дж). Представляет собой котангенс угла α (на рисунке - отношение OO_4 к O_1B_1).

2. Внешняя работа, соответствующая нормированному значению физиологического параметра (например, одному сердечному сокращению) при окончании работы ($E_{2вн.}$, Дж). Представляет собой котангенс угла β (на рисунке - отношение IA к AE).

3. Уровень напряжения организма перед нагрузкой ($W_{пред.}$, Вт). На рисунке определяется отрезком OO_1 .

4. Уровень напряжения организма в момент реверса ($W_{1рев.}$, Вт). Определяется на рисунке отрезком OO_4 .

5. Уровень напряжения организма в момент прекращения физической работы ($W_{вых.}$, Вт). Характеризуется значением отрезка OO_2 .

6. Максимальный уровень напряжения организма ($W_{макс.}$, Вт). Характеризуется половиной длины петли (указывает на наибольший уровень напряжения организма, которое он может развить при данных условиях работы).

7. Прирост уровня напряжения организма под влиянием выполнения функциональной пробы (ΔW_1 , Вт). Представляет собой разность между $W_{макс.}$ и $W_{рев.}$ (на рисунке $OO_2 - OO_1$).

8. Расход уровня напряжения организма на нагрузку (ΔW_2 , Вт). Представляет собой разность между $W_{макс.}$ и $W_{рев.}$ (характеризует величину энергии, которая пошла на внутреннюю работу).

9. Коэффициент полезного действия мобилизации функциональных резервов организма (КПД, %). Определяется отношением O_1O_4 к половине длины петли (характеризует физиологическую цену выполненной физической работы).

10. Резерв уровня функциональных резервов организма в покое (ΔW_3 , Вт). Определяется на рисунке отрезком AM .

11. Резерв уровня функциональных резервов организма при окончании физической работы (ΔW_4 , Вт). Определяется на рисунке отрезком

ИА. Как и предыдущий показатель характеризует уровень адаптированности организма.

Показатели общей физической работоспособности

Если момент реверса мощности работы задается её определенной величиной, то в этом случае показателем общей физической работоспособности выступает PWC_{170} (Вт), который на рисунке будет равен разности отрезков O_1O_5 и O_3O_4 . Отрезок O_3O_4 отражает инерционность регуляции.

Если момент реверса осуществляется по достижению определенного значения регистрируемого физиологического параметра, то показателями общей физической работоспособности кроме PWC_{170} будет являться $W_{рев.}$, общее время выполнения работы (отношение отрезка $O_1O_4O_1$ к V), а также объем выполненной внешней механической работы.

Как указывалось выше, момент реверса мощности выполняемой работы может осуществляться либо при достижении запланированной величины мощности, либо при достижении определенного значения регистрируемого физиологического параметра.

Описанный метод может эффективно использоваться при оценке специфики адаптированности организма спортсмена к физической нагрузке и воздействию на него различных факторов среды.

Математическая модель, описывающая динамику получения и расхода энергии в процессе мышечной работы различной направленности

Временные характеристики зависимостей мощности механизмов энергетического обеспечения должны быть постоянны для каждого механизма (интервалы времени разворачивания, "плато" и времени снижения мощности постоянны для каждого механизма).

Так как рассматриваемая модель энергетического обеспечения физической работы индивидуальна, отпадает необходимость измерения мощности в принятых физических единицах. Для измерения мощности и емкости

лучше всего подходят производные педагогического контроля скорость и время. В качестве единицы измерения индивидуальной мощности можно принять величину куба скорости в плавании $(\text{м/с})^3$ или скорость для бега в легкой атлетике (м/с) . Тогда емкость механизмов будет выражена в $(\text{м}^3/\text{с}^2)$ для плавания и в (м) для бега. Еще удобнее в качестве единицы измерения мощности принять максимальную креатинфосфатную мощность за 100%. В этом случае емкость механизма энергообеспечения будет измеряться в «проценти-секундах» (%-с).

При анализе временных соотношений развертывания, удержания и снижения мощности вследствие истощения энергоресурса, приводимых в литературе для разных источников энергетического обеспечения выяснилось, что рассматриваемые интервалы времени хорошо согласуются с отношением 1:1:2. Однако данные временные соотношения выполняются только при адекватном экстремальном использовании того или иного энергоресурса. Например, превышение гликолитической мощности при определении временных параметров углеводно-аэробного источника энергетического обеспечения может существенно исказить приводимое соотношение.

