

УДК 614.8-051

БЕСКОНТАКТНАЯ ДИАГНОСТИКА ПСИХОФИЗИОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ В ТРЕНАЖЕРНОЙ ПОДГОТОВКЕ ЛИЦ ОПАСНЫХ ПРОФЕССИЙ

А.Ф.Бобров¹, В.А.Минкин², В.Ю.Щебланов¹, Е.С.Щелканова³

¹ ФГБУ «Государственный научный центр Российской Федерации – Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И.Бурназяна ФМБА России», Москва

² ООО «Многопрофильное предприятие «ЭЛСИС», Санкт-Петербург

³ Центр по обращению с РАО – отделение губа Андреева Северо-Западного центра «СевРАО» – филиала ФГУП «РосРАО», г.Заозерск, Мурманская область

Обоснована актуальность психофизиологического сопровождения тренажерной подготовки в целях повышения надежности профессиональной деятельности лиц опасных профессий (ОП). Описана инновационная бесконтактная диагностика актуального психофизиологического состояния по параметрам виброизображения лица человека для решения задач медицины катастроф. На данных тренажерной подготовки лиц, участвующих в обращении с отработанным ядерным топливом, показана высокая взаимосвязь параметров виброизображения с качеством моделируемой деятельности и показателями электрофизиологических сигналов. Сделан вывод, что результаты исследования позволяют рекомендовать технологию анализа виброизображения как методологическое средство управления режимами тренажерной подготовки лиц ОП.

Ключевые слова: бесконтактная диагностика, виброизображение, лица опасных профессий, обращение с отработанным ядерным топливом, психофизиологическое состояние, тренажерная подготовка

Профессиональная надежность лиц опасных профессий (ОП) во многом определяется уровнем их профессиональных навыков и умений, который должен быть достаточным для решения производственных задач. Формируют такие навыки для решения практических задач медицины катастроф, как правило, с использованием тренажерных комплексов.

Примером указанных тренажерных комплексов являются полномасштабные тренажеры блочных щитов управления атомных электростанций, систем управления самолетами различных типов гражданской и военной авиации, военной техникой и др. [1, 2]. На тренажерах такого типа детально воспроизводятся все органы управления, а специальные программы позволяют имитировать различные нештатные ситуации с техникой.

Другой тип тренажеров – психофизиологические тренажеры, на которых тренируют и поддерживают профессионально важные психофизиологические качества, непосредственно влияющие на уровень безопасности работы лиц ОП. К указанным психофизиологическим качествам относятся: избирательность; концентрация,

распределение и переключаемость внимания; память; перцепция; антиципации и др.

Важной задачей при использовании психофизиологических тренажеров является развитие навыков оптимального функционирования в экстремальных условиях. Для этого в психофизиологические тренажеры вводят элементы биологической обратной связи (БОС). Установлено, что повышение способности к саморегуляции и переход на оптимальные стратегии поведения снижают уровень психоэмоционального напряжения тренируемых/тестируемых и являются эффективной профилактикой психосоматических расстройств, связанных с длительно действующими стресс-факторами [3].

Управление процессом тренажерной подготовки лиц опасных профессий требует контроля психофизиологического состояния тренируемого/тестируемого, который необходим при выявлении наиболее сложных для освоения элементов деятельности, индивидуализации процесса тренажерной подготовки с вычислением психофизиологической «цены» каждой производственной операции.

Однако психофизиологический контроль неизбежно связан с наложением различного вида датчиков, что не только затрудняет работу на тренажере, но во многих случаях является практически невозможным. Поэтому совершенствование методов тренажерной подготовки лиц ОП связано с внедрением бесконтактных технологий, позволяющих оперативно контролировать психофизиологическое состояние тренируемых/тестируемых с целью научного управления режимами тренировки.

Инновационной методикой для решения указанной задачи является технология виброизображения – анализ параметров рефлекторных движений головы и лица человека [4].

