

ПРОГРАММНО-АППАРАТНОЕ СРЕДСТВО МОНИТОРИНГА ГЕМОДИНАМИКИ КАК СРЕДСТВО МЕДИКО-ПЕДАГОГИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ТРЕНИРОВОЧНОГО ПРОЦЕССА

Борисенко М.В.¹, Шилько С.В.², Кузьминский Ю.Г.²

¹Белорусский государственный университет транспорта,

²Институт механики металлополимерных систем им. В. А. Белого НАН Беларуси

Аннотация. Исследование проведено в рамках задания К3.5.01 «Разработка методологии адресной тренировочной нагрузки на основе биомеханического анализа координационных, скоростных и силовых действий спортсменов».

Abstract. *This study has been conducted as part of the K3.5.01 “Development of a methodology of targeted exercise load using biomechanical analysis of the coordination, speed and strength in athletes’ performance.”*

Анализ проблемы и ее обсуждение. Сегодня особенно актуальна проблема индивидуального подбора режима тренировочных нагрузок адекватных уровню здоровья и специфике учебного процесса. Имеющие место увеличение объемов умственной нагрузки, нерациональная организация режимов обучения, питания, отдыха, низкая двигательная активность, воздействие негативных экологических факторов приводят к напряжению механизмов адаптации и риску возникновения патологий. Особого внимания при проведении тренировок требует сердечно-сосудистая система (ССС), звено, лимитирующее обеспечение организма кислородом, работающее в стрессовом режиме при не адекватной для организма нагрузке. Сердечно-сосудистые заболевания (ССЗ) часто имеют бессимптомный характер, и существует риск внезапных проявлений и внезапной сердечной смерти на тренировках и на соревнованиях. В экономически развитых странах внезапная смерть является одной из важнейших медико-социальных проблем. Так, в США внезапная остановка кровообращения ежегодно развивается у 200–450 тыс. человек, профилактике таких случаев уделяется внимание в учреждениях образования, выполняются финансируемые государственные программы. Доля внезапной внегоспитальной сердечной смерти в крупных городах достигает 39,4 % от всех случаев смерти. В структуре внезапной смерти спортсменов более 50 % приходится на ССЗ [2, 5, 5].

Необходимость регулярного контроля состояния здоровья студентов при нагрузках на занятиях физической культурой и в спортивной деятельности очевидна. Должна практически работать программа по мониторингу состояния ССС в образовательных и спортивных учреждениях во избежание риска внезапной остановки сердца или прогрессирования ССЗ в условиях интенсивных физических нагрузок.

В связи с этим остро стоит вопрос создания методов обследования и средств автоматизации сбора, обработки, хранения и представления результатов обследований, которые экономя время преподавателя или тренера, станут удобным инструментом медико-педагогического контроля. Применение научного подхода и компьютерных технологий привлекательно для студентов, по-

зволит повысить интерес к занятиям, активизирует участие в процессе, повысит уровень валеологической культуры.

Так как состояние ССС является основным показателем функционального состояния организма и готовности к нагрузкам, актуальна разработка методик и автоматизированных средств скрининг-обследований и регулярного мониторинга гемодинамики [1, 3, 6, 9, 0]. Определение функциональных возможностей и уровня напряжения ССС учащейся молодежи позволяет выявить донологические состояния, случаи низкой тренированности и детренированности, предотвратить состояния перетренированности при занятиях спортом.

Такие методики нужны для обоснования решений о допуске учащихся к занятиям физкультурой, при выборе тренером индивидуального режима спортивной подготовки и тактики выступлений. Для массового и регулярного применения данная диагностика должна быть неинвазивной, экономичной по времени проведения и материальным затратам [9, 0].

Целью работы является разработка метода и программно-аппаратного средства биомеханического исследования показателей гемодинамики и состояния сердца и сосудов для выявления донологических состояний и исследования реакции организма на физические и психо-эмоциональные нагрузки.

Методы исследования. При проведении исследования использованы методы расширенной осциллометрии, 0-D моделирование артериальной гемодинамики на основе теории течения вязких жидкостей в эластичных сосудах с учетом кислородного баланса, процедуры оптимизации и идентификации, а также нагрузочные тесты. Указанные методы реализованы в специализированном программно-аппаратном средстве «СПАС».

