

АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОЦЕДУР ОЦЕНИВАНИЯ НЕРВНО-ЭМОЦИОНАЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ОПЕРАТОРА НА ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНОМ ЭТАПЕ ОБУЧЕНИЯ

д. т. н., проф. *Ю. А. Кукушкин*, к. м. н. *Э. А. Козловский*
(Государственный научно-исследовательский испытательный институт военной медицины
Минобороны России),
к. т. н. *А. В. Пономаренко*, *В. В. Осипенко* (ФГУП «РСК «МиГ»),
д. т. н., проф. *А. Г. Гузий*
(ВВИА им. Н.Е. Жуковского)

Изложен алгоритм построения оценки нервно-эмоционального напряжения оператора в процессе профессиональной подготовки. Составными частями алгоритма являются: выделение электрокардиосигнала на фоне помех; построение ряда интервалов ЭКГ (кардиоинтервалограммы); синтез оценок нервно-эмоционального напряжения с использованием регрессионных моделей.

Одним из обязательных этапов профессиональной подготовки операторов автоматизированных систем повышенной аварийности является тренировка на технических средствах, имитирующих условия реальной деятельности. Это могут быть тренажеры (ситуационные, процедурные, комплексные,...) или рабочее место оператора, функционирующее в режиме имитации различных рабочих ситуаций и контроля качества выполнения поставленной задачи. Целью этого этапа подготовки является повышение качества профессиональной деятельности оператора, с привитием соответствующих навыков и оптимизация нервно-эмоциональных реакций при работе в условиях, близких к реальным. Оценка уровня подготовленности оператора только по успешности выполнения задания (по конечному результату) не всегда достоверна. Известно, что высокая оценка может быть достигнута усилиями воли, мобилизацией организма, за счет избыточного напряжения сил, работы на пределе психических и психофизиологических возможностей (при отсутствии выработанных и устойчивых навыков) [1]. При этом надежность профессиональной деятельности человека может оказаться довольно низкой, что особенно проявляется при усложнении условий выполнения заданий или при возникновении чрезвычайной ситуации [2, 3,...].

Психофизиологические показатели оператора в процессе выполнения задания на тренажере в первую очередь указывают на степень информационной, энергетической и психической нагрузок, то есть объективно свидетельствуют о сложности конкретного упражнения и отдельных его элементов для данного оператора. Они отражают динамику становления и перестройки навыков, степень их сформированности и функциональной надежности организма. Поэтому отклонение тех или иных физиологических показателей во время операторской деятельности (работы) может быть (при прочих равных условиях) достаточно информативным показателем освоения данного вида деятельности [4, 5,...]. Характерно, что стабилизация психофизиологических показателей наступает несколько позже, чем показателей качества деятельности [7, 8]. Последнее имеет принципиальное и решающее значение при определении необходимого объема тренировок и при оценке уровня обученности (подготовленности) оператора [9]. Надежность деятельности значительно повышается, когда результаты выполнения упражнения становятся стабильными, а уровень физиологических реакций соответствует сложности выполняемой задачи.

Результаты ранее выполненных исследований показали, что по мере тренировки наряду со снижением степени нервно-эмоционального напряжения в процессе выполнения задания снижаются и предстартовые эмоциональные реакции. Предстартовая реакция — это

особое состояние, возникающее в результате умственного моделирования будущих действий. Умеренное эмоциональное напряжение способствует качественному и надежному функционированию оператора [1, 10,...]. Эмоциональный компонент умственного моделирования мобилизует организм к действию, что объективно проявляется в повышении его физиологических функций и функциональной надежности. Чрезмерное волнение перед тренировкой, о чем свидетельствует высокий уровень регистрируемых физиологических показателей, как правило, отрицательно сказывается на качестве выполнения задания и косвенно свидетельствует либо о недостаточной подготовленности, либо о нарушении режима труда и отдыха, болезненном состоянии оператора и т.п. Отсюда следует, что при психофизиологической оценке подготовленности оператора целесообразно учитывать также исходный (предстартовый) уровень реакций.

