

УДК 612.2

## **РАЗРАБОТКА СПОСОБА КОСВЕННОЙ ОЦЕНКИ ПОТРЕБЛЕНИЯ КИСЛОРОДА ЧЕЛОВЕКОМ**

**А.В. Демин**

Институт медико-биологических проблем РАН, Москва

У 7 мужчин посредством газоанализатора, кардиомонитора и велоэргометра зарегистрированы потребление кислорода и вегетативный индекс Кердо во время дозированной физической работы, возрастающей до максимальной. Методы математической биологии применены для установления количественной связи между двумя интегративными характеристиками кардиореспираторной системы здорового человека. Найденные уравнения связи позволяют без применения газоаналитической аппаратуры достаточно точно оценивать индивидуальные количества кислорода, потребляемого при дозированной физической работе, по вегетативному индексу.

**Ключевые слова:** *вычисляемое потребление кислорода, вегетативный индекс Кердо, физическая работа, математические методы.*

**Введение.** Известно [1; 16], что знание количества потребляемого человеком кислорода при разных видах деятельности представляет собой один из важных инструментов исследования жизнедеятельности и работоспособности экипажей герметических объектов, включая космические летательные аппараты (КЛА). Кроме того, знание количества потребляемого экипажем кислорода позволяет наиболее полно определить требования к системам жизнеобеспечения кабин и отсеков гермообъектов [10; 11]. Колебания изменений потребления кислорода на протяжении суток зависят от чередования разных нагрузок на человека, в том числе связаны с постуральными изменениями [19; 21].

Известны разные инструментальные методы оценки потребления кислорода на уровне всего организма [18; 24], однако, применение известных методов определения потребления кислорода подразумевает обязательное наличие газоаналитической аппаратуры, калибровочного оборудования к ней, замену комплектующих, например, датчиков, имеющих ограниченный срок хранения. В свою очередь, калибровочное оборудование включает наличие сосудов под высоким давлением, использование которых согласно содержанию требований норм к безопасности, может быть не допустимо в условиях барокамер и других гермообъектов, включая КЛА. Кроме того, даже просто транспортировка баллонов с калибровочными газами под высоким давлением в труднодоступные места, например, околоземное пространство, сопряжена с высоким риском и является дорогостоящей.

Известно также, что косвенные результаты измерений по точности могут быть не менее точными, чем результаты прямых измерений, например, как в случае непрямой и прямой калориметрии в области нормальной физиологии [18, 24]. Такой подход в естествознании известен и описан [3; 14 и др.]. Поэтому одним из перспективных направлений является изучение взаимосвязи физиологических показателей кардиореспираторной системы человека с целью нахождения косвенных физиологических характеристик.

Цель настоящей работы: разработка нового способа адекватной оценки количества потребляемого кислорода человеком без применения газоаналитической аппаратуры. Задача работы: на основании результатов измерений физиологических характеристик системы кровообращения, системы внешнего дыхания и дозированной физической нагрузки найти аналитические выражения их связи.

**Методика.** В рамках решения задач адаптации человека к физическим нагрузкам при разных условиях окружающей среды в ГНЦ РФ – ИМБП РАН в 2011-2012 гг. проведены серии экспериментов по количественной оценке изменений физиологических характеристик человека, выполняющего разные по интенсивности физические нагрузки при дыхании разными газовыми смесями (эксперимент «Гелий-11, одобренный Биоэтической комиссией института). В нашем исследовании приняли участие 7 практически здоровых мужчин в возрасте 20 – 30 лет. В настоящей работе проанализированы результаты фоновых исследований. Нагрузочное тестирование выполняли с помощью велоэргометра VIA sprint 150P (Erich Jaeger, Германия), в котором возможна регуляция мощности нагрузки. В процессе физической работы проводили измерительный контроль разных физиологических характеристик испытуемых с помощью прибора Innoscor (Innovision, Нидерланды). В рамках поставленной задачи мы располагали результатами измерений потребления кислорода (в STPD) у 7 испытуемых при разных значениях мощностей физических нагрузок, при дыхании атмосферным воздухом. Для каждого испытуемого было выполнено около 400 измерений потребления кислорода. Кроме того, во время физической работы непрерывно измеряли вегетативный индекс Кердо [13; 15; 23] с помощью портативного прибора SOMNO watch™ plus BP (Somnomedics, Германия) [22].