Преимуществом модели является учет высокоскоростных изменений стрессовой нагрузки, скорости пульсовой волны, деформации сосудов, кислотности, вязкости, систолического объема при физической нагрузке. Преимуществом «СПАС» являются неинвазивность, дистанционное и быстрое определение состояния СК при минимальных затратах и доступность исходных данных.

Результаты и обсуждение. Биомеханическая модель расчета показателей гемодинамики и методы хранения, статистической обработки и графической визуализации результатов обследования реализованы в компьютерной программе БИОДИС, составной части специализированного программно-аппаратного средства «СПАС».

В число процедур программы входят следующие:

- исходный анализ (initial analysis). Результаты расчета выводятся вместе с относительными величинами отклонения параметров от норм, рассчитанных по антропометрическим данным обследуемого;

- сопоставительный мониторинг (comparative monitoring). В качестве нормы рассматривается состояние R , полученное в результате обработки данных архива для конкретного пациента. Выводятся результаты и значения отклонения основных параметров от R ;

- статистический прогноз (prediction).

Таким образом, при регулярном мониторинге на основании информационной базы нормативных показателей и архива результатов биомеханического анализа обследуемого производится расчет и оценка текущих показателей гемодинамики.

Предоставляемая информация представлена в таблице и графиках:

- таблица текущих результатов обследования и оценок по каждому параметру. Полученные результаты сравниваются с соответствующими значениями нормы. Приводится общая оценка состояния ССС;

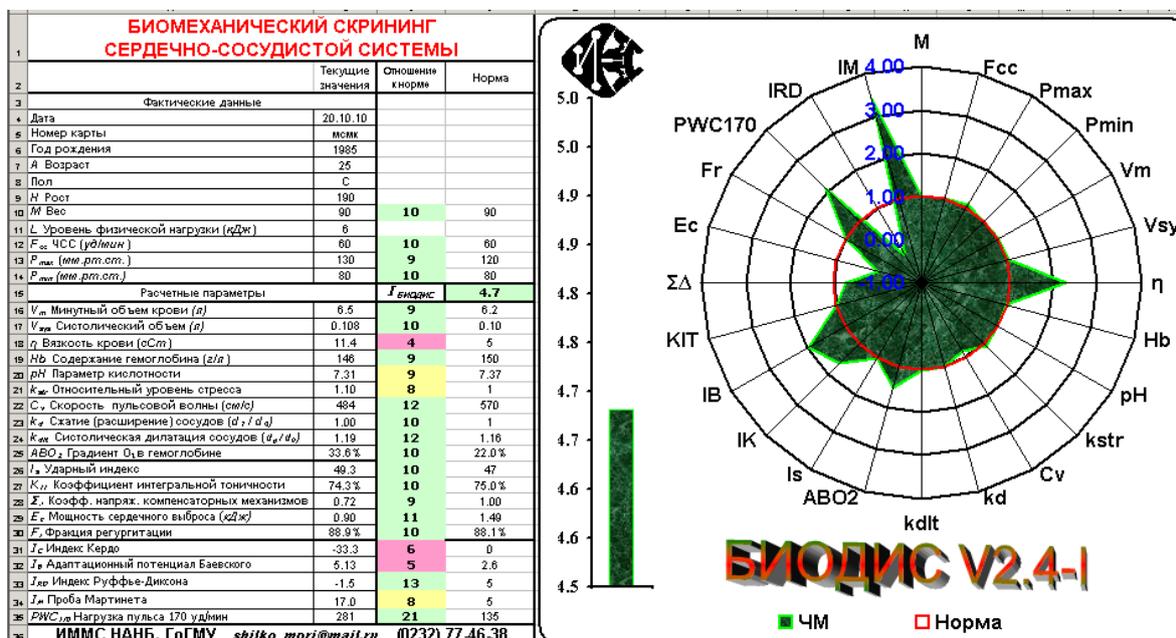


Рис. 1. Бланк результатов с графической интерпретацией индивидуального гемодинамического профиля

• «Лепестковая» диаграмма представляет собой «гемодинамический профиль» – это нормированное графическое изображение отклонений параметров обследуемого (зеленый фон) от стандартных значений (красная линия). Наглядно выводится также общая оценка (рис. 1).

• при проведении регулярных наблюдений составляется график изменений во времени 5 нормированных параметров – тонометрия, скорость пульсовой волны, ударный индекс, общая оценка (рис. 2).