Поддержание вертикального равновесия головы человека, осуществляемое вестибулярной системой, может рассматриваться как функция, характеризующая вестибулярный рефлекс, и, одновременно, как частный случай двигательной активности, характеризующийся микродвижениями головы. Данное явление получило название вестибулярно-эмоциональный рефлекс (ВЭР), так как практически связывает параметры движения головы человека с его психоэмоциональным состоянием [4–6].

Анализ траектории движения головы по своей физиологической основе существенно отличается от анализа

эмоций человека на основе мимики лица, различные модели которого были предложены Экманом и Фридландом [7, 8]. Мимика лица хорошо отражает яркие и локальные проявления эмоций, однако малоэффективна при проведении автоматизированного анализа эмоций, так как не является постоянным физиологическим процессом, таким, например, как изменение артериального давления (АД), кожно-гальванической реакции (КГР), электрокардиограммы (ЭКГ), электромиограммы (ЭМГ) и других электрофизиологических сигналов. Временные и пространственные параметры микродвижений головы имеют корреляты в любых изменениях эмоций и психофизиологического состояния.

Рассматривая практические области применения технологии виброизображения следует отметить, что она является одной из самых известных технологий безопасности в мире и используется службами безопасности различных государств для проведения детекции лжи и выявления потенциально опасных и террористически настроенных людей на различных объектах и мероприятиях. Технология виброизображения защищена 5 патентами Российской Федерации, патентами США и Южной Кореи. С помощью систем виброизображения осуществлялся 100%-ный контроль психоэмоционального состояния зрителей Олимпийских игр в Сочи [9, 10].

Цель работы – научное обоснование эффективности технологии виброизображения при бесконтактной диагностике психофизиологического состояния во время тренажерной подготовки лиц опасных профессий на примере лиц, участвующих в обращении с отработанным ядерным топливом.

Материалы и методы исследования. Исследования проводились в рамках Российско-Норвежского сотрудничества по вопросам реабилитации сотрудников радиационно опасных объектов на Северо-Западе России (контракт №М18-15/02 от 23.02.2015 г.). Специалистами ГНЦ – Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И.Бурназяна (далее – Центр им. А.И.Бурназяна) совместно с сотрудниками НИИ молекулярной биологии и биофизики – НИИМББ (г. Новосибирск) был разработан программно-аппаратный комплекс (ПАК), реализующий интерактивные имитационные обучающие игры с биологической обратной связью в виртуальной среде с параллельной регистрацией парамет-

ров моделируемой деятельности и электрофизиологических показателей. Программно-аппаратный комплекс предназначен для психофизиологической тренажерной подготовки специалистов Центра по обращению с радиоактивными отходами (РАО) – отделение губа Андреева Северо-Западного центра «СевРАО» – филиала «РосРАО» (далее – «СевРАО»), участвующих в операциях по обращению с отработанным ядерным топливом.

Психофизиологическая подготовка направлена на развитие пространственно-временной координации, координационно-двигательного взаимодействия, повышение стрессоустойчивости, совершенствование характеристик внимания и памяти. Она реализуется на основе выполнения игровых задач, моделирующих работу персонала по перегрузке некондиционных отработавших тепловыделяющих сборок (ОТВС) водо-водяных реакторов утилизированных атомных подводных лодок с использованием психофизиологических аналогов условий реальной деятельности, воссоздаваемых с помощью технологии погружающей виртуальной реальности.

В ПАК реализованы обычный и стрессовый (ограничение времени работы и внешние звуковые помехи) режим разборки контейнеров, а также режим работы с БОС, при котором скорость перемещения инструментов зависит от способности тренируемого/тестируемого снижать частоту сердечных сокращений (ЧСС).

Модель реализована в виде симулятора мостового крана, на «крюк» которого навешивается различный (всего – 5 типов) инструмент для разборки деталей контейнеров с ОТВС (рис. 1). Снятая деталь пем-

реносится краном в специальную утилизационную тару. Управление краном и инструментом осуществляется манипулятором джойстик. Среднее время разборки одного контейнера – 5 мин.