Многочисленными исследованиями установлено, что наиболее надежным показателем степени нервно-эмоционального напряжения является **частота сердечных сокращений (ЧСС)**, жестко привязанная к этапу тренировки.

Алгоритм оценивания нервно-эмоционального напряжения оператора состоит из двух частей:

- алгоритма построения ряда интервалов RR электрокардиосигнала (ЭКС) - ритмограммы и определения ЧСС за этап тренировки;
- алгоритма построения оценок нервно-эмоционального напряжения.

Алгоритм построения ряда интервалов RR электрокардиосигнала - кардиоинтервалограммы и определения ЧСС за этап тренировки

Данный алгоритм включает идентификацию зубца R электрокардиограммы (ЭКГ), измерение длительности интервалов RR и мгновенных значений ЧСС, определение ЧСС за этап тренировки.

Сердечный цикл и его характерные элементы представлены на рис. 1.

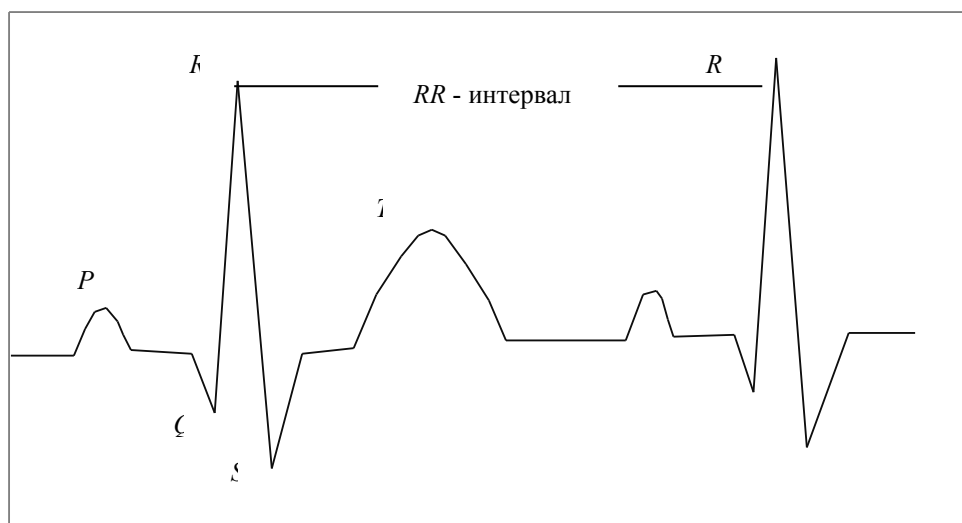


Рис. 1. Сердечный цикл и его характерные элементы

Выделение зубца R ЭКГ и измерение длительности интервалов RR производится в два этапа [6].

На первом этапе (этапе настройки алгоритма) в ПЭВМ вводятся первые n отсчетов ЭКС и запоминаются в массиве $X(n)$:

$$X(n) = x_{j-n+1}, x_{j-n+2}, \dots, x_{j-1}, x_j,$$

где x_j – j -й текущий отсчет ЭКГ.

Алгоритм работает так, что постоянно в памяти хранится массив $X(n)$, состоящий из n значений отсчетов электрокардиосигнала (ЭКС). При вводе каждого следующего отсчета сигнала значения элементов массива $X(n)$ переопределяются по правилу:

$$x_j = x_{j+1}, \quad j = 1, 2, \dots, n-1,$$

то есть каждый раз при взятии нового отсчета ЭКС происходит циклический сдвиг элементов массива $X(n)$ на 1.

Величина n определяется из условия запоминания участка электрокардиограммы длительностью $\tau = 0,07 - 0,08$ с, что составляет 60 – 70% средней продолжительности комплекса QRS ЭКГ:

$$n = \frac{\tau}{\tau_{\text{дискр}}}$$

где $\tau_{\text{дискр}}$ – интервал дискретизации в секундах.