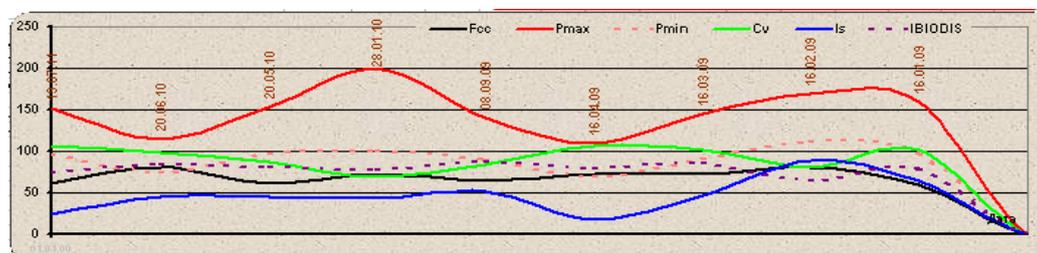


Рис. 2. График изменений параметров во времени

Статистическая обработка данных позволяет выявить разовые отклонения от нормальных для наблюдаемого показателей и развивающиеся тенденции. На основе имеющихся данных (в том числе о нагрузочных тестах) прогнозируются реакции и адаптационные резервы при различных психофизических нагрузках. Предусмотрена возможность дистанционного сбора информации.

Модель предусматривает учет уровня физической нагрузки при каждом исследовании. Функциональная недостаточность системы наиболее выражена в условиях нагрузки. Объективную оценку состояния позволяют получить тесты с дозированными нагрузками, отражающие реакцию регуляторных механизмов ССС на предъявляемую физическую нагрузку, динамику восстановления и определяют общую физическую работоспособность. При низкой тренированности наблюдается снижение УО сердца и увеличение ЧСС в покое, увеличение прироста пульса при физической нагрузке и замедление процесса восстановления. Для медико-педагогического мониторинга важны такие показатели моделирования средства «СПАС», как максимальное потребление кислорода (МПК), сердечный индекс (СИ), ударный индекс (УИ), артеровенозный дифференциал кислорода (AVO_2), уровень стресса (k_{str}).

Для сопровождения тренировочного процесса в расчетные модули системы включен модуль обработки результатов функциональных проб и вычисление индексов, которые представлены избыточно, чтобы соответствовать запросам различных пользователей. При формировании интегральной оценки результаты различных проб и индексы учитываются с различными весовыми коэффициентами в зависимости от спортивной специализации обследуемых и мнения эксперта (тренера) о значимости того или иного показателя.

Автоматизация обработки результатов тестов и вычисление индексов позволяет быстро получать и анализировать результаты массовых обследований для целых групп спортсменов и физкультурников, что должно способствовать практическому использованию системы мониторинга состояния ССС в учреждениях образования и спорта.

При массовом контроле состояния занимающихся физкультурой применяют функциональные пробы Мартине, Руфье позволяющие оценить переносимость динамической нагрузки. Тест Руфье принят как обязательный при допуске к занятиям физической культурой в учебных учреждениях Украины.

Для мониторинга состояния спортсменов массовых квалификаций применим Гарвардский степ-тест основанный на регистрации ЧСС после дозированной физической нагрузки и позволяет оценить ход восстановительных процессов. У здоровых людей время восстановления ЧСС и АД до исходных величин – в пределах 3 мин. Оценка результатов Гарвардского степ-теста в программе производится с учетом подготовленности и специализации (табл. 1).

Таблица 1 – Дифференциальная оценка результатов Гарвардского степ-теста

| Индекс Гарвардского степ-теста (ИГТС) | | | Качественная оценка |
|---------------------------------------|---|--|---------------------|
| здоровые нетренированные | представители ациклических видов спорта | представители циклических видов спорта | |
| Меньше 56 | Меньше 61 | Меньше 71 | Плохая |
| 56–65 | 61–70 | 71–80 | Ниже среднего |
| 66–70 | 71–80 | 81–90 | Средняя |
| 71–80 | 81–90 | 91–100 | Выше средней |
| 81–90 | 91–100 | 101–110 | Хорошая |
| Больше 90 | Больше 100 | Больше 110 | Отличная |

Оценка должна дополняться учетом типа реакции на нагрузку. Работоспособность считается хорошей в тех случаях, когда высокие цифры ИГСТ сопровождаются нормотонической реакцией. Удовлетворительной – когда высокие цифры ИГСТ сопровождаются гипотонической реакцией, свидетельствующей о напряжении и утомлении ССС, неудовлетворительной – при гипертонической, дистонической или ступенчатой реакции независимо от оценки ИГСТ.

