

Исследование динамики высоких физических нагрузок с помощью компьютерного тестирования и методов математического моделирования¹

А.В. Гусев, Ю.Б. Котов, Э.Г. Орджоникидзе, В.И. Павлов, И.А. Эсселевич

Аннотация. Рассмотрена возможность применения методов математического моделирования при оценке работоспособности человека в условиях высоких нагрузок. В качестве примера использованы данные игроков премьер лиги России по футболу.

Введение

Поведение организма человека в условиях предельных физических нагрузок представляет большой интерес для различных сфер человеческой деятельности. Для того, чтобы выполнять свои обязанности, люди, работающие в таких условиях, например, космонавты, летчики и спасатели, должны обладать хорошей физической подготовкой. Организм спортсмена адаптируется к высоким (иногда близким к предельным) физическим нагрузкам, в связи с чем изменяется и его физиология.

Например, у спортсменов, занимающихся видами спорта, требующими выносливости, частота сердечных сокращений в покое составляет от 30 до 60 ударов в минуту, а у лиц, не занимающихся физической культурой и спортом, от 60 до 80 ударов в минуту. Под воздействием высоких физических нагрузок подвергается перестройке сердечная мышца (как, впрочем, и вся сердечно-сосудистая система), что приводит к формированию так называемого

«физиологического спортивного сердца». Являющийся в России основоположником термина «спортивное сердце» Г.Ф. Ланг (1936 г.) так описал изменения сердечно-сосудистой системы у спортсменов: «У тренированных физкультурников, как правило, наблюдается значительное замедление пульса, кровяное давление отчетливо понижено в среднем миллиметров на 20, обнаруживается небольшое увеличение сердца». У большинства спортсменов, особенно в видах спорта, требующих выносливости, объем сосудистого русла увеличен за счет развитой сети капилляров. У них обычно увеличен объем циркулирующей крови. Эти свойства позволяют спортсмену выполнять нагрузки большей амплитуды, интенсивности и продолжительности и противостоять связанным с этими нагрузками изменениям физиологических параметров. Так, если физически малоактивный человек расходует в день, в среднем, 1500-2000 ккал, то у спортсменов в дни подготовки и состязаний этот показатель может достигать 10000-12000 ккал. Интенсивность, с которой

¹ Работа поддержана грантом РФФИ № 07-01-00376а.

выполняется работа, может вызывать повышение температуры тела у атлета до 39°C , в то время как у здорового и физически неактивного человека даже при выполнении тяжелой работы температура тела редко превышает 37°C . У не занимающегося спортом человека во время гипертонического криза систолическое артериальное давление редко превышает 250-280 мм рт.ст., а при рывке штанги у подготовленного спортсмена на пике нагрузки может достигать 480 мм рт. ст. Одна из наиболее стабильных констант человеческого организма, рН крови, в норме равная 7.4, при максимальных и продолжительных нагрузках у профессиональных спортсменов может кратковременно опускаться до 7.0 (в справочниках по внутренним болезням говорится о том, что значения рН крови менее 7.2 несовместимы с жизнью). Таким образом, спортивная медицина имеет ярко выраженную специфику и требует особых подходов и методов исследования.

Для определения состояния здоровья спортсмена и уровня его работоспособности применяются процедуры нагрузочного тестирования. Показатели аэробной физической работоспособности являются одними из важнейших в игровых видах спорта. В особенности это касается футбола – спорта номер один в мире. Во время футбольного матча по меньшей мере 90% энергии футболиста производится аэробным путём; за 90 минут матча игрок пробегает около 10 км с интенсивностью, близкой к анаэробному порогу (80-90% от максимальной частоты сердечных сокращений). От игрока в матче требуется большая выносливость, за это время он выполняет до тысячи действий секундной длительности [1], что требует высоких показателей аэробного метаболизма. При нагрузочном тестировании футболистов (эргоспирометрии) обычно используются два показателя – уровень анаэробного порога и максимальное потребление кислорода.

Цель данной работы - установление основных закономерностей индивидуальной динамики потребления кислорода в процессе стандартного максимального тестирования при выполнении ступенчато возрастающей нагрузки с постоянной скоростью на каждой ступени для спортсменов, специализирующихся в игро-

вых видах спорта, на примере футболистов высокого класса.

