

УДК 796.01:612

**МЕТОДИКА ОЦЕНКИ МОБИЛИЗАЦИИ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ РЕЗЕРВОВ ОРГАНИЗМА ПО ЕГО РЕАКЦИИ НА ДОЗИРОВАННУЮ НАГРУЗКУ**

*Дмитрий Николаевич Давиденко, доктор биологических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный политехнический университет (СПбГПУ),*

*Геннадий Викторович Руденко, кандидат педагогических наук, доцент,*

*Санкт-Петербургский государственный горный институт имени Г.В. Плеханова (СПбГГИ),*

*Владимир Анатольевич Чистяков, доктор педагогических наук, профессор,*

*Национальный государственный университет физической культуры,*

*спорта и здоровья имени П.Ф. Лесгафта, Санкт-Петербург,*

*(НГУ им. П.Ф. Лесгафта, Санкт-Петербург),*

*Ким Джон Кил, доцент,*

*Университет Энг-Ин (Сеул, Южная Корея)*

**Аннотация**

В статье описывается методика оценки мобилизации функциональных резервов организма при тестировании физической работоспособности по замкнутому циклу изменения мощности работы.

**Ключевые слова:** тестирование, функциональные резервы, петля гистерезиса, мощность, частота сердечных сокращений, регуляция, работоспособность.

**METHODOLOGY OF THE ESTIMATION OF MOBILIZATION OF ORGANISM FUNCTIONAL RESERVES BASED ON ITS REACTION TO THE DOSED LOADS**

*Dmitry Nikolaevich Davidenko, the doctor of biological science, professor,*

*St.-Petersburg State Polytechnical University,*

*Gennady Viktorovich Rudenko, the candidate of pedagogical sciences, senior lecturer,*

*The St.-Petersburg State College of Mines named after of G.V. Plehanov,*

*Vladimir Anatolevich Chistjakov, the doctor of pedagogical sciences, professor,*

*The Lesgaft National State University of Physical Education, Sport and Health,*

*St.-Petersburg,*

*Kim John Kil, senior lecturer,*

*University Eng-In (Seoul, South Korea)*

**Annotation**

The article depicts the technique of the estimation of mobilization of functional reserves of an organism under the testing of physical working capacity on the closed cycle of change of capacity of work.

**Keywords:** testing, functional reserves, hysteresis loop, capacity, heart rate, regulation, working capacity.

Задачей исследования явилась совершенствование методики тестирования физической работоспособности, позволяющей получить информацию о системной адаптивной реакции организма в единицах мощности/работы, основа которой строится на оригинальной идее, высказанной Г.М. Яковлевым, В.П. Андриановым и Н.К. Лесным [1].

В качестве объекта мышечной деятельности используется педалирование на велоэргометре, 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, по нашему мнению, представляет собой системный адаптивный ответ организма на возмущающее воздействие.

Порядок тестирования следующий.

Испытуемый после закрепления на его теле электрокардиографических электродов садится на седло велоэргометра (типа КЕ-II ВНР) и адаптируется к такой обстановке в течение 5 минут. Затем производится регистрация исходных показателей состояния организма (например, ЧСС). По команде испытуемый начинает педалирование. Для равномерного изменения (с заданной скоростью) мощности используется электромеханическая приставка к велоэргометру, позволяющая автоматически осуществлять изменение мощности нагрузки и её реверс в требуемый момент времени, а также подачу пропорционального этому изменению электрокардиографического сигнала на один из входов двухкоординатного самописца. Мощность внешней нагрузки сначала возрастает от нуля с заданной скоростью (0,55 Вт/с или 33 Вт/мин) до мощности 230 Вт, а затем с этой же скоростью снижается до нулевого значения мощности. При этом общее время работы составляет 836 с, а объём выполняемой (общей) внешней работы – 96,18 кДж.

Схема изменения мощности нагрузочного тестирования и динамики частоты сердечных сокращений на её воздействие представлены на рис. 1.