Значения нагрузки задавали на велоэргометре дискретно: 0, 60, 75 Вт и т.д. с шагом 15 Вт продолжительностью в 1 мин. Такой профиль нагрузки, разработанный К. Wasserman с соавт. [25], применяется нами практически во всех исследованиях [6; 8], поскольку позволяет достигнуть значений близких к максимальным [5; 7] и сопоставить их с результатами других исследователей, использующих тот же подход. При каждом из значений нагрузки потребление кислорода измерялось

11–45 раз. При нулевой нагрузке измерение потребления кислорода выполняли 5 мин. При оценке потребления кислорода и индекса Кердо каждого испытуемого на каждой ступени нагрузки использовано среднее арифметическое результатов измерений (табл. 1). Ниже подробно представлены результаты фоновых исследований 7 испытуемых эксперимента «Гелий-11». С использованием известных формул:

$$X_{cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (1)$$

$$S_x^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - X_{cp})^2, \quad (2)$$

$$S_x = \sqrt{S_x^2} \quad (3)$$

$$r_{xy} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - x_{cp})(y_i - y_{cp})}{S_x S_y}, \quad (4)$$

**Результаты и обсуждение.** В целях повышения достоверности численных результатов нами выполнена статистическая проверка гипотез о значениях коэффициентов корреляции. В качестве нулевых гипотез  $H_0$  нами брались гипотезы о равенствах значений вычисленных коэффициентов корреляции истинным значениям. В качестве альтернативных гипотез  $H_1$  – о неравенстве вычисленных значений коэффициентов корреляции их истинным значениям. Аналитически наши нулевые гипотезы и их альтернативы можно записать как  $H_0 : r = r_{xy}, H_1 : r \neq r_{xy}$ . Кроме того, в целях повышения статистической достоверности наших результатов, мы отказались от задавания традиционного значения ошибки первого рода  $\alpha = 0,05$ , не редко принятого достаточным для неотвержения нулевых гипотез. Вместо этого мы предпочли придерживаться рекомендаций, принятых в современном математической статистике. А именно: мы не задавали значения уровня значимости  $\alpha$ , а вычисляли фактически достигаемый уровень значимости [2]. В наших случаях в результате вычислений мы нашли, что уровень значимости был равен 0,2, т.е. гипотезы  $H_0$  не отклонялись и принимаемые нами решения о неотклонении гипотез являлись статистически достаточно достоверными.

Известно [12], что, располагая результатами  $x=[x_1, \dots, x_n]$ ,  $y=[y_1, \dots, y_n]$  численных значений измерений, установленных в процессе опытов, можно записать линейную зависимость между значениями аргумента  $X$  и соответствующей им функцией  $Y$  в виде линейного уравнения регрессии

$$y = y_{cp} + r_{xy} \frac{\sigma_y}{\sigma_x} (x - x_{cp}). \quad (5)$$

Таблица 1  
Усредненные по ступеням нагрузки значения характеристик  
кардиореспираторной системы

