

УДК 612.062

ИНДЕКС ХИЛЬДЕБРАНДА КАК ПРОГНОСТИЧЕСКИЙ КРИТЕРИЙ ОТКАЗА ОТ ИНТЕНСИВНОЙ ФИЗИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ

С.Я. Классина

НИИ нормальной физиологии им. П.К. Анохина, Москва, Россия

Для связи с автором: E-mail: klassina@mail.ru

Аннотация

Цель – изучение состояния кардиореспираторной системы человека в момент отказа от интенсивной физической нагрузки на основе индекса Хильдебранда.

Материалы и методы исследования. В обследовании приняли участие 16 мужчин-добровольцев, регулярно занимавшихся физической культурой. Состояние испытуемых исследовали в покое и при нагрузочном тестировании на велоэргометре. При нагрузочном тестировании испытуемому предлагалась возрастающая по интенсивности ступенчато-дозированная физическая нагрузка до отказа. Мощность первой ступени нагрузки составляла 60 Вт, мощность последующих ступеней последовательно увеличивалась с шагом 20 Вт до отказа испытуемого. Длительность каждой из ступеней нагрузки составляла 2 мин. Регистрировали ЭКГ и пневмограмму, измеряли АД и скорость вращения педалей. Расчетным путем оценивали показатели гемодинамики, индекс Хильдебранда и «физиологическую цену» выполненной работы.

Результаты. Показано, что при нагрузке слабой интенсивности индекс Хильдебранда практически не зависел от угловой скорости вращения педалей, что позволяет говорить о стабильном состоянии кардиореспираторной системы испытуемых. В момент отказа от нагрузки достоверно повышались минутный объем кровообращения, «физиологическая цена» выполненной работы, индекс Хильдебранда, однако угловая скорость вращения педалей, наоборот, имела тенденцию к снижению. Регрессионный анализ выявил, что при увеличении угловой скорости вращения педалей частота дыхания снижается, а индекс Хильдебранда, наоборот, растет. Все это свидетельствует в пользу нарушения межсистемных взаимоотношений моторной и кардиореспираторной систем в момент отказа от нагрузки.

Заключение. Повышение индекса Хильдебранда на фоне снижения частоты дыхания является прогностическим признаком отказа от интенсивной физической нагрузки. Полученные данные могут быть положены в основу критерия диагностики «отказов» у велосипедистов.

Ключевые слова: спорт, физическая работа до отказа, кардиореспираторная система, индекс Хильдебранда.

HILDEBRANDT INDEX AS A PROGNOSTIC CRITERION OF ABANDONMENT OF AN INTENSE PHYSICAL ACTIVITY

S.Ia. Klassina

P.K. Anokhin Research Institute of Normal Physiology, Moscow, Russia

Abstract

The aim is to research human cardio respiratory system at the time of abandonment of intense physical activity based on Hildebrandt index.

Materials and methods: The research involved 16 male volunteers practicing regular physical exercises. Exploration of physical status of test subjects occurred at rest and during exercise testing on a bicycle ergometer. Exercise testing made test subjects experience the step-dosed physical activity with intensity growing up to capacity. The power of the first phase of exercise was 60 W, and the power of subsequent exercise phases successively increased in increments of 20 W up to the test subject's capacity. The duration of each exercise phase was 2 minutes. We recorded ECG and pneumogram, measured blood pressure and pedaling speed. Assessment of hemodynamic parameters, Hildebrandt index and the "physiological value" of the work accomplished occurred through calculation.

Results. The research revealed that Hildebrandt index was practically independent from angular pedaling speed during low intense exercise, which demonstrates stable status of the test subjects' cardiorespiratory system. Abandonment of exercise resulted in significant increase of cardiac output, "physiological value" of the

work accomplished, and Hildebrandt index while angular pedaling speed, on the contrary, had a tendency to decrease. Regression analysis revealed that increase of angular pedaling speed caused decrease of respiratory rate while Hildebrandt index, on the contrary, was growing. These points illustrate violation of intersystem relations of motor and cardiorespiratory systems at the time of abandonment of exercise.

Conclusion. Increasing Hildebrandt index on the background of decreasing respiratory rate is a prognostic sign of abandonment of an intense physical activity. The data obtained can become the basis for the diagnosis of "abandonment" of cyclists.

Keywords: sport, physical activity up to capacity, cardiorespiratory system, Hildebrandt index.