После взятия j -го ($j = n$) и всех последующих отсчетов вычисляется оценка WF_{ξ} :

$$WF_{\xi} = \sum_{i=\xi-n+1}^{\xi} x_i \cdot y_{i-\xi+n},$$

где ξ – текущий отсчет, а y_k – весовая функция:

$$y_k = \begin{cases} -1 & \text{при } k = 1, 2, \dots, \frac{n}{3} - 1, \frac{n}{3} \\ 2 & \text{при } k = \frac{n}{3} + 1, \frac{n}{3} + 2, \dots, \frac{2 \cdot n}{3} \\ -1 & \text{при } k = \frac{2 \cdot n}{3} + 1, \frac{2 \cdot n}{3} + 2, \dots, n, \end{cases} \quad (1)$$

график которой представлен на рис. 2. Величина n должна быть кратной трем.

Весовая функция (1) выполняет роль перемещаемого по массиву отсчетов ЭКС окна, при наложении которого на QRS комплекс ЭКГ (рис. 1) оценка WF принимает максимальное значение (WF_{max}). Оценка WF вычисляется при каждом новом отсчете ЭКС и сравнивается с величиной WF_{max} (первоначально $WF_{max} = 0$). Все операции вычисления оценки WF и сравнения с величиной WF_{max} повторяются до тех пор, пока не будут введены все Z отсчетов:

$$Z = \frac{t}{\tau_{\text{дискр}}},$$

где t – время настройки алгоритма ($t \approx 4 - 10$ с).

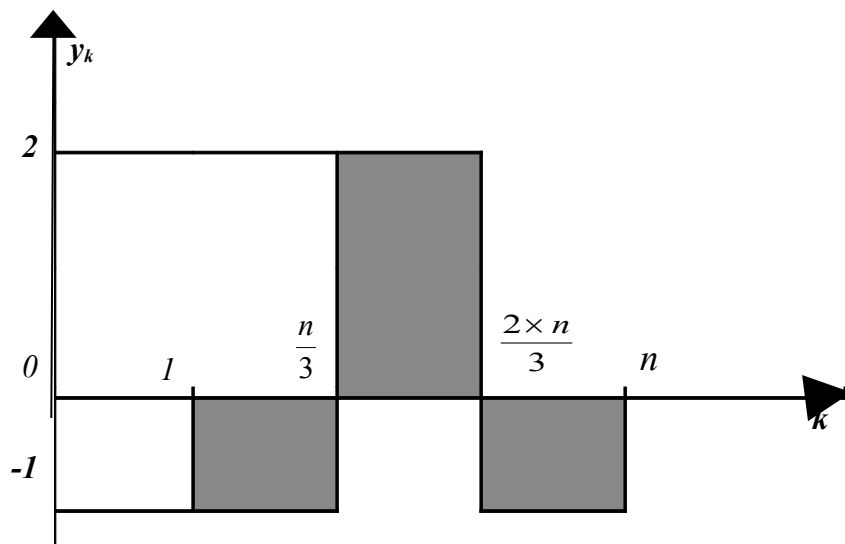


Рис. 2. График весовой функции y_k ,

После вычисления WF_{max} определяется порог PW :

$$PW = c \cdot WF_{\max},$$

где $0 < c < 1$, превышение которого значением оценки WF_{ξ} , после взятия текущего ξ -го отсчета будет свидетельствовать о том, что массив $X(n)$ содержит отсчеты ЭКС, принадлежащие комплексу QRS . Тогда зубец R определяется как максимальный элемент массива $X(n)$, номер которого запоминается. Установлено, что зубец R надежно распознается при $c=0,75$, тогда порог $PW=0,75 WF_{\max}$.

В дальнейшем (второй этап) все вновь вычисляемые значения оценки WF_{ξ} , сравниваются с порогом PW , в случае превышения которого выносится решение об обнаружении зубца R как номера максимального массива $X(n)$. Начиная со второго превышения оценкой W порога PW , возможно определение RR интервалов по формуле:

$$RR_i = (N_{i+1} - N_i + KS) \tau_{\text{дискр}},$$

где i – порядковый номер найденного интервала $R-R$;

N_i, N_{i+1} – номера максимального элемента массива $X(n)$ при предыдущем и текущем превышении порога PW ;

KS – количество взятых отсчетов ЭКС после предыдущего превышения порога PW .