Испытатель 1 (И1)			Испытатель 5 (И5)			Испытатель 7 (И7)			Испытатель 6 (И6)		
нагрузка (Вт)	ИК	ПК, л/мин	нагрузка (Вт)	ИК	ПК, л/мин	нагрузка (Вт)	ИК	ПК, л/мин	нагрузка (Вт)	ИК	ПК, л/мин
345	0,54	4,16	255	0,46	3,38	330	0,43	3,80	255	0,46	3,38
330	0,53	4,14	240	0,45	3,14	315	0,42	3,80	240	0,45	3,14
315	0,52	4,01	225	0,44	2,91	300	0,41	3,60	225	0,44	2,91
300	0,51	3,86	210	0,43	2,67	285	0,40	3,40	210	0,43	2,67
285	0,50	3,65	195	0,42	2,55	270	0,39	3,20	195	0,42	2,55
270	0,49	3,58	180	0,39	2,37	255	0,38	3,10	180	0,39	2,37
255	0,45	3,18	165	0,36	2,29	240	0,35	2,80	165	0,36	2,29
240	0,43	3,04	150	0,35	2,04	225	0,33	2,70	150	0,35	2,04
225	0,42	3,01	135	0,33	1,86	210	0,32	2,60	135	0,33	1,86
210	0,41	2,92	120	0,27	1,71	195	0,27	2,40	120	0,27	1,71
195	0,38	2,57	105	0,24	1,49	180	0,25	2,30	105	0,24	1,49
180	0,36	2,41	90	0,22	1,36	165	0,24	2,20	90	0,22	1,36
165	0,35	2,33	75	0,19	1,21	150	0,21	1,90	75	0,19	1,21
150	0,34	2,13	60	0,17	0,86	135	0,18	1,80	60	0,17	0,86
135	0,32	1,88	0	0,02	0,32	120	0,17	1,60	0	0,02	0,32
120	0,29	1,72	90	0,20	1,44	105	0,16	1,50			
105	0,26	1,61	75	0,19	1,26	90	0,15	1,40			
90	0,22	1,44	60	0,16	0,82	75	0,14	1,30			
75	0,18	1,29	0	0,04	0,41	60	0,14	0,87			
60	0,17	0,73				0	-0,25	0,42			
0	-0,14	0,36									
Испытатель 3 (И3)			Испытатель 4 (И4)			Испытатель 2 (И2)					
255	0,71	3,32	240	0,63	3,26	255	0,61	3,35			
240	0,70	3,03	225	0,59	3,04	240	0,59	2,99			
225	0,69	2,95	210	0,57	2,80	225	0,58	2,89			
210	0,68	2,75	195	0,54	2,60	210	0,52	2,63			
195	0,67	2,60	180	0,50	2,40	195	0,50	2,57			
180	0,66	2,30	165	0,48	2,30	180	0,48	2,35			
165	0,64	2,20	150	0,44	2,05	165	0,46	2,19			
150	0,60	1,95	135	0,41	1,89	150	0,42	1,99			
135	0,59	1,78	120	0,37	1,72	135	0,38	1,86			
120	0,58	1,6	105	0,36	1,59	120	0,38	1,77			
105	0,55	1,45	90	0,34	1,45	105	0,37	1,64			
0	0,29	0,3	75	0,33	1,30	90	0,33	1,51			
			60	0,30	0,92	75	0,31	0,86			
			0	0,15	0,31	60	0,12	0,4			
						0	0,05	0,3			

Примечание к таблицам 1,2 и формулам (1-4). ИК – индекс Кердо, ПК – потребление кислорода в которых  $X_i, Y_i$  – взятые из таблиц 1 значения результатов измерений,  $X_{cp}$  – среднее арифметическое значений,

$S^2$  – точечные оценки дисперсий,  $S_x, S_y$  – точечные оценки среднеквадратических отклонений (СКО),

$r_{xy}$  – коэффициенты линейной корреляции (по Пирсону), нами выполнены вычисления. Подробные сведения о вычисляемых характеристиках и их интерпретациях заинтересованный читатель может найти в пособиях [4; 12; 20]. Результаты вычислений помещены в табл. 2. Вычисления выполнены на компьютере с помощью системы символьной математики Derive 5.05 [9; 17].

Выражение (5) в отдельных случаях удобно использовать в дискретной формуле

$$y_i = y_{cp} + r_{xy} \frac{\sigma_y}{\sigma_x} (x_i - x_{cp}), i = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

Таблица 2

Описательная статистика и коэффициенты корреляции

	Испытатель И1	Испытатель И2	Испытатель И3	Испытатель И4	Испытатель И5	Испытатель И6	Испытатель И8
Результатов измерений	n=21	n=14	n=12	n=14	n=19	n=15	n=20
Среднее значение нагрузки	192,86; S <sup>2</sup> =9433,93; S=97,13	158,21; S <sup>2</sup> =3802,16; S=61,66	165; S <sup>2</sup> =4537,5; S=67,36	139,28; S <sup>2</sup> =4417,35; S=66,46	177,6; S <sup>2</sup> =7490,4; S=86,5	147; S <sup>2</sup> =4956; S=73,39	185,25; S <sup>2</sup> =8218,6875; S=90,657
Среднее значение индекса Кердо	0,36; S <sup>2</sup> =0,024; S=0,16	0,4; S <sup>2</sup> =0,016; S=0,126	0,6; S <sup>2</sup> =0,01; S=0,11	0,43; S <sup>2</sup> =0,02; S=0,13	0,315; S <sup>2</sup> =0,015; S=0,12	0,35; S <sup>2</sup> =0,02; S=0,12	0,2525; S <sup>2</sup> =0,023; S=0,153
Среднее значение потребления O <sub>2</sub>	2,57; S <sup>2</sup> =1,22; S=1,1	2,071; S <sup>2</sup> =0,621; S=0,788	2,181; S <sup>2</sup> =0,649; S=0,806	1,97; S <sup>2</sup> =0,64; S=0,8	2,37; S <sup>2</sup> =0,97; S=0,98	2,01; S <sup>2</sup> =0,7; S=0,84	2,33; S <sup>2</sup> =0,91; S=0,9559
Коэффициент корреляции индекса Кердо-потребление O <sub>2</sub>	r=0,94	r=0,980	r=0,94	r=0,994	r=0,993	r=0,971	r=0,92