Оценка физической работоспособности по тесту PWC_{170} в модификации В. Л. Карпмана позволяет на приемлемых для обследуемого нагрузках экстраполировать и подсчитать мощность нагрузки, вызывающей учащение пульса до 170 уд./мин. Тестирование следует проводить с применением техники, позволяющей точно отслеживать нагрузки, так как величина нагрузки является входной переменной моделирования.

Для контроля регуляторных механизмов гемодинамических процессов, рассчитываются индексы Баевского (расчётный индекс адаптационного потенциала ССС) и Кердо (статус вегетососудистой регуляции), вычисляемые на основе контролируемых данных, полученных в состоянии “покоя”. Изменения адаптационного потенциала достаточно четко отражают воздействие нагрузок, повышение напряжения и перенапряжения механизмов регуляции при развитии переутомления. В связи с большой индивидуальной вариативностью адаптационного потенциала изучение его уровня должно производиться в динамических обследованиях.

Вычисляются и другие принятые в спортивной практике индексы, позволяющие прогнозировать адаптационные резервы, эффективность функционирования ССС и оптимизировать тренировочный процесс.

Результатом обработки данных в программе является получение единого интегрального показателя с применением весовых коэффициентов для каждого из гемодинамических и функциональных показателей.

Было проведено обследование 164 студентов-физкультурников и сопоставление результатов в подготовительном и соревновательном периодах. Среднее значение пробы Руфье составило $6,88 \pm 2,4$ в подготовительный период и $7,31 \pm 2,8$ в соревновательный период. Выборка по результатам Гарвардского степ-теста имела значение $86,22 \pm 8,5$ для представителей ациклических видов спорта и $94,21 \pm 9,5$ – для циклических, однако только 18 % студентов показали нормотоническую реакцию на нагрузку. Индекс Кердо имел отрицательное значение практически во всей выборке, что и отразилось косвенно в результатах пробы Мартине (средняя оценка по 10-балльной шкале – 3,63). Общие результаты показали более высокую работоспособность в соревновательном периоде.

Автоматизация расчетов позволяет вывести статистические оценки для каждой специализации и квалификации, выявить коэффициенты линейной регрессии изменений изучаемых параметров от величины пробных нагрузок. Значимость полученных зависимостей обсуждается ниже. Фрагмент статистических данных для группировки спортсменов по уровню квалификации и итоговыми средними значениями для каждой группы представлен в табл. 2. Сравнительный анализ проведен для спортсменов, имеющих квалификацию кандидат в

мастера спорта (С/К), перворазрядников (С/1) и остальных спортсменов (С). Коэффициент регрессии показывает, что изменение ЧСС (F_{cc}), показателей давления P_{max} , P_{min} , минутного объема крови МОК (V_m), систолического объема (V_{sys}) и других величин на единицу изменения нагрузки имеет статистически значимые различия для спортсменов одного вида спорта разной квалификации.

Таблица 2 – Фрагмент базы статистических данных с группировкой спортсменов по уровню квалификации и итоговыми средними значения для каждой группы