Таблица 12. Характеристики модельных механизмов энергетического обеспечения

Показатели	Механизмы энергетического обеспечения			липидно-аэробный
	креатин-фосфатный	гликоли-тический	углеводно-аэробный	
Время развертывания, с	~ 3	~ 22	~ 720	~1400
"Плато", с	~ 3	~ 22	~ 720	~ 1400
Время снижения мощности, с	~ 6	~ 44	~ 1440	~2800
Предельное время работы, с	~ 12	~ 88	~ 2880	~5600
Емкость на 1% мощности, %-с	~ 12,4	~ 90,6	~2966,5	~5933,0

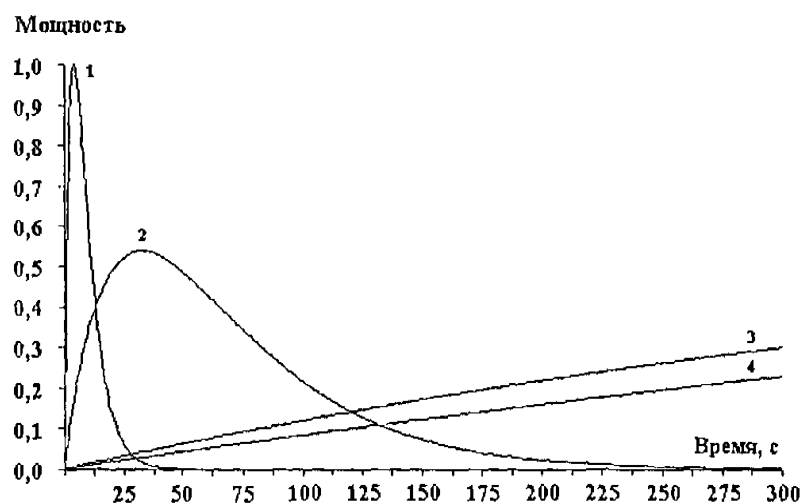


Рис. 14. Пример относительных мощностей основных источников энергетического обеспечения (1 - креатинфосфатного, 2 - гликолитического, 3 - аэробно-углеводного, 4 - аэробно-липидного) в первые 300 с работы.

Параметры механизмов энергетического обеспечения для рассматриваемой модели приведены в таблице 12, а примерный вид кривых мощностей источников обеспечения энергией и их взаимное расположение приведены на рис. 14-15.

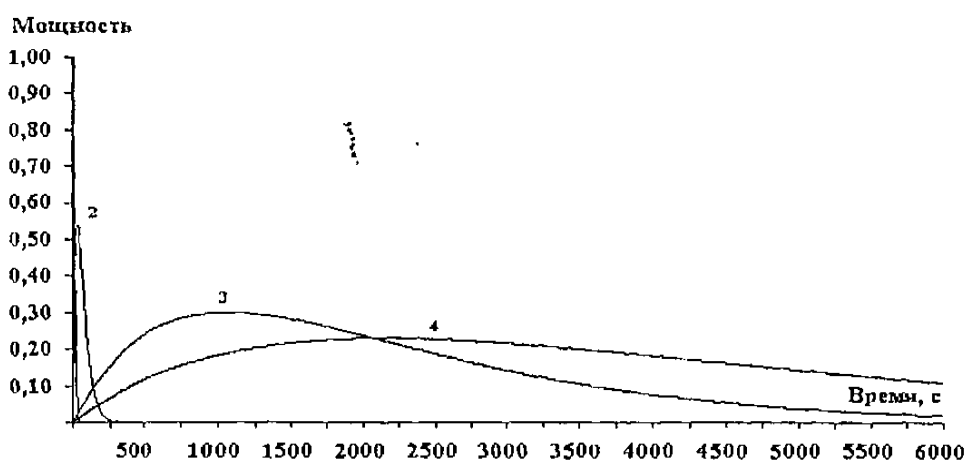


Рис. 15. Пример относительных мощностей основных источников энергетического обеспечения (2 - гликолитического, 3 - аэробно-углеводного, 4 - аэробно-липидного) в первые 6000 с работы.

Алгоритм математической модели мониторинга энергообеспечения

Алгоритм модели энергетического обеспечения физической деятельности состоит из пяти блоков.

Первый блок модели рассчитывает модельные нормированные на единицу характеристики источников энергетического обеспечения на

основании временных соотношений развертывания механизма, плато мощности и спада мощности механизма за счет исчерпания энергоресурса (табл. 12).

Второй блок модели вводит скорость преодоления дистанции (задается величиной мощности на дистанции) и результаты тестирования механизмов энергетического обеспечения спортсмена на дистанции (скорости преодоления тестовых дистанций). Исходные данные модели определяются в процессе ежедневного индивидуального педагогического контроля.

В третьем блоке рассчитывается мощность и емкость каждого механизма энергетического обеспечения на основании результатов тестирования. Емкость и мощность источников энергетического обеспечения вычисляются индивидуально и нормированы по максимальной мощности креатинфосфатного механизма.