ВВЕДЕНИЕ

Любая биологическая система имеет свой оптимум регуляции, при котором все ее компоненты функционируют с максимальной эффективностью. Однако достаточно сильное или длительное по времени внешнее воздействие способно нарушить оптимальный характер функционирования системы, и даже разрушить ее. В связи с этим поиск прогностических критериев нарушений в системе регуляций физиологических систем до сих пор остается одной из наиболее актуальных задач такого рода исследований.

Полагаем, что индикатором нарушений в системе может быть индекс Хильдебрандта, отражающий межсистемные взаимоотношения в кардиореспираторной системе человека, а точнее, позволяющий говорить о рассогласованности в деятельности сердечно-сосудистой и дыхательной систем [6]. Эффективность индекса Хильдебрандта была показана в клинической практике, когда нарушения вегетативной регуляции пациента оценивались как компонент патогенеза [1]; в спортивной деятельности, где он проявил себя как показатель физиологических затрат организма спортсмена [3]. Однако до сих пор не установлено, может ли индекс Хильдебрандта быть использован в качестве прогностического критерия отказа от интенсивной физической нагрузки. Целью настоящего исследования является изучение состояния кардиореспираторной системы человека в момент отказа от интенсивной физической нагрузки на основе индекса Хильдебрандта.

МАТЕРИАЛЫ

И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В исследовании приняли участие 16 мужчин-добровольцев в возрасте 19-32 лет, регулярно занимающихся физической культурой.

Каждому из них предлагалось выполнить возрастающую по интенсивности этапно-дозированную физическую нагрузку до отказа на велоэргометре. При этом в процессе обследования испытуемые пребывали в следующих состояниях: «фон» (2,5 мин); "состояние нагрузки", «состояние восстановления» (6 мин). В состоянии нагрузки испытуемому предлагалась возрастающая по интенсивности ступенчато-дозированная физическая нагрузка, причем мощность первой ступени нагрузки составляла 60 Вт, а мощность последующих ступеней нагрузки последовательно увеличивалась с шагом 20 Вт до отказа испытуемого. Длительность нагрузки на каждой ступени составляла 2 мин, а само нагрузочное тестирование проводилось при постоянной линейной скорости 7 км/час. Для измерения линейной скорости (V, км/час) использовали прибор «SIGMA – bc-509» (Германия), датчик которого крепился к педали велоэргометра. Заметим, что линейная скорость 7 км/час при диаметре колеса велоэргометра 0,6 м соответствует угловой скорости вращения педалей 60 об/мин.

Для нагрузочного тестирования был использован велоэргометр «Sports Art 5005», а само тестирование проводилось под контролем ЭКГ и пневмограммы (компьютерный электрокардиограф «Поли-Спектр-8», фирма «Нейрософт»). Регистрация показателей ЭКГ и пневмограммы производилась на каждой ступени нагрузки. На основе анализа ЭКГ и пневмограммы оценивали частоту сердечных сокращений (ЧСС, уд/мин) и частоту дыхания (ЧД, 1/мин). АД (мм рт.ст) измеряли в исходном фоне и после восстановления. Расчетным путем оценивали ударный объем крови (УОК, мл) и минутный объем кровообращения (МОК, л/мин) [4, 10], вегетативный индекс Кердо (ВИК, %) [7, 9] и индекс

Хильдебрандта $q = \text{ЧСС} / \text{ЧД}$. Индекс Хильдебрандта является показателем межсистемных (кардиореспираторных) взаимоотношений, причем значения коэффициента в диапазоне 2,8-4,9 ед. свидетельствуют о нормальном межсистемном соотношении [6].

Оценка вегетативного обеспечения деятельности производилась на основе "физиологической цены" выполненной работы. Расчет "физиологической цены" (ρ , %) производили по формуле:

$$\rho = \sqrt{\sigma_{\text{ЧСС}}^2}$$

где $\sigma_{\text{ЧСС}} = 100\% * \frac{(\text{ЧСС}_{\text{н}} - \text{ЧСС}_{\text{фон}})}{\text{ЧСС}_{\text{фон}}}$;

$$\sigma_{\text{ЧД}} = 100\% * \frac{(\text{ЧД}_{\text{н}} - \text{ЧД}_{\text{фон}})}{\text{ЧД}_{\text{фон}}}$$

– относительные сдвиги показателей. Значения $\text{ЧСС}_{\text{н}}$ ($\text{ЧД}_{\text{н}}$) и $\text{ЧСС}_{\text{фон}}$ ($\text{ЧД}_{\text{фон}}$) – значения показателей в момент отказа от нагрузки и в фоне соответственно [5].