В процессе моделируемой деятельности регистрировались 8 электроэнцефалограмм (ЭЭГ), пневмограмма (ПГ), кожно-гальваническая реакция, электромиограмма. Параметры электрофизиологических сигналов усреднялись за 20 с. Синхронно проводилась видеозапись лица тренируемого/тестируемого. Виброизображение обрабатывалось с использованием ПАК ВиброМЕД [11]. Всего было проведено 128 человекоисследований с участием специалистов Центра им. А.И.Бурназяна и СЗЦ «СевРАО».

Результаты проведенных исследований анализировались с использованием методов многомерного статистического анализа [12].

Результаты исследования и их анализ. Результаты проведенных исследований показали, что для достижения стабильного уровня скоростных показателей моделируемой деятельности тренируемым/тестируемым было необходимо разобрать в среднем 9–11 контейнеров (рис. 2). Точностные характеристики стабилизируются несколько позже.

Взаимосвязь скоростных и точностных показателей моделируемой деятельности с параметрами электрофизиологических сигналов оценивалась с использованием канонического корреляционного анализа [12].

В отличие от классического корреляционного анализа данный метод позволяет оценивать взаимосвязь между двумя многомерными наборами показателей. Сила взаимосвязи



Рис. 1. Общий вид рабочего окна психофизиологического тренажера

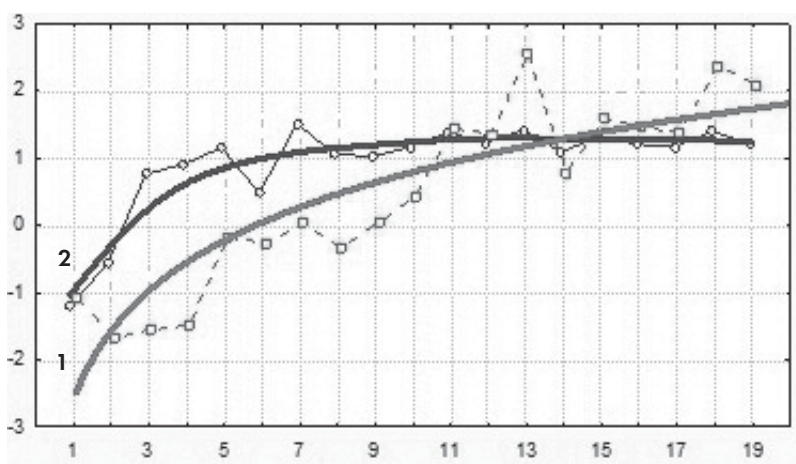


Рис. 2. Динамика нормированных (среднее значение – 0, среднее квадратическое отклонение – 1) интегральных скоростных и точностных показателей моделируемой деятельности. Показатели деятельности, усл. ед.: 1 – скорость, 2 – точность

оценивается путём вычисления коэффициента канонической корреляции – R. Характер взаимосвязи оценивается, аналогично факторному анализу, по величинам факторных нагрузок сравниваемых показателей в соответствующие математические конструкции, называемые каноническими переменными. Количество канонических переменных равно количеству показателей в минимальном из сравниваемых наборов. Для анализа используются канонические переменные, имеющие наибольший коэффициент канонической корреляции. Достоверность коэффициента канонической корреляции оценивается с использованием критерия Хи-квадрат (Chi-sqr).

В табл. 1 приведены рассчитанные коэффициенты канонической корреляции R, в табл. 2.1, 2.2 – факторная структура канонических переменных.

Полученные результаты показывают, что наибольший ($R=0,65$) и достоверный коэффициент канонической корреляции имеет 1-я каноническая переменная Root 1.

Ее «паттерн» показателей деятельности характеризуется сниженной скоростью действий, выполняемых с высокой точностью. При таких действиях соответствующий «паттерн» физиологических реакций тренируемого/тестируемого характеризуется снижением ЧСС, ДАС, кожной проводимости и увеличением частоты и амплитуды спонтанных реакций. В 76% случаев данная реакция наблюдалась в БОС-режиме тренировки и свидетельствовала о формировании навыков саморегуляции.