1. Материалы и методы

Стеновому тестированию подвергнуты футболисты-мужчины Российской премьер-лиги, 21 человек. Средние возрастные и морфометрические показатели игроков: возраст – 24 ± 4 года, рост – 180 ± 6 см, вес – 77 ± 6 кг.

Испытание проводили с использованием эргоспирометрической установки Oxycon Alpha фирмы Jaeger (Германия) (Рис.1).



Рис. 1. Эргоспирометрическая установка Oxycon Alpha

В тесте использовался стандартный протокол проведения испытаний:

- разминка: бег со скоростью 5 км/час при уровне подъема дорожки 0.2 (отношение высоты подъема к длине дорожки) в течение 5 минут;
- основная нагрузка: начальная скорость бега – 7 км/час, уровень подъема дорожки 0.2 (постоянный в течение всего исследования); возрастание скорости бега при переходе к следующей ступени на 1.5 км/час, длительность каждой ступени 2 мин.

Перед началом испытаний проводилась объемная калибровка волюметра и калибровка газоанализаторов газовыми смесями со стандартными концентрациями кислорода и углекислого газа.

Согласно [2,3] в качестве критериев достижения максимального потребления кислорода могут быть приняты:

1. наличие «выполживания» (выхода на плато) кривой зависимости уровня потребления кислорода от времени тестирования при нарастающей нагрузке;

2. увеличение частоты сердечных сокращений до 95% от максимума, рассчитываемого по формуле $(220 - \text{возраст})$ уд/мин»;

3. возрастание дыхательного коэффициента (отношение выделенного объема углекислого газа к объему потребленного кислорода) до 1.4;

4. достижение концентрации лактата капиллярной крови свыше 7 ммоль/л.

Тестирование может быть прекращено при выполнении хотя бы одного из перечисленных критериев. Кровь из пальца для определения уровня лактата брали у тестируемых спортсменов на 3-ей минуте после прекращения нагрузки, четвертый критерий не мог быть применен для определения момента завершения тестирования и использовался для верификации. Вторым критерий связан с опасностью достижения частоты пульса, близкой к максимальной. Поэтому он рассматривался лишь как лимитирующий фактор. В соответствии с [3] уровень потребления кислорода от времени выходит на плато, а выделение углекислого газа продолжает расти. Их отношение, дыхательный коэффициент, также растет и может превысить значение 1.4, то есть выполнится третий критерий. Максимальным значением дыхательного коэффициента при аэробном метаболизме считается 1, выполнение третьего критерия говорит о существенной доле анаэробного метаболизма, который приводит к закислению мышечной ткани и утомлению мышц. Иногда это происходит раньше выхода на плато уровня потребления кислорода. Напомним, что первый критерий плохо формализован, поэтому *в статье рассмотрены только результаты тестов, остановленных по третьему критерию.*

Данные, полученные в ходе эксперимента, были преобразованы в базу данных формата (.dbf), имеющую открытую конструкцию и допускающую обработку непосредственно в про-

граммах анализа данных. Для работы с полученной базой использовался специализированный пакет программ обработки, главным образом, калькулятор произвольных формул и графический иллюстратор, а также методы аппроксимации и непараметрической статистики [4,5].

2. Результаты исследования и их обсуждение

Как известно, изменение параметров газообмена (объем выделяемого в минуту углекислого газа и объем потребляемого в минуту кислорода, а также дыхательный коэффициент) у спортсменов в процессе увеличения нагрузки имеет возрастающий характер.

При беге и ходьбе выполняется значительная работа по вертикальному перемещению массы тела и, следовательно, при прочих равных условиях (одинаковой скорости передвижения), чем больше вес спортсмена, тем больше совершаемая им работа (потребление кислорода). Поэтому в таких видах спорта, как легкоатлетический бег, спортивная ходьба, лыжные гонки, максимальные аэробные возможности спортсмена правильнее оценивать по максимальному потреблению кислорода, отнесенному к массе тела [6]. В этой работе потребление кислорода в расчете на килограмм массы тела (далее будем обозначать его ОПК), рассматривается как основной показатель состояния спортсмена.