Нагрузка на испытателей в процессе экспериментов задавалась: 60, 75, 90 Вт. т.е. была известной заранее. В зависимости от значения нагрузки у испытателей изменялись значения индекса Кердо и количество потребления кислорода. Обозначим через  $x_1$  – значение индекса Кердо, через  $x_2$  – количество потребляемого кислорода, через  $y$  – значение нагрузки. Запишем линейную модель зависимости между индексом Кердо и потреблением кислорода в виде функции двух переменных:

$$y = a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_0 \quad (7)$$

Воспользовавшись результатами измерений из табл. 1, применением метода наименьших квадратов нами найдены модели

линейной связи между значением индекса Кердо, величиной нагрузки (Вт) и потреблением кислорода (л/мин). Запишем аналитические выражения найденных нами моделей

$$\left. \begin{aligned} 1) y &= 23,06x_1 + 82,7x_2 - 28,2 \\ 2) y &= 102,7x_1 + 60,63x_2 - 13,2 \\ 3) y &= 88,5x_1 + 72,27x_2 - 47,3 \\ 4) y &= 152,4x_1 + 58,7x_2 - 41,9 \\ 5) y &= 330,9x_1 + 46,2x_2 - 36,06 \\ 6) y &= 114,4x_1 + 67,4x_2 - 24,7 \\ 7) y &= 34,6x_1 + 89,5x_2 - 32,4 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Объединив результаты измерений, воспользовавшись методом наименьших квадратов, мы нашли, что усредненная модель нагрузка–индекс Кердо–потребление кислорода записывается как

$$y = 120,94x_1 + 68,2x_2 - 31,96 \quad (9)$$

Модели (8) являются индивидуальными характеристиками организмов испытателей. Для других испытателей с помощью лабораторных экспериментов, используя метод наименьших квадратов, нужно найти их индивидуальные значения характеристик  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_0$ .

Зная индивидуальную модель испытателя и в других случаях, в которых измерение потребления кислорода не возможно или связано со значительными материальными затратами, потребление кислорода можно вычислить по формуле:

$$x_2 = \frac{y - a_0 - a_1 \cdot x_1}{a_2}, \quad (10)$$

$x_1$  – значение индекса Кердо, через  $x_2$  – количество потребляемого кислорода через  $y$  – значение нагрузки.

Изложенный способ вычисления потребления кислорода применим, в том числе для состояния относительного покоя, в котором нагрузка считается равной нулю. С помощью многомерного критерия Фишера-Снедекора нами выполнена проверка адекватности метода [8]. В результате проверки установлено, что вероятность ошибки метода близка к нулю ( $\approx 10^{-21}$ ). В результате численной апробации моделей в эксперименте «Гелий-11» установлено, что найденные модели являются достаточно точными для их применения при решении задач жизнеобеспечения экипажей КЛА. Найденные модели могут быть применены при решении задач жизнеобеспечения экипажей пилотируемых аппаратов при длительных космических полетах.