«Паттерн» показателей деятельности, соответствующий 2-й канонической переменной (Root 2), ха-

рактеризуется высокой скоростью и качеством моделируемой деятельности. Функциональный ответ тренируемых/тестируемых проявляется, прежде всего, в увеличении показателей КГР, что свидетельствует о повышении уровня их психоэмоционального напряжения. Данное состояние характерно для обычного режима и стресс-режима выполнения моделируемой деятельности. Однако коэффициент канонической корреляции между показателями деятельности и показателями электрофизиологических сигналов является хоть и значимым, но существенно более низким – 0,45.

По значениям 1-й канонической переменной через показатели электрофизиологических сигналов в шкале (0,1) была рассчитана психофизиологическая «цена» (ПФЦ) моделируемой деятельности.

На рис. 3 представлена динамика ПФЦ для тренируемого/ тести-

руемого: А – не мотивированного на достижение положительного результата и не достигшего его; В – мотивированного на достижение положительного результата и достигшего его; С – мотивированного на достижение положительного результата, но не достигшего его. Под полезным приспособительным результатом понимается сформированная способность к саморегуляции психофизиологического состояния – снижение ЧСС в процессе моделируемой деятельности.

На рис. 3 видно, что навыки саморегуляции в наибольшей степени сформировались у обследованного В, что отражается в снижении ПФЦ. Заметим, что 1-й – 3-й дни тренировки/тестирования относились к 2015 г. В 2016 г. в 1-й день (точка 4) навыки незначительно потерялись, но затем восстановились. У обследованного А 1-й – 4-й дни тренировки/тестирования также относились к 2015 г. Достоверного снижения ПФЦ у него не наблюдалось. Тренировки в 5-й – 8-й дни относились к 2016 г. и сопровождались повышением ПФЦ.

Таблица 1

Коэффициенты канонической корреляции R между скоростными, точностными показателями моделируемой деятельности и показателями электрофизиологических сигналов

Каноническая корреляция	R	Chi-sqr.	p
1-я	0,65	261,3276	0,000000
2-я	0,45	76,0813	0,000000

Таблица 2.1

Факторная структура канонических переменных показателей моделируемой деятельности, усл. ед.

Показатель деятельности	Root 1	Root 2
Скорость деятельности	-0,66	0,75
Точность деятельности	0,74	0,67

Таблица 2.2

Факторная структура канонических переменных показателей электрофизиологических сигналов

Показатель электрофизиологических сигналов	Root 1	Root 2
Стандартное отклонение RR-интервалов (std. откл RR), мс	-0,04	0,01
Частота сердечных сокращений (ЧСС), уд./мин	-0,54	-0,15
Дыхательная синусовая аритмия (ДАС), мс	-0,30	-0,07
Кожная проводимость (КПр), мкС	-0,21	0,50
Логарифм кожной проводимости (Ln КПр)	-0,04	0,48
Частота спонтанных реакций КГР (част. р.), 1/мин	0,39	0,15
Амплитуда спонтанных реакций (амп. р.), мкС	0,38	0,49
Частота дыхания (ЧД), дых./мин	-0,11	0,30
Длительность дыхательного цикла (ДДЦ), с	-0,02	-0,29
Соотношение длительности вдоха и выдоха (Rio)	-0,19	-0,05
Частота моды ЧД (част. моды), гц	0,06	0,47
Количество RR-интервалов на дыхательном цикле (NNbc)	-0,10	-0,30
Значение интегральной величины электромиограммы (ЭМГинт), мкВ	-0,18	0,14