На Рис.2. приведен график нагрузки и относительного потребления кислорода для спортсмена с номером num = 1 по времени. Масштаб каждого из показателей указан множителем около соответствующей оси (например, *100 для времени, т.е. вся шкала 0-700 с). Каждому измерению соответствует точка на графике. Видно, что потребление кислорода в ходе выполнения эксперимента растет, но темпы роста со временем уменьшаются.

Нами были опробованы различные аппроксимации кривой потребления кислорода:

$$\text{ОПК} = a * \ln(\text{ВРЕМЯ}) + b \text{ (логарифмическая)} \quad (1)$$

$$\text{ОПК} = a/(\text{ВРЕМЯ}-b) + c \text{ (гиперболическая)} \quad (2)$$

$$\ln(\text{ОПК}) = a * \ln(\text{ВРЕМЯ}) + b \text{ (степенная)} \quad (3)$$

Здесь \ln – натуральный логарифм, a , b и c – параметры.

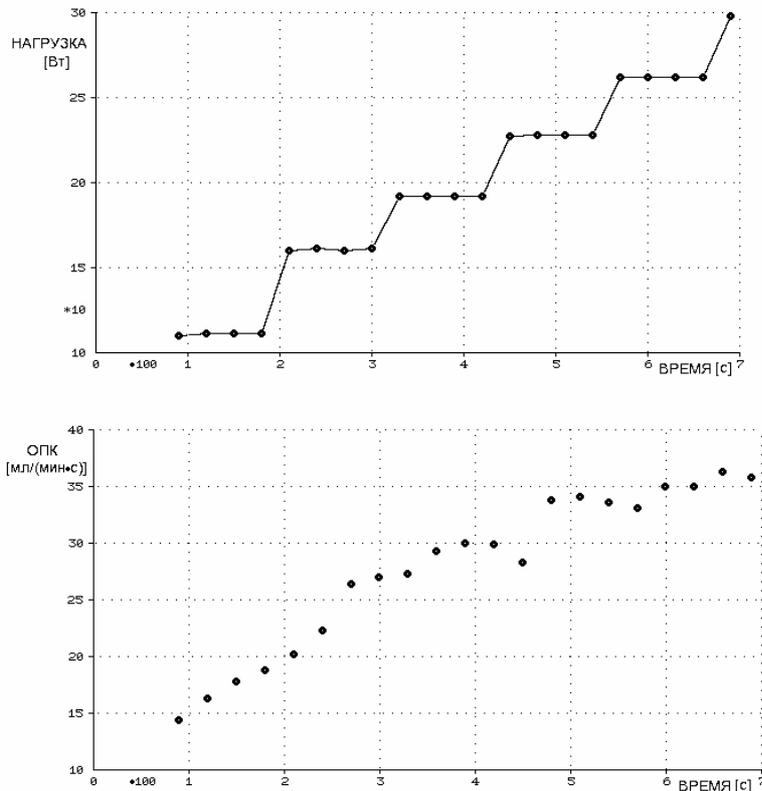


Рис.2. Динамика нагрузки и относительного потребления кислорода в ходе стендового тестирования одного из спортсменов (НОМЕР=1)

На Рис.3 представлены результаты аппроксимации методом наименьших квадратов динамики потребления кислорода на килограмм массы тела для спортсмена с num=1. По оси абсцисс – время (time, [с]), по оси ординат – потребление кислорода на килограмм (ОПК, [мл/(мин*кг)]). Кружки соответствуют эмпирическим измерениям, а непрерывные линии – аппроксимирующим кривым. Для логарифмической аппроксимации $a = 11.7$, $b = -40.3$, $R^2 = 0.979$ (квадрат коэффициента корреляции), для гиперболической – $a = -6232$, $b = -82.6$, $c = 43.5$, $R^2 = 0.933$, для степенной – $a = 0.477$, $b = 0.51$, $R^2 = 0.9996$. Близкие к 1 значения R^2 для говорят о том, что эти кривые хорошо приближают эмпирическую зависимость.

Такие аппроксимирующие кривые были получены для двадцати одного спортсмена, находящихся в исследовании. В Табл.1 представлены распределения R^2 для логарифмической, гиперболической и степенной аппроксимации.

В столбцах содержатся вид аппроксимации, минимум (min), нижний квартиль (q1), медиана (med), верхний квартиль (q2) и максимум (max) значений R^2 для соответствующих видов аппроксимации.