### Список литературы

1. *Баранов В.М.* Газоэнергообмен человека в космическом полете и модельных исследованиях. М.: Наука, 1993. 126 с.
2. *Боровков А.А.* Математическая статистика. Оценка параметров. Проверка гипотез. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1984. 472 с.
3. *Бурмистров Г.А.* Основы способа наименьших квадратов. М.: Государственное научно-техническое изд-во литературы по геологии и охране недр, 1963. С.119–208.
4. *Гмурман В.Е.* Теория вероятностей и математическая статистика. 5-е изд. М.: Высшая школа, 1977. 479 с.
5. *Дёмин А.В., Иванов А.И., Орлов О.И.* Методическое пособие по математической физиологии. Ч. 5: Количественная оценка потребления кислорода человеком при физической работе. М.: Фирма Слово, 2012. 20 с.
6. *Дёмин А.В., Иванов А.И., Орлов О.И.* Методическое пособие по математической физиологии. Ч. 6: Количественная оценка влияния действия инертных газов на потребление кислорода человеком при физической работе. М.: Фирма Слово, 2012. 20 с.
7. *Дёмин А.В., Иванов А.И., Орлов О.И.* Методическое пособие по математической физиологии. Ч. 7: Устойчивость модели процесса дыхания – физическая работа. М.: Фирма Слово, 2012. 24 с.
8. *Дёмин А.В., Иванов А.И., Орлов О.И.* Методическое пособие по математической физиологии. Ч. 9: Количественная оценка связи потребления кислорода с тонусом вегетативной нервной системы при физической работе. М.: Фирма Слово, 2013. 22 с.
9. *Дьяконов В.П.* Справочник по системе символьной математики Derive. М.: СКПресс, 1998. 256 с.
10. *Ильюшин Ю.С., Олизаров В.В.* Кислородное оборудование летательных аппаратов и высотное спецснаряжение. М.: Воениздат МО СССР, 1970. 280 с.
11. *Ильюшин Ю.С., Олизаров В.В.* Системы обеспечения жизнедеятельности и спасения экипажей летательных аппаратов. М.: Изд-во ВВИА им. Н. Е. Жуковского, 1972. 491 с.
12. *Калинина В.Н., Панкин В.Ф.* Математическая статистика. М.: Высшая школа, 2001. 336 с.
13. *Кердо И.* Индекс, вычисляемый на основе параметров кровообращения для оценки вегетативного тонуса // Спортивная медицина. 2009. № 1-2. С. 33–43.
14. *Мазмишвили А.И.* Способ наименьших квадратов. М.: Недра, 1968. С. 180–231.
15. *Мызников И.Л., Глико Л.И., Паюсов Ю.А., Шагалова Л.Н., Решетнев В.Г.* Методика контроля за функциональным состоянием моряков. Диагностические индексы и физиологические нагрузочные тесты. Мурманск: Север, 2008. 128 с.

16. Олизаров В.В. Системы обеспечения жизнедеятельности экипажей летательных аппаратов / под ред. В.А. Боднера. М.: Изд-во ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 1962. 13 с.
17. Половко А.М. Математическая система Derive для студента. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 352 с.
18. Физиология человека: в 3-х томах / под ред. Р.Шмидта, Г. Тевса. М.: Мир, 2010. Т. 3. 660 с.
19. Хасис Г.Л. Показатели внешнего дыхания здорового человека. Часть 2. Кемерово. Кемеровское книжное издательство, 1975. 160 с.
20. Чернецкий В.И. Математическое моделирование стохастических систем. Петрозаводск. Изд-во Петрозавод. гос. ун-та, 1994. 488 с.
21. Шанмугам Т.М. Изменение компонентов общей емкости легких в различных позах у человека: автореф. дисс. ... канд. биол. наук. Л., 1971. 24 с.
22. Gesche H., Grosskurth D., Patzak A. A new method for noninvasive blood pressure measurement using pulstransition time // Hipertension and the kidney: abstract. (Non. 29 – Dec. 2. 2007, Vienna). P. 31.
23. Kerdo I. Ein aus Daten der Blutzirkulation kalkulierter Index zur Beurteilung der vegetativen Tonuslage // Acta neurovegetativa. 1966. Bd. 29, №2, S. 250–268.
24. McLean J.A., Tobin G. Animal and Human Calorimetry. Cambridge University Press. 2008. 356 p.
25. Wasserman K., Hansen J.E., Sue D.Y., Stringer W.W., Sietsema K., Sun X.G., Whipp B.J. Principles of exercise testing and interpretation: including pathophysiology and clinical applications. 5 ed. Lippincott Williams and Wilkins, 2012. 572 p.

## DEVELOPMENT OF HUMAN OXYGEN CONSUMPTION INDIRECT ESTIMATION METHOD

**A.V. Demin**

Institute of Medical and Biological Problems RAS, Moscow

In seven men through the gas analyzer, heart monitor and cycle ergometer registered oxygen consumption and vegetative index Kerdo during increasing physical work. Methods of mathematical biology applied to establish a quantitative relationship between the two integrative characteristics of cardiorespiratory sistem of healthy person. Found constraint equations allow without gas analysis equipment sufficiently accurate assess the individual amount of oxygen consumed during the physical work with vegetative index.

**Keywords:** *computed oxygen consumption, Kerdo vegetative index, physical work, mathematical methods.*



*Об авторах:*

ДЕМИН Артем Валерьевич – научный сотрудник лаборатории физиологии и биомеханики кардиореспираторной системы, ФГБУ ГНЦ РФ – Институт медико-биологических проблем РАН, 123007, Москва, Хорошевское ш., д. 76а, e-mail: a\_demin2005@mail.ru

Научная библиотека ТвГУ