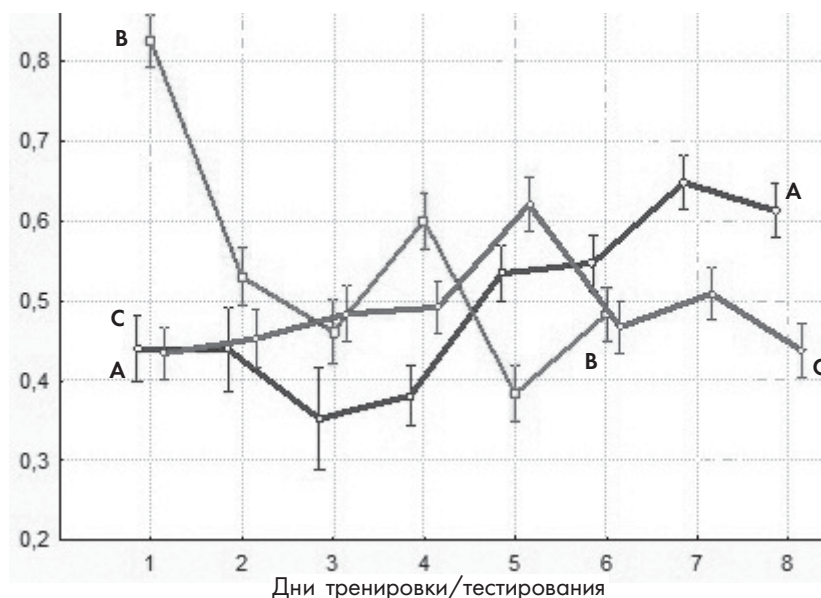


Рис. 3. Динамика психофизиологической «цены» (ПФЦ) моделируемой деятельности (усл. ед.) тренируемого/тестируемого: А – не мотивированного на достижение положительного результата и не достигшего его; В – мотивированного на достижение положительного результата и достигшего его; С – мотивированного на достижение положительного результата, но не достигшего его

У обследованного С (все исследования проводились в 2016 г.) до 5-го дня тренировки/тестирования эффекта уменьшения ЧСС не наблюдалось. Он проявился с 6-го дня в снижении ПФЦ.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что электрофизиологические сигналы могут быть успешно использованы для контроля психофизиологического состояния при тренажерной подготовке лиц опасных профессий. Однако необходимость накладки большого количества электродов делает невозможным их практическое применение. Для этого необходимо использовать бесконтактные измерительные технологии, наиболее перспективной из которых является, по нашему мнению, технология анализа виброизображения.

Вычисляемые параметры по данным виброизображения включают в себя: Т1 – параметр Агрессия; Т2 – параметр Стресс; Т3 – параметр Тревожность; Т4 – параметр Опасность; Т5 – параметр Уравновешенность; Т6 – параметр Харизматичность (Шарм); Т7 – параметр Энергичность; Т8 – параметр Саморегуляция; Т9 – параметр Торможение; Т10 – параметр Невротизм [11].

Как следует из названия перечисленных параметров, они, в первую очередь, предназначены для выявления лиц с преступными намерениями. Отсюда такие названия параметров, как «агрессия», «опасность» (для окружающих). Поэтому для дальнейшего исследования с использованием факторного анализа были

получены интегрированные параметры оценки актуального психофизиологического состояния, которые включают в себя: уровень стрессированности человека (УР-СТРЕС), уровень стабильности психофизиологического состояния (УР-СТАБ), уровень активации психофизиологических функций (УР-АКТ) и уровень психофизиологического самообладания (УР-САМ).

Для удобства практического использования перечисленные показатели были переведены в Т-балльную шкалу: среднее значение равнялось 50 баллам, среднеквадратичное отклонение – 10 баллам.

В табл. 3 приведены вычисленные значения коэффициентов канонической корреляции интегрированных параметров виброизображения с показателями электрофизиологических сигналов. Их количество (4) равно количеству показателей виброизображения. Из полученных результатов следует, что взаимосвязь показателей виброизображения с параметрами электрофизиологических сигналов очень высокая – максимальный коэффициент канонической корреляции равен 0,85.