| Группы по квалификации | F_{cc} | P_{max} | P_{min} | V_m | V_{sys} | pH | η | kstr | C_v |
|--|----------|-----------|-----------|-------|-----------|---------|---------|---------|---------|
| С/К $N = 172$ $M = 65$ $Age = 22$ $L = 30$ | 77 | 123 | 74 | 5,9 | 0,080 | 7,37 | 7,3 | 0,99 | 538 |
| | 106 | 151 | 85 | 10,0 | 0,095 | 7,10 | 6,7 | 0,92 | 561 |
| | 78 | 131 | 80 | 5,7 | 0,075 | 7,35 | 8,6 | 1,00 | 521 |
| | 69 | 129 | 78 | 5,7 | 0,087 | 7,36 | 8,7 | 0,97 | 501 |
| | 64 | 124 | 75 | 5,6 | 0,090 | 7,35 | 8,4 | 1,02 | 510 |
| Коэф-т регрессии | 0,98 | 0,94 | 0,35 | 0,13 | 0,0005 | -0,0088 | -0,0198 | -0,0024 | 0,7571 |
| С/1 $N = 177$ $M = 73$ $Age = 22$ $L = 30$ | 73 | 128 | 71 | 6,5 | 0,090 | 7,36 | 8,6 | 1,00 | 559 |
| | 111 | 148 | 76 | 12,2 | 0,112 | 7,12 | 6,9 | 0,96 | 464 |
| | 89 | 140 | 74 | 7,6 | 0,087 | 7,37 | 9,8 | 1,04 | 498 |
| | 79 | 126 | 72 | 6,9 | 0,088 | 7,35 | 7,4 | 1,06 | 545 |
| | 74 | 123 | 72 | 6,2 | 0,085 | 7,34 | 8,5 | 1,01 | 501 |
| Коэф-т регрессии | 1,29 | 0,69 | 0,18 | 0,19 | 0,0007 | -0,0081 | -0,0558 | -0,0012 | -3,1584 |
| С $N = 175$ $M = 67$ $Age = 22$ $L = 30$ | 71 | 123 | 74 | 5,7 | 0,081 | 7,36 | 8,4 | 1,00 | 501 |
| | 114 | 156 | 72 | 10,5 | 0,093 | 7,09 | 7,0 | 0,95 | 534 |
| | 88 | 144 | 72 | 7,2 | 0,084 | 7,38 | 8,9 | 1,02 | 558 |
| | 99 | 137 | 71 | 6,8 | 0,086 | 7,37 | 8,7 | 1,02 | 536 |
| | 71 | 130 | 69 | 6,1 | 0,085 | 7,36 | 9,2 | 1,00 | 511 |
| Коэф-т регрессии | 1,44 | 1,09 | -0,07 | 0,16 | 0,0004 | -0,0091 | -0,0459 | -0,0017 | 1,0822 |

Оценка уровня физического и функционального состояния спортсменов различных специализаций является недостаточно формализованной предметной областью. Врожденные особенности и выбранная спортивная специализация определяют «гемодинамический профиль спортсмена», который связан с характером выполняемых привычных физических нагрузок (табл. 3).

Создание классификационных моделей, характеризующих особенности гемодинамики спортсменов различных видов спорта, необходимо для более точной оценки состояния, научно обоснованного подбора тренировочного и соревновательного режимов.

Учет кислородного баланса позволяет определить параметры, характеризующие нагрузки различного типа, мощности, направленности и длительности. Различные типы энергообеспечения взаимодействуют, системно дополняя и сменяя друг друга, при нагрузках (табл. 4).

Таблица 3 – Классификация видов спорта в зависимости от типа и интенсивности физической нагрузки (на основе классификации Mitchell JH et al., 2005)

| | Низко-динамические ($< 40\% \text{ MaxO}_2$) | Средне-динамические ($40\text{--}70\% \text{ MaxO}_2$) | Высоко-динамические ($> 70\% \text{ MaxO}_2$) |
|---|---|---|---|
| Низко-статические ($< 20\% \text{ MVC}$) | бильярд, боулинг, крикет, гольф, керлинг, стрельба | настольный теннис, волейбол, бейсбол | бадминтон, теннис, спортивная ходьба, бег (марафон)**, лыжный спорт, спортивное ориентирование |
| Средне-статические ($20\text{--}50\% \text{ MVC}$) | автогонки*, конный спорт*, ныряние*, мотоциклетный спорт*, гимнастика, стрельба из лука, каратэ/дзюдо, парусный спорт | прыжки, бег (спринт) парное фигурное катание, синхронное плавание*, регби | баскетбол**, биатлон, хоккей на льду**, футбол*, лыжные гонки, бег на средние и длинные дистанции, одиночное фигурное катание, плавание*, гандбол |
| Высоко-статические ($> 50\% \text{ MVC}$) | гимнастика*, бобслей*, санный спорт*, боевые искусства, водные лыжи*, тяжелая атлетика*, метание ядра*, скалолазание*, парусный спорт | бодибилдинг*, борьба, скоростной спуск*, сноубординг*, скейтбординг* | бокс, бег на лыжах, горные лыжи, водное поло, каноэ, велосипедный спорт*, десятиборье, академическая гребля, конькобежный спорт*, триатлон* |

* – повышенный риск синкопальных состояний, ** – виды спорта, при которых зарегистрированы случаи внезапной сердечной смерти, MVC – максимальное произвольное сокращение, Max O₂ – максимальное потребление кислорода