Вид исходного сигнала ЭКГ и его оценки WF_{ξ} представлены на рис. 3.

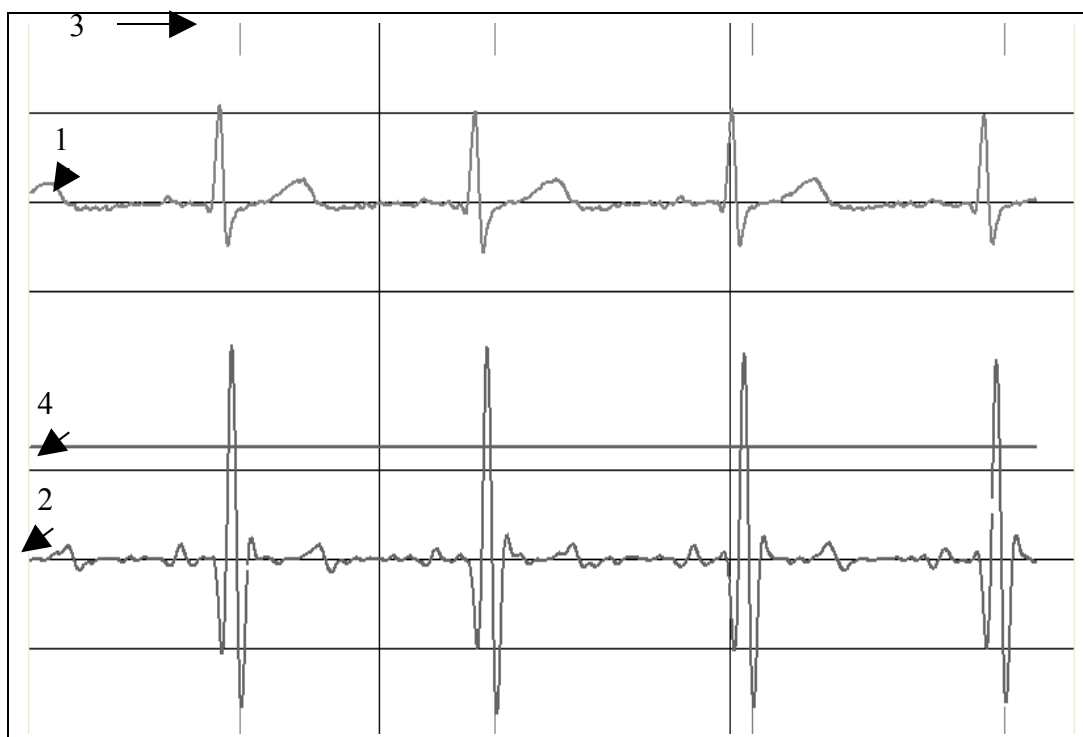


Рис. 3. Исходный сигнал ЭКГ (1) и его оценка WF_{ξ} (2). В верхней части рисунка расположены метки (3), отражающие превышение оценкой WF_{ξ} порогового значения PW (4)

После фильтрации ЭКС осуществляется определение ЧСС.

Определение ЧСС за этап тренировки производится по следующему алгоритму:

Логическим фильтром выделяются синусовые кардиоциклы. Логический фильтр пропускает на выходе нормотопные RR интервалы, длительность которых удовлетворяет условию:

$$0,75 < RR_i / RR_{i+1} < 1,25, \quad (2)$$

где RR_i / RR_{i+1} – отношение длительностей двух смежных RR интервалов.

Кардиоциклы, не удовлетворяющие условию (2) вследствие наличия экстрасистол, пропусков зубцов R ЭКГ, артефактов, исключаются из ритмограммы.

После отбраковки ненормотопных кардиоинтервалов каждый RR интервал пересчитывается в мгновенное значение частоты сердечных сокращений ($ЧСС_i$):

$$ЧСС_i = 60/RR_i.$$

Подсчитывается количество оставшихся после «прореживания» логическим фильтром интервалов RR за этап тренировки – $N_{эм}$.