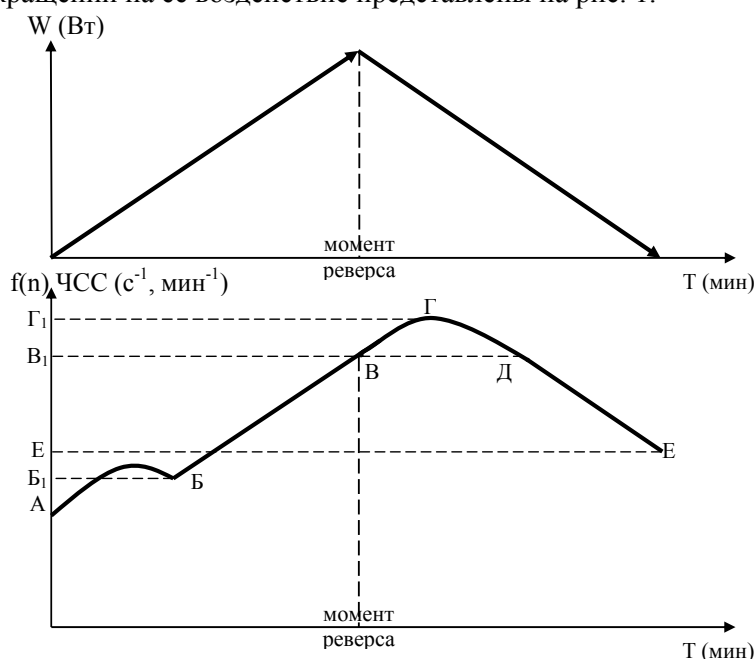


Рис. 1. Динамика мощности выполняемой работы (верхняя часть рисунка) и ЧСС (нижняя часть рисунка) в процессе тестирования.

Следует иметь в виду, что момент переключения мощности на её снижение (реверс) может задаваться либо по значению самой мощности (например, 230 Вт), либо по значению непрерывно регистрируемого физиологического параметра (например, ЧСС = 150 мин<sup>-1</sup>).

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. 2).

При анализе петли гистерезиса выделяются несколько фаз (диагностических участков) и ряд параметров. Основными фазами петли гистерезиса являются следующие (см. рис. 2).

1. Гетероакселерационная переходная фаза вработывания в виде начального участка АБ петли гистерезиса, являющаяся наиболее вариабельным показателем, характеризующим аperiodический процесс вработывания организма в ответ на равномерно изменяющуюся по мощности физическую работу. Вариабельность участка АБ

обусловлена исходным состоянием организма.

2. Изоакселерационная фаза соответствует линейному участку БВ петли гистерезиса, характеризующему постоянство прироста значения физиологического показателя (это может быть частота сердечных сокращений или уровень потребления кислорода) в ответ на прирост мощности. Котангенс угла наклона этого линейного участка к изолинии ( $\text{ctg}\alpha$ ) является индивидуальной характеристикой использования функциональных резервов организма и зависит от специфик адаптированности обследуемого.

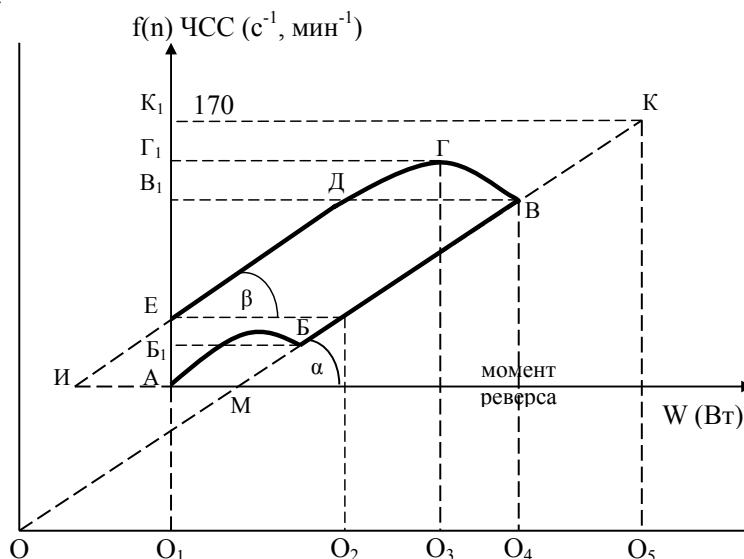


Рис. 2. Запись петли гистерезиса в абсолютной системе координат (пояснение в тексте)