Статистический анализ полученных данных проводился с использованием программы «Statistica 10» (модули «Basic Statistics/Table», «Breakdown & one-way ANOVA»). Достоверность различия одноименных показателей определяли на основе t-критерия Стьюдента. Критический уровень статистической значимости принимали равным 0,05.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Естественно предположить, что эффективность функционирования биологической

системы будет стабильной при нагрузках низкой и средней интенсивности, но при экстремальных нагрузках эффективность функционирования системы снижается, а система зачастую распадается.

В таблице 1 представлены средние значения вегетативных показателей в фоне, при физической нагрузке слабой интенсивности (ступень 80 Вт) и предельной интенсивности (отказ от нагрузки).

Из данных таблицы видно, что вегетативные показатели в момент отказа от нагрузки существенно отличаются от одноименных показателей при слабой нагрузке (ступень 80 Вт). Так, в момент отказа от нагрузки достоверно повышается вегетативный индекс Керло (ВИК, $p < 0,05$), минутный объем кровообращения (МОК, $p < 0,05$), ЧСС ($p < 0,05$), ЧД ($p < 0,05$), индекс Хильдебрандта (q , $p < 0,05$) и «физиологическая цена» выполненной физической работы (ρ , $p < 0,05$). Все это свидетельствует в пользу усиления симпатических влияний на сердце испытуемого, интенсификации кровообращения, повышения «физиологической цены» выполненной работы. ЧСС и ЧД достоверно растут, при этом меняется их соотношение, о чем свидетельствует повышение индекса Хильдебрандта. Следует отметить, что угловая скорость вращения педалей (ω) на ступени отказа не только не повышается, а, наоборот, имеет тенденцию к снижению.

Естественно предположить, что выносливость велосипедиста зависит от соотношения частоты вращения педалей с ритмами сердца

Таблица 1 – Средние значения показателя угловой скорости вращения педалей (ω , об/мин) и вегетативных показателей в фоне, при слабой нагрузке (ступень 80 Вт) и в момент отказа от интенсивной физической нагрузки
Table 1 – Average values of the indicator of angular pedaling speed (ω , rpm) and vegetative indicators in the background, during low intense exercise (phase 80 W) and at the time of abandonment of intense physical activity

	Фон / Background	Слабая нагрузка / Low intense exercise	Отказ от нагрузки / Abandonment of exercise
	M \pm m	M \pm m	M \pm m
ВИК, % / KVI, %	5,4 \pm 4,8	12,8 \pm 4,4	40,2 \pm 2,0 *
УОК, мл / SV, ml	63,5 \pm 3,2	69,8 \pm 3,1	75,6 \pm 3,1
МОК, л/мин / CO, l/min	5,2 \pm 0,4	6,3 \pm 0,3 *	11,3 \pm 0,7 *
ЧСС, уд/мин / HR, bpm	82,9 \pm 3,1	111,0 \pm 4,2 *	154,4 \pm 2,4 *
ЧД, л/мин / BR, l/min	14,6 \pm 0,5	17,6 \pm 0,7 *	21,3 \pm 0,9 *
q	5,8 \pm 0,3	6,4 \pm 0,3	7,4 \pm 0,3 *
ρ , %		46,5 \pm 4,7	112,1 \pm 10,4 *
ω , об/мин / rpm		76,7 \pm 1,5	75,3 \pm 3,3

Примечание: * – $p < 0,05$ по отношению к предыдущему состоянию

Note: * – $p < 0,05$ relative to previous status

и дыхания. На рисунке 2 представлены кривые зависимости угловой скорости вращения педалей от ЧД и индекса Хильдебрандта при нагрузке слабой интенсивности (80 Вт).

Из рисунка 2 видно, что при нагрузке слабой интенсивности (ступень 80 Вт) кривая регрессии ЧД-80 – ω -80 имеет форму параболы с ветвями вверх, где минимум ЧД приходится на угловую скорость $\omega=77$ об/мин. При этом распределение значений индекса Хильдебрандта (q) практически не зависит от угловой скорости вращения педалей (ω), что позволяет говорить о стабильном соотношении ЧСС/ЧД у испытуемых при нагрузке слабой интенсивности.

По мере роста интенсивности физической нагрузки взаимоотношения моторной и вегетативных функций меняются. Так, в момент отказа достоверно повышаются МОК ($p<0,05$) и «физиологическая цена» выполненной работы ($p, p<0,05$), достоверно растут ЧД ($p<0,05$) и ЧСС ($p<0,05$), а также индекс Хильдебрандта ($p<0,05$), который все более отклоняется от верхней границы нормы. При этом угловая скорость вращения педалей (ω), наоборот, имеет тенденцию к снижению (таблица 1).