В Табл.2 приведены результаты сравнения распределений R^2 для разных аппроксимаций с помощью критериев Смирнова и Вилкоксона-Манна-Уитни (p – вероятность гипотезы о неотличимости распределений).

Более высокие значения R^2 свидетельствуют, что степенная аппроксимация существенно лучше и гиперболической, и логарифмической, а логарифмическая лучше гиперболической.

Диаграмма распределения коэффициентов a и b для логарифмической аппроксимации приведена на Рис.4, для степенной аппроксимации – на Рис.5. По оси абсцисс отложено значение a , а по оси ординат – b . Каждая точка – пара (a,b) – соответствует одному из спортсменов. Непрерывная линия соответствует линейной регрессии методом наименьших квадратов (для логарифмической регрессии $R^2 = 0.978$, для степенной $R^2 = 0.969$).

Табл. 1. Распределение R^2 для различных видов аппроксимации

Вид аппроксимации	min	q1	med	q2	max
Логарифмическая	0.966	0.970	0.979	0.984	0.992
Гиперболическая	0.320	0.923	0.956	0.983	0.991
Степенная	0.9982	0.9988	0.9994	0.9997	0.9998

Табл.2. Сравнение распределений R^2

Сравниваемые аппроксимации	Критерий Смирнова	Критерий Вилкоксона-Манна-Уитни
Логарифмическая и гиперболическая	$p = 0.003$	$p = 0.009$
Гиперболическая и степенная	$p = 8e-10$	$p = 1.5e-8$
Логарифмическая и степенная	$p = 8e-10$	$p = 1.5e-8$