3. Гетероакселерационная переходная фаза восстановления соответствует участку ВД петли гистерезиса и отражает динамику использования функциональных резервов организма на начальном этапе равномерного снижения мощности выполняемой работы. На этом участке петли гистерезиса отражается инерционность регуляторных и энергетических процессов организма. Участок ВГ может иметь различную протяженность, конечная точка которой характеризует максимальное значение регистрируемого физиологического параметра во время выполнения физической работы ( $f_{\text{макс}}$ ).

4. Изоакселерационная фаза снижения мощности выполняемой работы соответствует участку ДЕ петли гистерезиса и характеризует постоянство изменения регистрируемого физиологического параметра при снижении мощности работы. Котангенс угла наклона участка ДЕ к оси «Х» ( $\text{ctg}\beta$ ) является индивидуальной характеристикой функционального состояния организма человека и зависит от скорости восстановления метаболических процессов, величины выполняемой работы и степени адаптированности организма.

При анализе данной экспериментальной зависимости в части, касающейся физического смысла производных от сердечной деятельности, нами было предпринято построение математической модели [2] и показано, что наилучшую аппроксимацию кривых дают решения уравнения вида:

$$u''(t) + 2nu'(t) + n^2u(t) = C \times W(t), \text{ где}$$

$u(t)$  – нормированная ЧСС,  $C$  – нормирующий множитель.

$W(t)$  – мощность.

С формальной точки зрения, это уравнение описывает поведение некоей биологической системы, на вход которой подается внешняя нагрузка  $W(t)$ . Решение этого уравнение известно, элементы, образующие систему, являются идентичными, и спектральное представление их передаточной функции имеет вид:  $1/(\omega+n)$ . Данной пере-

доточной функции соответствует уравнение первого порядка:  $u' + nu = A$ , где  $A$  – некоторая константа. Решение этого уравнения есть  $u(t) = C_1 + C_2 \exp(-nt)$  – это уравнение хорошо известно в ферметативной кинетике и носит название уравнения Михаэлиса-Ментен, и с успехом применяется при аппроксимации сокращения одиночной мышцы (уравнение Хилла) и в качестве калибровочной функции для биосенсоров различного вида.

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. Если бы организм не был вынужден совершать внутреннюю работу, нисходящая часть петли должна бы совпасть с восходящей частью петли. Сама петля представляет собою производную мобилизации функциональных резервов адаптации организма от мощности выполняемой работы, тогда как её площадь – вторую производную этой мобилизации [1].

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. При этом следует иметь в виду принятое нами допущение, выражающееся в возможности представления петли гистерезиса в абсолютной системе координат. Основанием для такого допущения служит предположение о том, что уровень интенсивности функционирования организма линейно зависит от мощности внешней выполняемой работы, что подтверждается выявленной изоакселерационной фазой и наличием линейной адекватной модели, описанной выше.

Все показатели тестирования сгруппированы логически и подтверждены проведенным на ЭВМ кластерным анализом. Выделяются следующие показатели тестирования.

#### **I. 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 ( $W_{\text{рев.}}$ , 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<sup>-1</sup>) при реверсе ( $f_{\text{рев.}}$ , мин<sup>-1</sup>). Этот показатель будет характеризовать функциональную пробу в том случае, если реверс планируется по значению регистрируемого физиологического показателя.