Вычисляется значение частоты сердечных сокращений за этап тренировки:

$$ЧСС_{эм} = \Sigma ЧСС_i / N_{эм}.$$

Алгоритм построения оценок нервно-эмоционального напряжения оператора

Для каждого вида деятельности существует оптимум эмоционального напряжения, который определяется содержанием и условиями выполнения конкретных заданий и отражает адекватное характеру задания состояние физиологических систем организма.

При анализе психофизиологических реакций человека на воздействие фактора любой природы – психологической, физической, химической и т.п., необходимо знать исходные значения показателей, по которым оценивается эта реакция. В результате исследований, в которых проводилось измерение ЧСС операторов до и во время выполнения задания на тренажере [8], было установлено, что зависимость между ними статистически достоверно можно описать линейной регрессией:

$$Ч\tilde{C}_{iэм} = aЧСС_{iфон} + b, \quad (3)$$

где $ЧСС_{iфон}$ - частота сердечных сокращений, зарегистрированная у i – го оператора в исходном состоянии (фоне);

$Ч\tilde{C}_{iэм}$ – предсказанное по уравнению регрессии значение частоты сердечных сокращений, зарегистрированное у i – го оператора на этапе тренировки.

Коэффициенты a и b определяются методом наименьших квадратов по массиву данных, зарегистрированному у операторов с разным уровнем подготовки в фоне ($ЧСС_{iфон}$) и при выполнении анализируемого этапа тренировки ($ЧСС_{iэм}$).

Для нахождения критериальных значений ЧСС оператора на этапах тренировки необходимо (после того как найдено уравнение регрессии) определить остаточное среднеквадратическое отклонение:

$$s_{ост} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (Ч\tilde{C}_{iэм} - ЧСС_{iэм})^2 / (n - 2)} \quad (4)$$

где n – объем выборки, по которой определялись коэффициенты уравнения регрессии, а затем, используя уравнение регрессии и $\sigma_{ост}$, построить порядковую шкалу оценок нервно-эмоционального напряжения оператора (Табл. 1).

Таблица 1

Правила перевода значений $ЧСС_{iэм}$ в порядковую шкалу оценок

Если	То оценка
$ЧСС_{iэм} \geq (aЧСС_{iфон} + b + s_{ост})$	2
$[ЧСС_{iэм} < (aЧСС_{iфон} + b + s_{ост})] \wedge [ЧСС_{iэм} \geq (aЧСС_{iфон} + b)]$	3
$[ЧСС_{iэм} < (aЧСС_{iфон} + b)] \wedge [ЧСС_{iэм} \geq (aЧСС_{iфон} + b - s_{ост})]$	4
$ЧСС_{iэм} < (aЧСС_{iфон} + b - s_{ост})$	5

На рис. 4 показаны нормативные границы $ЧСС_{iэм}$ в зависимости от $ЧСС_{iфон}$. Верхняя граница соответствует выражению $ЧСС_{iэм} = aЧСС_{iфон} + b + s_{ост}$, средняя - $ЧСС_{iэм} = aЧСС_{iфон} + b$, нижняя - $ЧСС_{iэм} = aЧСС_{iфон} + b - s_{ост}$.

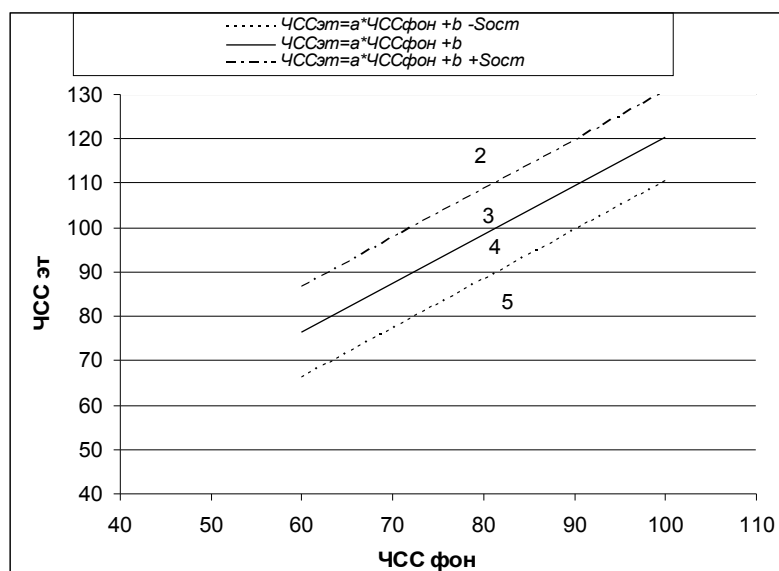


Рис. 4. Нормативные границы ЧСС. По оси абсцисс – ЧСС в исходном состоянии (фоне). По оси ординат - ЧСС на этапе тренировки