В табл. 4.1, 4.2 приведена факторная структура канонических переменных (Root 1) показателей виброизображения и показателей электрофизиологических сигналов, соответствующая максимальному значению R. Из данных табл. 4.1, 4.2 следует, что ведущим в формировании высокой взаимосвязи показателей виброизображения и электрофизиологических сигналов является

уровень стрессированности (УР-СТРЕС) тренируемого/тестируемого – величина факторной нагрузки равна 0,98. Увеличение этого показателя отражается, прежде всего, в увеличении показателей кожно-гальванической реакции – высокие положительные нагрузки на показатели КПр (0,71), Ln КПр (0,6) – что является известным признаком увеличения психоэмоционального напряжения человека. Высокая отрицательная нагрузка (–0,6) на std. откл RR-интервалов показывает, что при этом повышается уровень централизации управления ритмом сердца, свидетельствующий о повышении напряжения регуляторных механизмов организма. Реакция дыхательной системы проявляется в увеличении частоты дыхания.

Для оценки взаимосвязи параметров виброизображения с качеством моделируемой операторской деятельности были выделены группы тренируемых/тестируемых с высокими (группа А) и низкими (группа В) скоростными и точностными характеристиками выполнения моделируемой деятельности.

Средние значения показателей качества деятельности и виброизображения и достоверность их различия между указанными группами представлены в табл. 5.

Полученные данные показывают, что низкое качество деятельности сопровождается более высоким уровнем психоэмоционального напряжения тренируемого/тестируемого, что проявляется в повышении уровня

Таблица 3

Коэффициенты канонической корреляции (R) интегрированных параметров виброизображения с показателями электрофизиологических сигналов

Каноническая корреляция	R	Chi-sqr.	p
1-я	0,85	1199,38	0,000000
2-я	0,78	694,45	0,000000
3-я	0,63	320,65	0,000000
4-я	0,51	120,03	0,000000

Таблица 4.1

Факторная структура канонических переменных (Root 1) показателей виброизображения, соответствующая максимальному значению R, баллы

Показатель виброизображения	Root 1
УР-СТРЕС	0,98
УР-СТАБ	0,25
УР-АКТ	–0,24
УР-САМ	–0,09

Таблица 4.2

**Факторная структура канонических переменных (Root 1)
показателей электрофизиологических сигналов,
соответствующая максимальному значению R**

Показатель электрофизиологических сигналов	Root 1
Стандартное отклонение RR-интервалов (std. откл RR), мс	-0,60
Частота сердечных сокращений (ЧСС), уд./мин	0,33
Дыхательная синусовая аритмия (ДАС), мс	-0,50
Кожная проводимость (КПр), мкС	0,71
Логарифм кожной проводимости (Ln КПр)	0,60
Частота спонтанных реакций КГР (част.р.), 1/мин	0,66
Амплитуда спонтанных реакций (амп.р.), мкС	0,10
Частота дыхания (ЧД), дых./мин	0,39
Длительность дыхательного цикла (ДДЦ), с	-0,23
Соотношение длительности вдоха и выдоха (Rio)	-0,19
Частота моды ЧД (част. моды ЧД), гц	-0,32
Количество RR-интервалов на дыхательном цикле (NNbc)	0,40
Значение интегральной величины электромиограммы (ЭМГинт), мкВ	-0,11

Таблица 5

**Средние значения показателей качества деятельности
и виброизображения в различных группах
тренируемых/тестируемых, усл. ед.**

Показатель	Группы по качеству деятельности		Значение t-критерия Стьюдента	p
	А	Б		
Скорость деятельности	0,49	-1,6	5,67	0,000000
Качество деятельности	0,7	-2,2	7,21	0,000000
УР-СТРЕС	46,1	64,4	-10,01	0,000000
УР-СТАБ	54,6	56,7	-1,94	0,053941
УР-АКТ	47,4	55,5	-4,55	0,000008
УР-САМ	49,5	46,5	2,86	0,004505

стрессуемости и активации, снижении уровня самообладания.