#### **II. Показатели напряжения организма по частоте сердечных сокращения**

1. Исходное значение регистрируемого физиологического параметра ( $f_{\text{исх.}}$ , мин<sup>-1</sup>). На рис. 2 – точка А.

2. Пороговое значение регистрируемого физиологического параметра ( $f_{\text{порог.}}$ , мин<sup>-1</sup>). На рисунке – точка Б<sub>1</sub>. Этот параметр характеризует начало изоакселерационной 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 ( $f_{\text{рев.}}$ , мин<sup>-1</sup>). На рисунке – точка В<sub>1</sub>.

4. Максимальное значение регистрируемого физиологического параметра ( $f_{\text{макс.}}$ , мин<sup>-1</sup>). На рисунке – точка Г<sub>1</sub>.

5. Значение регистрируемого физиологического параметра в момент окончания работы ( $f_{\text{вых.}}$ , мин<sup>-1</sup>). На рисунке – точка Е.

6. Среднее значение регистрируемого физиологического параметра за весь период выполняемой работы ( $f_{\text{ср.}}$ , мин<sup>-1</sup>).

### **III. 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 ОЗО4 (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 ( $R_2$ ) –  $\cos\beta$ .

### **IV. 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  $\alpha$  (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  $\beta$  (на рисунке – отношение ИА к АЕ).

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 ( $\Delta W_1$ , Вт). Представляет собой разность между  $W_{вых.}$  и  $W_{пред.}$  (на рисунке  $OO_2 - OO_1$ ).

8. Расход уровня напряжения организма на нагрузку ( $\Delta W_2$ , 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 ( $\Delta W_3$ , Вт). Оп-

ределяется на рисунке отрезком АМ.

11. Резерв уровня функциональных резервов организма при окончании физической работы ( $\Delta W_4$ , Вт). Определяется на рисунке отрезком ИА. Как и предыдущий показатель характеризует уровень адаптированности организма.

#### **V. 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 (произведение средней мощности работы на общее время 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. Наиболее адекватным при тестировании лиц, явно отличающихся по уровню адаптированности, следует считать использование второго варианта, так как в этом случае физиологическая цена нагрузки будет одинаковой для всех категорий тестируемых лиц. Для сопоставления результатов тестирования в этом случае учитывается величина выполненной внешней механической работы, для чего значения всех показателей, зависящих от объема выполненной работы (длина, площадь петли и производные от их значений), относятся к величине выполненной работы.

Разрабатывая описываемую методику оценки системной реакции организма, нами были проведены синхронные записи петель гистерезиса частоты сердечных сокращений и показателей газообмена (потребление кислорода и выделение углекислого газа), что дало возможность провести корреляционный анализ изучаемых показателей. Результаты анализа показали, что подавляющее большинство параметров петли гистерезиса сердечной деятельности с высокой степенью коррелирует с параметрами петли гистерезиса газообмена ( $r=0,80-0,97$ ), что указывает, по меньшей мере, на общие механизмы, которым подчиняется динамика упомянутых физиологических показателей. В то же время интеркорреляционный анализ показал, что описанные выше параметры петли гистерезиса почти не связаны друг с другом (коэффициенты корреляций не превышают 0,3), что указывает на их самостоятельную информативность и возможность с их помощью оценки различных сторон системной мобилизации функциональных резервов организма при мышечной деятельности.

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

#### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Яковлев, Г.М. Новый методический подход в исследовании адаптации системы кровообращения к циклической физической нагрузке / Г.М. Яковлев, В.П. Андрианов, Н.К. Лесной // Характеристика функциональных резервов спортсмена. – Л., 1982. – С. 83-88.

2. Чистяков, В.А. Математическая модель оценки резервов адаптации организма к мышечной деятельности / В.А. Чистяков, Д.Н. Давиденко // Вестник Балтийской Педагогической Академии. – Вып. 41. – 2001. – С. 45-47.

**Контактная информация:** [dnd1814dnd@mail.ru](mailto:dnd1814dnd@mail.ru)