На рисунке 3 приведены линии регрессии, отражающие связи угловой скорости вращения педалей (ω) с ЧД и индексом Хильдебрандта (q) в момент отказа от нагрузки. Видно, что при увеличении угловой скоро-

сти вращения педалей ЧД снижается, а индекс Хильдебрандта, наоборот, растет. Такого рода динамика обусловлена тем, что при росте интенсивности физической нагрузки пропорционально повышается легочная вентиляция, что обусловлено возбуждением дыхательного центра. Однако повышение легочной вентиляции происходит лишь до определенного момента, после которого легочная вентиляция, наоборот, снижается на фоне дальнейшего роста интенсивности нагрузки. Момент снижения легочной вентиляции – это реакция дыхательной системы на повышенное содержание CO_2 в крови. Необходимо заметить, что даже при самой тяжелой нагрузке легочная вентиляция не превышает 70-80% своего максимального уровня [2, 8]. С учетом сказанного можно предположить, что момент отказа является именно той «тяжелой» нагрузкой, когда легочная вентиляция не повышается. Поскольку при этом у испытуемого отмечается наиболее высокий уровень гипоксии, то для пополнения альвеолярного воздуха кислородом он вынужден увеличить глубину дыхания, тем самым повышая дыхательный объем (ΔO) и снижая ЧД. Все это свидетельствует в пользу нарушения межсистемных взаимоотношений моторной функции и показателей кардиореспираторной системы в момент отказа.

Для оценки взаимосвязи вышеуказанных показателей проведен корреляционный анализ.

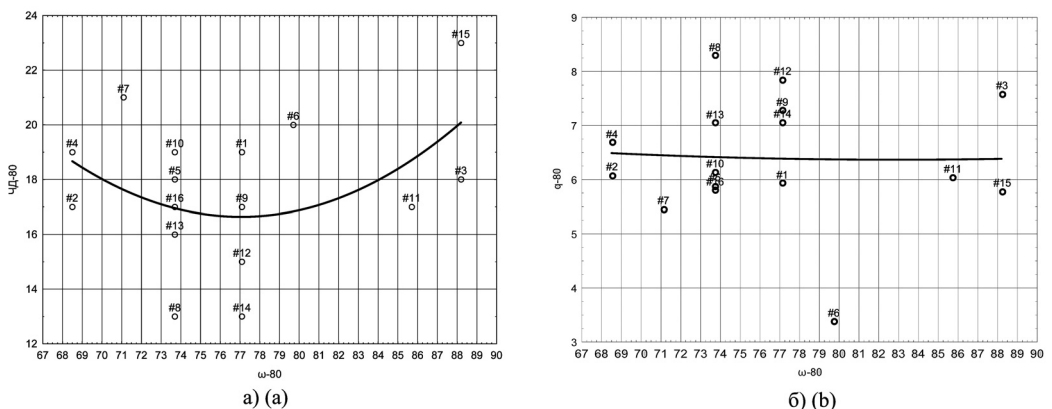
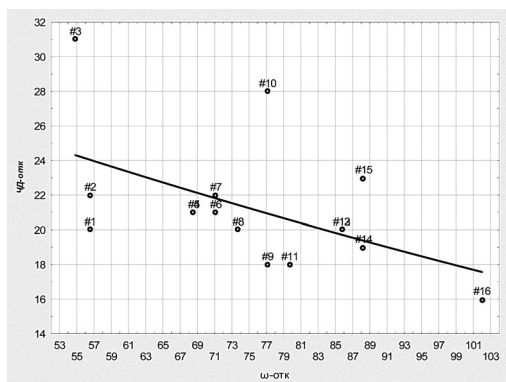
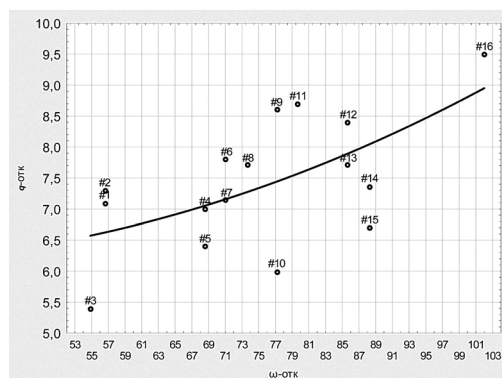