Таблица 4 – Время активации, срока действия типов энергообеспечения нагрузки

| Источники | Время активации до максимума (с) | Срок действия | Продолжительность выделения энергии |
|-----------------------|----------------------------------|---------------------|-------------------------------------|
| Алактатные анаэробные | 0 | До 30 с | До 10 с |
| Лактатные анаэробные | 15–20 | От 15 с до 6 мин | От 30 с до 90 с |
| Аэробные | 90–180 | До нескольких часов | 2–5 мин и более |

При тренировках на выносливость в большей части задействован аэробный способ обеспечения работающих органов кислородом, здесь ключевым параметром мониторинга служит МПК. Когда механизмы транспорта и утилизации кислорода уже недостаточны для покрытия энергетических потребностей, включаются анаэробные механизмы образования энергии. Анаэробный порог является важным показателем тренированности спортсмена. Высокий уровень анаэробного порога позволяет спортсмену развивать и поддерживать высокую скорость в течение более длительного периода, не входя в зону кислородного долга. Авторами модели введен относительный уровень стресса k_{str} , коррелирующий с долей анаэробных источников энергии в общем обеспечении нагрузки. Таким образом, алгоритм оценки гемодинамики основан на выявлении классов функциональных состояний и применении логики принятия решения по оценке состояния спортсмена.

На рис. 3 приведены гемодинамические показатели тестирования студентов без спортивной специализации и при наличии квалификации в режиме «покой – 30 приседаний за 30 с – восстановление в течение 3 мин». Представлена динамика изменения коэффициента стресса, отображающего активность включения типов энергообеспечения нагрузки.

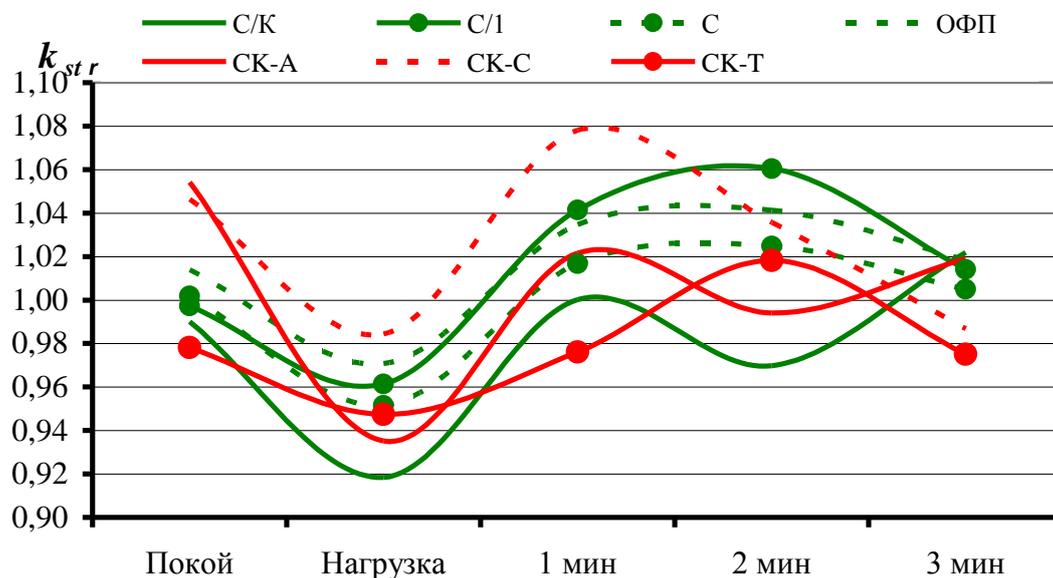


Рис. 3. Графики изменения величины k_{str} при нагрузочном тестировании у студентов со специализацией и высокой спортивной квалификацией и у студентов группы общей физической подготовки

Для студентов со специализацией и высокой спортивной квалификацией (легкая атлетика (СК-А), пулевая стрельба (СК-С), все кандидаты в мастера спорта (С/К), перворазрядники (С/1)) наблюдается сравнительно большая мобильность процессов регуляции, выражающаяся в динамике изменения k_{str} , чем у студентов группы общефизической подготовки (ОФП) и студентов специализации тяжелая атлетика (СК-Т). Таким образом, в результате тренировок со специфическими физическими нагрузками, многократных компенсаторно-приспособительных реакций и адаптации системы кровообращения развиваются долгосрочные адаптивные изменения со стороны ССС в соответствии с особенностями вида спорта.