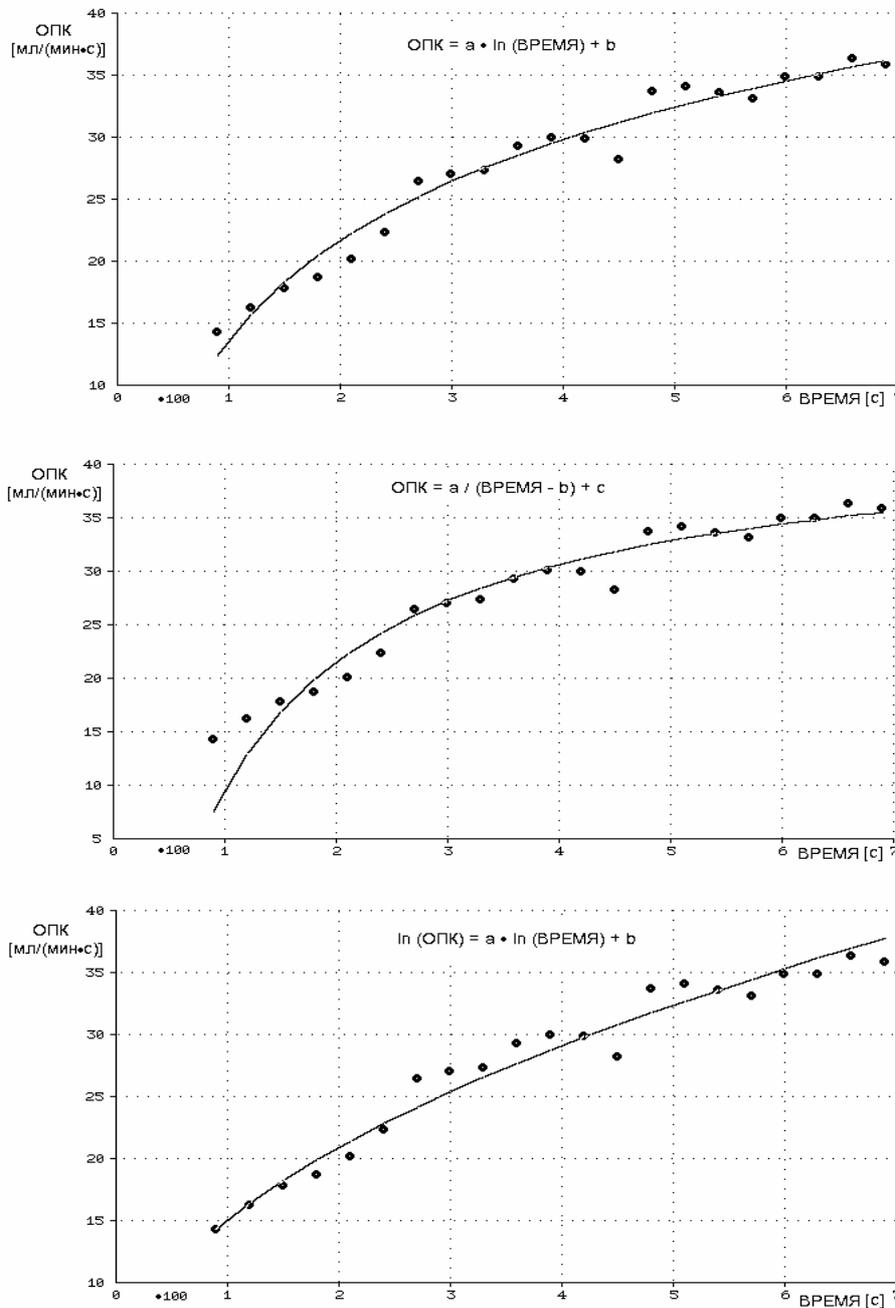


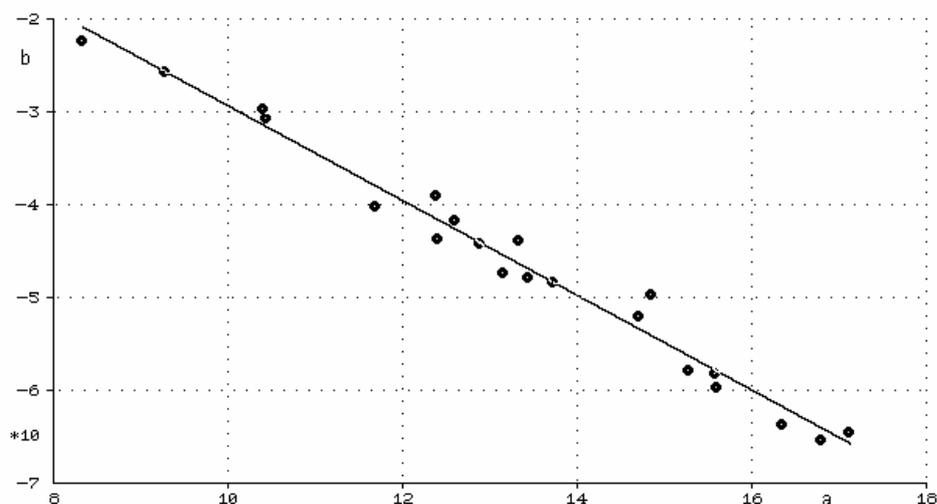
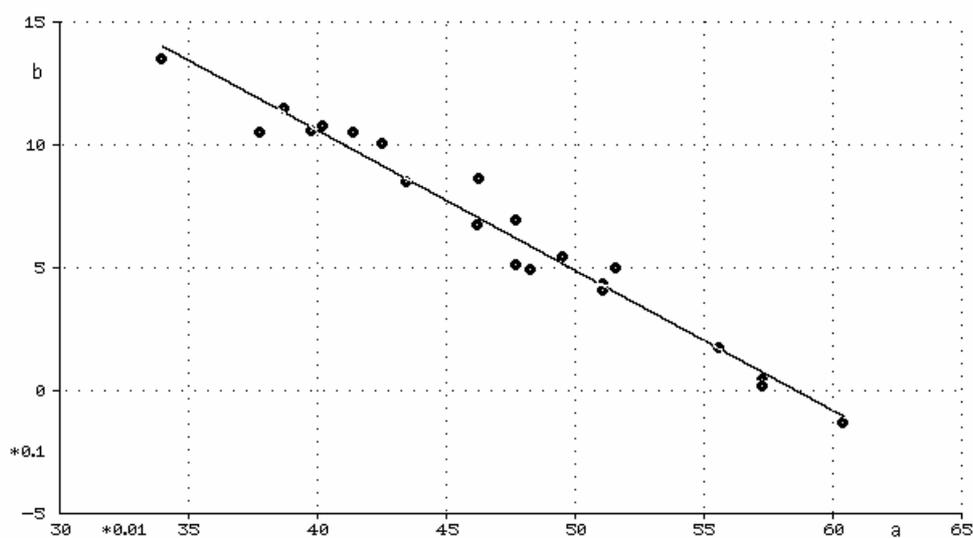
Рис.3. Аппроксимирующие кривые (НОМЕР=1)