Рисунок 2 – Зависимость частоты дыхания (ЧД, 1/мин) (а) и индекса Хильдебрандта (q) (б) от угловой скорости вращения педалей (ω , об/мин) на ступени мощности 80 Вт (полиномиальная регрессия)

Figure 2 – Dependence of breathing rate (BR, 1/min) (a) and Hildebrandt index (q) (b) from angular pedaling speed (ω , rpm) at the power phase 80 W (polynomial regression)



а) (a)



б) (b)

Рисунок 3 – Зависимость частоты дыхания (ЧД, 1/мин) (а) и индекса Хильдебрандта (q) (б) от угловой скорости вращения педалей (ω , об/мин) в момент отказа от нагрузки (полиномиальная регрессия)

Figure 3 - Dependence of breathing rate (BR, l/min) (a) and Hildebrandt index (q) (b) from angular pedaling speed (ω , rpm) at the power phase 80 W (polynomial regression)

В таблице 2 представлены коэффициенты парной корреляции угловой скорости вращения педалей и вегетативных параметров кардиореспираторной системы.

Из таблицы 2 следует, что при нагрузке слабой интенсивности (80 Вт) связи угловой скорости вращения педалей с ЧД и показателем q слабые и статистически незначимые. Это позволяет говорить о том, что ни ЧД, ни индекс Хильдебрандта не зависят от угловой скорости вращения педалей и мощности ступени нагрузки. Кардиореспираторная система может расцениваться как стабильная.

В момент отказа от нагрузки, наоборот, коэффициенты парной корреляции повышаются и становятся статистически значимыми. Отсюда следует, что по мере повышения угловой скорости вращения педалей ЧД достоверно снижается, а индекс Хильдебрандта достоверно растет. При этом чем выше у испытуемого угловая скорость вращения педалей в момент отказа, тем ниже ЧД и больше индекс Хильдебрандта, что свидетельствует в пользу тесного сопряжения мышечной и дыхательной систем.

Следует подчеркнуть, что если на ступени 80 Вт индекс Хильдебрандта не зависел от угловой скорости вращения педалей и был равен 6,5, то на ступени отказа он повышался с 6,5 до 9,0, что позволяет говорить о дисбалансе вегетативных и моторных компонентов в организме испытуемого в момент отказа. При этом рост индекса Хильдебрандта был обусловлен как ростом ЧСС, так и снижением ЧД в момент отказа. Таким образом, достоверный рост индекса Хильдебрандта на фоне снижения ЧД может расцениваться как прогностический признак отказа от выполнения интенсивной физической работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что повышение индекса Хильдебрандта на фоне снижения частоты дыхания является прогностическим признаком отказа от интенсивной физической нагрузки. Полученные данные могут быть положены в основу разработки критерия превентивной диагностики «отказов» у велосипедистов.

Таблица 2 – Коэффициенты парной корреляции (r) угловой скорости вращения педалей (ω , об/мин) велоэргометра и частоты дыхания (ЧД, 1/мин) и индекса Хильдебрандта (q)

Table 2 – Coefficients of pair correlation (r) of angular pedaling speed (ω , rpm) of an exercise bike for veloergometry and breathing rate (BR, l/min), and Hildebrandt index

	ЧД / BR	r
ω -80	0,226	-0,025
ω – отк / aband	-0,508 (p<0,05)	0,594 (p<0,05)