Пример применения алгоритма оценки нервно-эмоционального напряжения оператора в авиационной практике

Используя данные проведенных нами исследований, были определены коэффициенты регрессионных уравнений (3) и остаточные среднеквадратические отклонения (4) для ряда этапов полета летчиков на авиационном тренажере при переучивании на новую технику. Эти уравнения представлены в табл. 2. Кроме того, в этой таблице приведены значения коэффициентов детерминации (квадратов коэффициентов корреляции) R^2 и соответствующие им уровни значимости – p (вероятность отвержения нулевой гипотезы, если она верна), которые отражают статистическую существенность уравнений.

Воспользовавшись правилами перевода частоты сердечных сокращений летчика, зарегистрированных на этапе полета ($ЧСС_{эм}$), в порядковую шкалу оценок нервно-эмоционального напряжения (таблица 1) и уравнениями регрессии (табл. 2), можно записать алгоритм определения этих оценок для различных этапов полета, который представлен в табл. 3.

Таблица 2

Аналитические зависимости ЧСС на этапах полета ($ЧСС_{эм}$) от фоновых значений ($ЧСС_{фон}$)

Этап полета	Уравнение регрессии	S_{ocm}	R^2	p
Горизонтальный полет, набор высоты, развороты, виражи, снижение	$ЧСС_{эм} = 0,9ЧСС_{фон} + 15,3$	7,7	0,65	<0,01
Обнаружение объекта	$ЧСС_{эм} = 1,1ЧСС_{фон} + 5,5$	8,1	0,70	<0,01
Захват объекта	$ЧСС_{эм} = 1,1ЧСС_{фон} + 10,5$	10,2	0,62	<0,01
Заход на посадку	$ЧСС_{эм} = 1,12ЧСС_{фон} + 6,6$	8,8	0,67	<0,01

Балльная оценка ЧСС летчика привязана к принятой в авиации шкале качества выполнения полетного задания и используется при выставлении итоговой оценки его

подготовленности на авиационном тренажере. Чем выше балл оценки, тем ниже уровень нервно-эмоционального напряжения.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 06-08-01518