Как видим, существует достаточно жесткая связь между параметрами a и b и для логарифмической регрессии ($b = -5.12 * a + 21.8$), и для степенной ($b = -5.7 * a + 3.34$). Таким образом, двухпараметрические кривые (1) и (3) можно преобразовать в однопараметрические, то есть

динамика потребления кислорода на килограмм массы тела для рассмотренных 21 спортсменов качественно происходит по одному и тому же закону и отличается только множителем « a » перед логарифмом (скоростью процесса).

Полученная нами качественная модель динамики относительного потребления кислорода в ходе нагрузочного теста со ступенчатым ростом нагрузки оказалась универсальной, не зависящей от индивидуального состояния организмов спортсменов. Более того, ее можно преобразовать к однопараметрической. Таким образом, открывается возможность построения индивидуальных оценок и прогнозов тренировочных возможностей каждого спортсмена. Понимание возможностей уже полученных моделей на практике требует дальнейшей и скрупулезной совместной работы с медиками и тренерами. Это будет одной из важных тем в последующих работах.

Авторы считают, что проведение дальнейших исследований позволит разработать качественно новые методики индивидуальной оценки работоспособности как спортсменов, так и представителей других специальностей, работающих с предельными физическими нагрузками.

Рис.4. Диаграмма распределения коэффициентов a и b для логарифмической аппроксимацииРис.5. Диаграмма распределения коэффициентов a и b для степенной аппроксимации

Литература

1. Stolen T., Chamari K., Castagna C., Wisloff U. Physiology of soccer. An update. *Sports Med.*, 35 (6); 501-536
2. Карпман В.Л., Белоцерковский З.Б., Гудков И.А. Тестирование в спортивной медицине. М.: Физкультура и спорт, 1988
3. K. Wasserman, Hansen J.E., Sue D.Y. et al. Exercise testing and interpretation // Lippincott Williams&Wilkins 2005
4. Котов Ю.Б. "Новые математические подходы к задачам медицинской диагностики", Москва, УРСС, 2004
5. Стентон Гланц "Медико-биологическая статистика", перевод с английского, Москва, Практика, 1999
6. Коц Я.М. - Спортивная физиология. Учебник для институтов физической культуры. Москва, Физкультура и спорт, 1986.

Авторы выражают глубокую благодарность Ю.П.Попову, Г.Г. Малинецкому, В.В. Самойленко, А.В.Ермакову за понимание и поддержку.

Гусев Алексей Владимирович. Окончил Московский авиационный институт в 1980 году. Кандидат физико-математических наук. Автор более 70 печатных работ. Область научных интересов: аэродинамика, метакомпьютинг, математические подходы в медицине. Старший научный сотрудник Института прикладной математики им. М.В.Келдыша РАН.

Котов Юрий Борисович. Окончил физический факультет МГУ в 1963 году. Доктор физико-математических наук. Автор более двухсот печатных работ. Область научных интересов: математическое моделирование. Старший научный сотрудник ИПМ им. М.В.Келдыша РАН.

Орджоникидзе Зураб Гивиевич. Окончил 3-й московский медицинский институт. Кандидат медицинских наук. Заслуженный врач РФ. Имеет более 80 печатных работ. Область научных интересов: физиология, травматология, спортивная медицина. Директор Московского научно-практического центра спортивной медицины.

Павлов Владимир Иванович. Окончил Смоленскую государственную медицинскую академию в 1997 г. Кандидат медицинских наук. Научная работа отмечена грамотами и наградами спортивных организаций (в частности, Российского футбольного союза - РФС) и Департамента здравоохранения г.Москвы. Автор около 40 печатных работ. Область научных интересов: физиология, биохимия, кардиология, спортивная медицина. Ведущий научный сотрудник Московского научно-практического центра спортивной медицины, заведующий лабораторией функциональной диагностики.

Эсселевич Иван Алексеевич. Закончил Московский физико-технический институт (государственный университет) в 2005 году. Имеет 5 печатных работ. Область научных интересов: математическое моделирование в медицине и физиологии, сложные системы, синергетика. Аспирант ИПМ им. М.В.Келдыша РАН.