ЛИТЕРАТУРА

1. Ассоциация вегетативных параметров и уровня контроля бронхиальной астмы у детей / К.С. Попов, А.В. Бурлуцкая, Р.Н. Бикужева и др. // Медицинский альманах. – 2018. – № 3(54) – С. 60-64.
2. Большая медицинская энциклопедия. Главный редактор Б. В. Петровский. издание третье, онлайн версия. <https://бмэ.орг/index.php>
3. Индекс Хильдебрандта как интегральный показатель физиологических затрат у спортсменов в процессе возрастающей этапно-дозированной физической нагрузки / Н.А. Фудин, К.В. Судakov, А.А. Хадарцев и др. // Вестник новых медицинских технологий. – 2011. – Т. XVIII, № 3. – С. 244-248.
4. Кардиогемодинамика и физическая работоспособность у спортсменов / В. Л. Карпман, З.Б. Белоцерковский, И.А. Гудков и др. – М.: Советский спорт, 2012. – 189 с.
5. Классина, С.Я. Физиологическая модель социального взаимодействия тренер-спортсмен в процессе тренировки на велоэргометре / С. Я. Классина // Вестник новых медицинских технологий. – 2014. – Т. 21, № 3. – С. 122-126.
6. Doeltgen, S.H., Ridding, M.C. Behavioural exposure and sleep do not modify corticospinal and intracortical excitability in the human motor system // Clin Neurophysiol, 2010, 121:448–452.
7. Kérdö, I. Ein aus Daten der Blutzirkulation kalkulierter Index zur Beurteilung der vegetativen Tonuslage // Acta neurovegetativa. – 1966. – Bd. 29, № 2. – S. 250-268. (нем.)
8. Powers, S.K, Williams, J. Exercise-Induced Hypoxaemia in Highly Trained Athletes // Sports Medicine, Springer, 1987, Volume 4, Issue 1, pp. 46–53.
9. Sharma, P., Vyacheslav, M., Carissa, C., Vanessa, R., Bodo, M. Pyruvate dose response studies targeting the vital signs following hemorrhagic shock. // J. Emerg Trauma Shock. 2015 Jul-Sep;8(3):159-66.
10. Webb, W.R, Moulder, P.V, Harrison, L.H, Broussard, M.L. Simple method for evaluating cardiac output. // J La State Med Soc. 2009 Sep-Oct; 161(5):287-89.

REFERENCES

1. Popov K.S., Burlutskaya A.V., Bikusheva R.N. et al. Association of autonomic parameters and the level of asthma control of children. Meditsinskii almanakh [Medical almanac], 2018, no. 3(54), pp. 60-64. (in Russ.)
2. Big Medical Encyclopedia. Ed. by B.V. Petrovskii. Third edition, online version, <https://бмэ.орг/index.php> (in Russ.)
3. Fudin N.A., Sudakov K.V., Khadartsev A.A. et al. Hildebrandt index as an integral indicator of the physiological value of athletes in the process of increasing step-dosed physical activity. Vestnik novykh meditsinskikh tekhnologii [Bulletin of new medical technologies], 2011, Vol. XVIII, no. 3, pp. 244-248. (in Russ.)
4. Karpman V.L., Belotserkovskii Z.B., Gudkov I.A. et al. Cardiohemodynamics and physical performance of athletes. Moscow, Sovetskii sport Publ., 2012, 189 p.
5. Klassina S.Ia. Physiological model of coach-athlete social interaction during training on a veloergometer. Vestnik novykh meditsinskikh tekhnologii [Bulletin of new medical technologies], 2014, vol. 21, no. 3, pp. 122-126. (in Russ.)
6. Doeltgen S.H, Ridding M.C. Behavioural exposure and sleep do not modify corticospinal and intracortical excitability in the human motor system. Clin Neurophysiol, 2010, no. 121, pp. 448–452.
7. Kérdö I. Ein aus Daten der Blutzirkulation kalkulierter Index zur Beurteilung der vegetativen Tonuslage. Acta neurovegetativa, 1966, Bd. 29, no. 2, pp. 250-268. (in German).
8. Powers S.K, Williams J. Exercise-Induced Hypoxaemia in Highly Trained Athletes. Sports Medicine, Springer, 1987, Vol. 4, Issue 1, pp. 46–53.
9. Sharma P., Vyacheslav M., Carissa C., Vanessa R., Bodo M. Pyruvate dose response studies targeting the vital signs following hemorrhagic shock. J. Emerg Trauma Shock, 2015 Jul-Sep; no. 8(3) p. 1.
10. Webb W.R, Moulder P.V, Harrison L.H, Broussard M.L. Simple method for evaluating cardiac output. J La State Med Soc. 2009 Sep-Oct; no. 161(5), pp. 287-89.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:

Классина Светлана Яковлевна (Klassina Svetlana Iakovlevna) – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории системных механизмов спортивной деятельности; НИИ нормальной физиологии им. П.К. Анохина; 119311, Москва, ул. Крупской, 6-2-99; e-mail: klassina@mail.ru; ORCID: 0000-0001-7972-9600.

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Классина, С.Я. Индекс Хильдебрандта как прогностический критерий отказа от интенсивной физической нагрузки / С.Я. Классина // Наука и спорт: современные тенденции. – 2019. – Т. 7, № 2. – С. 68-73

FOR CITATION

Klassina S.Ia. Hildebrandt index as a prognostic criterion of abandonment of intense physical activity. Science and sport: current trends, 2019, vol. 7, no. 2, pp. 68-73 (in Russ.)