Литература

1. *Ерохин В. П.* и др. Вегетативный компонент напряженности труда пилотов различных типов летательных аппаратов./ Авиакосмическая медицина: Тез. докладов на V Всесоюзной конф., г. Калуга. Т.1. – Москва-Калуга, 1975.- С. 89 - 90.
2. *Михайлик Н. Ф., Лейченко С. Д., Малишевский А. В., Паркас Р.* Основные причины нарушения нормальной психической деятельности оператора при возникновении особой ситуации./ Труды общества независимых исследователей авиационных происшествий. Выпуск 15. – М.: Полиграф, 2003. – С. 202 - 209.
3. *Козлов В. В.* Человеческий фактор: история, теория и практика в авиации. – М.: Полиграф, 2002. – 280 с.
4. *Румянцева и др.* Применение методов многомерного статистического анализа для изучения особенностей реагирования человека в состоянии эмоционального напряжения./ Методическое и техническое обеспечение психофизиологических исследований. – М.: Наука, 1986. – С. 23 - 28.
5. *Гузий А. Г., Грицына Н. И.* Оценка степени эмоционального напряжения оператора в экстремальных условиях функционирования./ Четвертая научно-техническая конференция «Современные научно-технические проблемы совершенствования и направления развития информационных средств войск РКО и их программного обеспечения». Тезисы докладов. – М.: ФВА РВСН, 1999. - С. 158 –1 59.
6. *Волхонская Т. А., Василега А. Г., Макеев С. М., Ревенский А. И.* Алгоритм выделения последовательностей R-R, R-T и T-T интервалов и математическое обеспечение их анализа. – Киев: Медицинская кибернетика ИК АН УССР, 1978. – С. 33 - 39.
7. *Ворона А. А., Гандер Д. В., Пономаренко В. А.* Психолого-педагогические основы профессиональной подготовки летного состава – М.: МАЧАК, 2000. – 340 с.
8. *Жернавков В. Ф., Козловский Э. А.* Психофизиологическая оценка подготовленности летчика на пилотажных тренажерах / Под ред. В. А.Бодрова. - М.: Воениздат, 1981. – 55 с.
9. *Богомолов А. В., Гузий А. Г., Гусев Д. В., Кукушкин Ю. А.* Принципы психофизиологического оценивания готовности оператора к выполнению профессиональной деятельности. / «Проблемы развития вооружения и военной техники ПВО на современном этапе и на период до 2015 г.» Материалы XXVII военно-научной. конф. – Тверь: 2ЦНИИ МО, 2001.
10. *Маньшин Г. Г., Том И. Э.* Надежность систем «человек-машина». – Минск: Институт кибернетики АН БССР, 1985.
11. *Кукушкин Ю. А., Богомолов А. В.* Методика синтеза показателя психофизиологического напряжения оператора // Медицинская техника. - 2001. - № 4. - С. 29 - 33.

Таблица 3

Алгоритм определения оценок (в баллах) нервно-эмоционального напряжения летчика по частоте сердечных сокращений на этапах «полета» в процессе тренировки на авиационном тренажере

Оценка	Этапы полета			
	ГП, набор высоты развороты, виражи, снижение	Обнаружение объекта	Захват объекта	Заход на посадку
Отлично 5	$ЧСС_{эт} \leq (0,9ЧСС_{фон} + 7,6)$	$ЧСС_{эт} \leq (1,1ЧСС_{фон} - 2,6)$	$ЧСС_{эт} \leq (1,1ЧСС_{фон} + 0,3)$	$ЧСС_{эт} \leq (1,12ЧСС_{фон} - 2,2)$
Хорошо 4	$[ЧСС_{эт} > (0,9ЧСС_{фон} + 7,6)] \wedge [ЧСС_{эт} \leq (0,9ЧСС_{фон} + 15,3)]$	$[ЧСС_{эт} > (1,1ЧСС_{фон} - 2,6)] \wedge [ЧСС_{эт} \leq (1,1ЧСС_{фон} + 5,5)]$	$[ЧСС_{эт} > (1,1ЧСС_{фон} + 0,3)] \wedge [ЧСС_{эт} \leq (1,1ЧСС_{фон} + 10,5)]$	$[ЧСС_{эт} > (1,12ЧСС_{фон} - 2,2)] \wedge [ЧСС_{эт} \leq (1,12ЧСС_{фон} + 6,6)]$
Удовлетворительно 3	$[ЧСС_{эт} > (0,9ЧСС_{фон} + 15,3)] [ЧСС_{эт} \leq (0,9ЧСС_{фон} + 23,0)]$	$[ЧСС_{эт} > (1,1ЧСС_{фон} + 5,5)] \wedge [ЧСС_{эт} \leq (1,1ЧСС_{фон} + 13,6)]$	$[ЧСС_{эт} > (1,1ЧСС_{фон} + 10,5)] \wedge [ЧСС_{эт} \leq (1,1ЧСС_{фон} + 20,7)]$	$[ЧСС_{эт} > (1,12ЧСС_{фон} + 6,6)] \wedge [ЧСС_{эт} \leq (1,12ЧСС_{фон} + 15,4)]$
Неудовлетворительно 2	$ЧСС_{эт} > (0,9ЧСС_{фон} + 23,0)$	$ЧСС_{эт} > (1,1ЧСС_{фон} + 13,6)$	$ЧСС_{эт} > (1,1ЧСС_{фон} + 20,7)$	$ЧСС_{эт} > (1,12ЧСС_{фон} + 15,4)$