Динамическая физическая нагрузка при участии большой мышечной массы вызывает резкое увеличение потребления кислорода. Это в свою очередь сопровождается адаптационной реакцией со стороны ССС, выражающейся в существенном увеличении УО, ЧСС и систолического АД при умеренном увеличении среднего АД и снижении диастолического АД на фоне снижения ПСС [5, 6]. Статическая нагрузка вызывает незначительное повышение потребления кислорода и сопровождается умеренным повышением ЧСС, при этом практически не изменяются УО и ПСС, но резко систолическое АД, диастолическое АД и среднее АД.

Адаптация ССС к регулярным динамическим нагрузкам приводит к совершенствованию процессов регуляции, что выражается в динамике изменения k_{str} , в увеличении МПК [7, 8] за счет увеличения МОК, повышении кислородтранспортной способности крови и способности тканей к утилизации кислоро-

да. Скелетные мышцы при этом также потребляют больше кислорода, содержат меньше глюкозы, в них увеличивается число митохондрий и возрастает число функционирующих капилляров, что приводит к увеличению артеровенозный дифференциала кислорода.

Полная интегральная оценка состояния ССС получается на основании обработки оценок 30 отдельных параметров (входные, контролируемые, выходные, специализированные коэффициенты).

Выводы. Верификация и опыт использования предлагаемой инновационной технологии (более 400 наблюдаемых, более 3000 тестов) свидетельствует о том, что она позволяет получить большое число показателей состояния ССС неинвазивным путем и при минимальных временных затратах.

Выявлены изменения параметров ССС спортсменов разной специализации и квалификации в процессе тренировок и проб. Установлена невозможность применения универсальной системы оценок состояния ССС и вытекающая отсюда необходимость создания экспертной системы.

Разработанное средство является доступным и наглядным, что позволяет человеку быть не только пассивным обследуемым, но и способствует его вовлечению в процесс мониторинга, формирует активную позицию в вопросе улучшения состояния своего здоровья. Практическое использование «СПАС» с привлечением современных информационных технологий (баз данных, WEB-сервисов) делает его средством массового первичного контроля и информационной поддержки спортивных тренеров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Инструментальные методы исследования в кардиологии / Г. И. Сидоренко [и др.] / под науч. ред. Г. И. Сидоренко. – Минск, 1994. – 272 с.
2. Sudden deaths in young competitive athletes: analysis of 1866 deaths in the United States, 1980-2006. / В. J. Maron [at al] // *Circulation*. – 2009. – № 119(8):10. – P. 85–92.
3. Баевский, Р. М. Введение в донозологическую диагностику / Р. М. Баевский, А. П. Берсенева – М.: Слово, 2008. – 216 с.
4. Национальные рекомендации по допуску спортсменов с отклонениями со стороны сердечно-сосудистой системы к тренировочно-соревновательному процессу // Рациональная фармакотерапия в кардиологии. – 2011. – т.7. – № 6: Приложение
5. Макаров, Л. М. Внезапная внебольничная сердечная смерть у детей, подростков и лиц до 45 лет / Л. М. Макаров, Ю. А. Солохин // *Кардиология*. – 2009. – № 11. – С. 33–38.
6. Лищук, В. А. Математические модели сердечно-сосудистой системы / В. А. Лищук // *Итоги науки и техники. ВИНТИ. Сер. Бионика. Биокибернетика. Биоинженерия*. 1990. – Т. 7. – С. 1–110.
7. Мельников А.А.. Комплексный анализ факторов, взаимосвязанных с реологическими свойствами крови у спортсменов / Дисс. д.б.н. Ярославль:, 2004. – 270 с.
8. Граевская, Н. Д. Спортивная медицина / Н. Д. Граевская, Т. И. Долматова. – М. : Советский спорт, 2004. – 195 с.
9. Логвин, В. П. Методы контроля и самоконтроля для оценки физического состояния при занятиях оздоровительной физической культурой и спортом: пособие / В. П. Логвин. – Минск: БГУФК, 2009. – 60 с.
10. Шилько, С. В. Возможности первичной диагностики сердечно-сосудистой системы на основе биомеханического анализа гемодинамики / С. В. Шилько, Ю. Г. Кузьминский, В. В. Аничкин, М. В. Борисенко М.В // *Проблемы здоровья и экологии*. – 2010. – Т. 14. – № 3. – С. 148–155.