В четвертом блоке производится вычисление развертывания механизмов энергетического обеспечения, уровней удерживаемой мощности каждого из механизмов энергетического обеспечения, а также вычисляется взаимодействие источников обеспечения энергией при заданном уровне мощности.

Пятый блок модели выводит результаты моделирования в виде таблиц и графиков, определяющих емкость и мощность источников обеспечения энергией в момент времени от начала работы. Кроме того, возможен пересчет полученных результатов в дистанционную скорость, а также определение вклада каждого из механизмов энергетического обеспечения в дистанционную скорость в каждый момент времени.

Тестирование модели взаимодействия механизмов энергетического обеспечения проводилось по двум направлениям: а) проверка модели методами педагогического контроля; б) использование средств биохимического контроля. После проведения тестовых упражнений по данным педагогического контроля определялись характеристики модели, а

затем проверялись ее прогностические возможности при определении дистанционной скорости в ходе тренировок или соревнований.

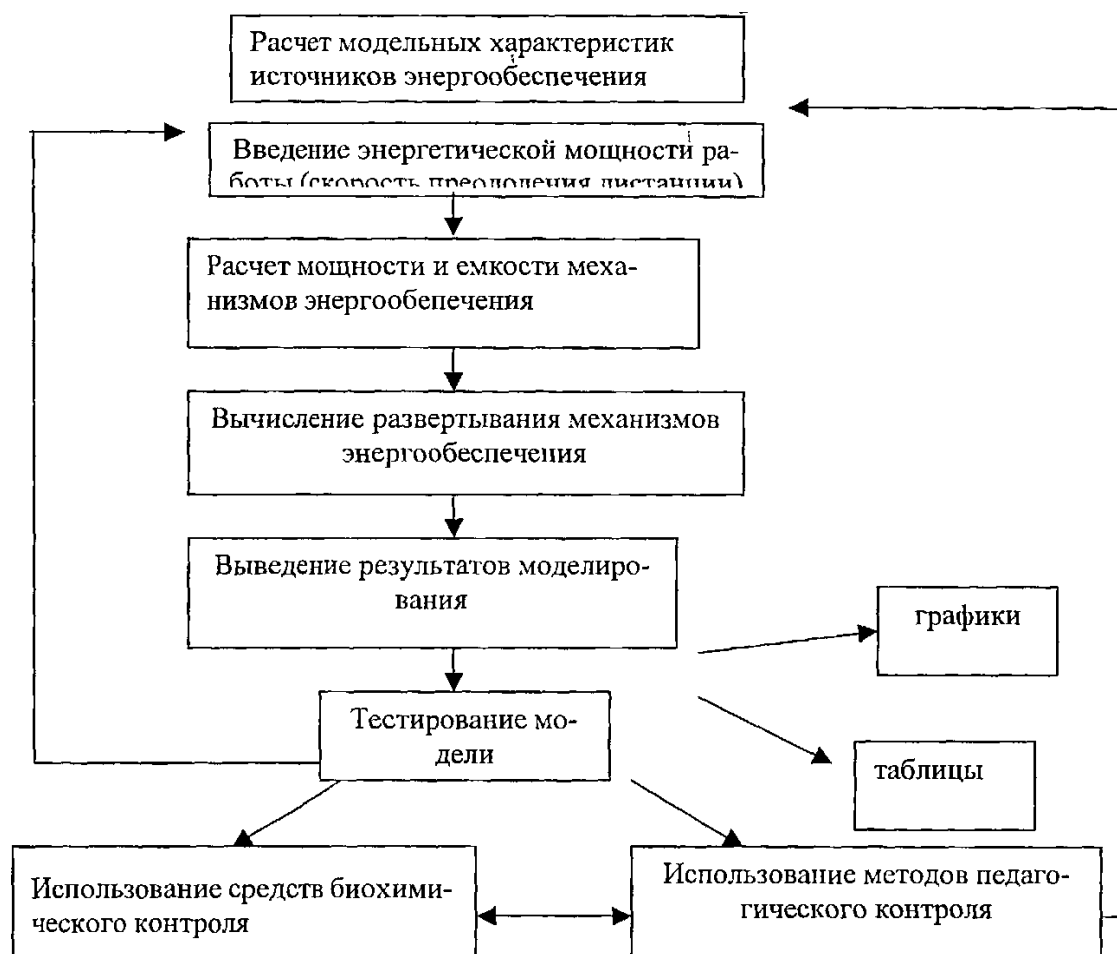


Рис.16. Алгоритм экспертно-прогностической модели мониторинга энергообеспечения:

Представленная модель адекватна при глобальной мышечной работе умеренной, большой и субмаксимальной относительной мощности, выполняемой спортсменами разного возраста в нормальных климатических условиях. Область ограничений модели включает в себя все множество ситуаций, в которых ресурсы энергетических систем утрачивают роль основного лимитирующего фактора механической производительности (в том числе: внешняя гипертермия, нарушения коронарного кровотока, локальная мышечная работа).