Выводы

1. Технология виброизображения является перспективным инновационным методом бесконтактной диагностики психофизиологического состояния при психофизиологическом обеспечении тренажерной подготовки лиц опасных профессий. Об этом свидетельствует высокая взаимосвязь параметров виброизображения с качеством деятельности и показателями электрофизиологических сигналов, установленная по данным тренировки/тестирования на психофизиологическом тренажере лиц, участвующих в обращении с отработанным ядерным топливом.

2. Практическое применение технологии виброизображения позволяет выявлять наиболее сложные для освоения фрагменты деятельности, индивидуализировать процесс тренажерной подготовки с вычислением психофизиологической «цены» каждой производственной операции как основного критерия степени освоения профессиональных навыков.

3. Перспективным направлением психофизиологического сопро-

вождения тренажерной подготовки является использование данных виброизображения контуров тела с оценкой проявления психофизиологических состояний в поведенческих реакциях тренируемых/тестируемых.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Требования к полномасштабным тренажерам для подготовки операторов блочного пункта управления атомной станции (ПНАЭ Г-5-40-97). М.: Госатомнадзор России, 1997.
2. Тренажеры и технические средства обучения. М.: Изд. дом «Оружие и технологии», 2009. Т.XVIII. 624 с.
3. Связь индивидуальных механизмов саморегуляции со свойством стрессоустойчивости / Щебланов В.Ю., Бобров А.Ф., Джафарова О.А., Надоров С.А. // Бюллетень сибирской медицины. 2010. №2. С. 134-139.
4. Минкин В.А. Виброизображение. СПб.: Реноме, 2007.
5. Минкин В.А., Штам А.И. Способ преобразования изображения: Патент RU 2187904.
6. Экман П. Психология лжи. СПб.: Изд. Питер, 2003.
7. Fridlund A.J. Human facial expression: An evolutionary view. San Diego, CA, Academic Press.
8. Минкин В.А., Целуйко А.В. Практические результаты применения систем технического профайлинга для обеспечения безопасности на транспорте // Транспортное право. 2014. №3.
9. Minkin V.A., Nikolaenko N.N. Application of Vibraimage Technology and System for Analysis of Motor Activity and Study of Functional State of the Human Body // Biomedical Engineering. 2008. V. 42. №4. P. 196-200. 2008 (Springer Science+Business Media, Inc.).
10. David M. Herszenhorn. Heightened Security, Visible and Invisible, Blankets the Olympics. The New York Times, Feb. 13, 2014.
11. Система контроля психоэмоционального состояния человека. Версия 8.1. Многопрофильное предприятие «ЭЛСИС: Электронный ресурс»: URL: http://www.psymaker.com/downloads/V18_1_ManualRus.pdf. Дата обращения: май, 2016.
12. Факторный, дискриминантный и кластерный анализ / Ким Дж.-О., Мьюллер Ч.У., Клекка У.Р. и др. / Пер. с англ. / Под ред. Енюкова И.С. М.: Финансы и статистика, 1989. 215 с.

Non-Contact Diagnostics of Psychophysiological State in Simulator Training of People in Hazardous Occupations

A.F.Bobrov, V.A.Minkin, V.Yu, Shcheblanov, E.S.Shchelkanova

The importance of psychophysiological support of simulator training for heightening the reliability of professional activity of people in hazardous occupations is substantiated. An innovative non-contact diagnostics of real-time psychophysiological status by parameters of vibraimage of human face is discussed. The high correlation of vibraimage parameters with quality of simulated activity and indices of electrophysiological signals is shown by the results of simulator training of people handling spent nuclear fuel. A conclusion is drawn that the results of the research make it possible to recommend a technology of vibraimage analysis as a methodological means of simulator training mode control.

Key words: handling of spent nuclear fuel, non-contact diagnostics, people in hazardous occupations, psychophysiological status, simulator training, vibraimage