Величину мощности или емкости моделируемых энергетических механизмов можно интерпретировать как уровень развития механизма энергетического обеспечения.

Проведенный математический анализ показал, что гармоничное соотношение мощностей рассматриваемых источников энергетического обеспечения (креатинфосфатного, гликолитического, аэробно-углеводного и аэробно-липидного) приблизительно определяется соотношением:

$$100: 56: 32: 28(4:3:2:1).$$

Первый тип соотношений характеризуется небольшим отличием между гликолитической и аэробными мощностями, что соответствует хорошей утилизации продуктов распада анаэробных механизмов энергетического обеспечения.

Другой тип соотношений отличается существенно большей разницей между гликолитической и аэробными мощностями, что соответствует низкому уровню аэробной мощности. Наблюдается значительно меньшее отличие между креатинфосфатной и гликолитической мощностью. Создается впечатление, что гликолитическая мощность искусственно увеличена. Такой тип соотношения мощностей, предположительно, должен наблюдаться у спортсменов, применяющих анаболические стероиды.

Из приведенного анализа становится вполне понятной и та опасность, которая подстерегает спортсменов со вторым типом соотношения мощностей механизмов энергетического обеспечения (если даже они и не применяют анаболические препараты): продукты распада гликолиза (пировиноградная, молочная кислоты), выделяющиеся в количествах больших, чем способен утилизировать цикл Кребса, приводят к ацидотическому (оксидативному) стрессу. С одной стороны, такой стресс вызывает перекисное окисление липидов клеточных мембран, что приводит к ряду заболеваний. С другой стороны, сам ацидотический стресс может стать причиной летального исхода, как, например, при диабетической гипергликемической кетоацидотической коме. Поэтому использование педагогического контроля в комплексе с вычислением относительных мощностей основных механизмов энергетического обеспечения могут стать одним из простейших методов медицинского контроля в спортивной деятельности.

На основании изучения влияния истощающих физических нагрузок у спортсменов в базовом периоде подготовки разработана шкала констелляции зон энергообеспечения и концентрации метаболитов в моче (таблица 13. Определение метаболитов неинвазивно (все показатели определяются в моче) и позволяют получить интегральные характеристики изменения обмена под влиянием физических нагрузок).

По данным таблицы 13 можно определить, что для аэробной и анаэробной зон энергообеспечения характерны отличающиеся концентрации метаболитов и на этом основании можно достаточно точно определить степень истощения механизма энергообеспечения. В частности, и тренер и спортивный врач истощение емкости углеводного энергообеспечения могут определить по появлению отсутствовавших ранее кетоновых тел в моче, а появление в моче ПВК — будет свидетельствовать о достижении высшего уровня углеводно-анаэробной нагрузки в циклических видах спорта.

Таблица 13. Шкала констелляции зон энергообеспечения и концентрации метаболитов в моче

	Определяемые показатели (в моче)				
	Белок	ПВК	Кетоновые тела	Глюкоза	Ph
Порог аэробного обмена (ПАО)	отр. или следы (до 0,3 ммоль/л)	отр. или следы	-	-	6,8-7,0
Порог анаэробного обмена 1 (ПАНО1)	+ (++) (0,3-1,0 ммоль/л)	+	Следы (до 1,5 ммоль/л)	Следы	6,5-6,8
Порог анаэробного обмена 2 (ПАНО2)	++ (+++) (1,0-3,0 ммоль/л)	++	+ (++) (1,5-3,0 ммоль/л)	Следы	6,2-6,5
Максимальное потребление кислорода (МПК)	+++ (++++) (3,0-10,0 ммоль/л)	+++ (++++)	++ (+++) (3,0-7,5 ммоль/л)	до 0,75%	6,1-6,2
Анаэробный гликолиз	+++ (++++)	+++ (++++)	++ (+++)	до 1,0%	6,1 и ниже

Возможна оптимизация программ спортивной подготовки с применением методов математического моделирования.

Наименьшее количество переменных в тренировке может быть сведено к трем интегральным показателям: **мощность** тренировочных упражнений

N , Вт, определяемая по скорости (м/с) и интенсивности (%), **объем упражнений**, определяемый по выполненной работе (A , Дж), длине дистанций (м, км), количеству повторений (n) и времени упражнений (t , с, мин, ч), **время отдыха** между тренировками (T , мин, ч, сутки).

Для практического использования рекомендуется рациональная номенклатура показателей, служащих маркерами состояния энергетических систем, которую целесообразно применять при медико-биологическом контроле за спортсменами группы выносливости.