

УДК 621.593

Моделирование процесса охлаждения поверхности кожного покрова пациента

Д-р техн. наук А. Ю. БАРАНОВ¹, канд. техн. наук Т. А. МАЛЫШЕВА

¹abaranov@corp.ifmo.ru

Университет ИТМО

191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9

Анализируется ситуация в области эмпирического подтверждения эффектов общего криотерапевтического воздействия (ОКВ). Мнения российских и зарубежных исследователей диаметрально противоположны. В России ОКВ успешно развивается, в зарубежных журналах о методе отзываются скептически. Это мешает экспорту отечественного оборудования и подрывает доверие к методу в России. В статье описывается попытка анализа зарубежной информации с помощью методики численного эксперимента. Путем сопоставительного эксперимента показано, что при неправильном выборе схемы и температурного режима ОКВ, результаты криовоздействия могут снизиться на порядок. На основе содержания зарубежных публикаций показано, что в описанных исследованиях использовано оборудование не пригодное для получения криотерапевтического эффекта. Высказаны рекомендации по выбору эффективного криотерапевтического оборудования.

Ключевые слова: общее криотерапевтическое воздействие, криотерапевтический комплекс, криотерапевтический эффект, продолжительность анальгетического действия, номинальная температура.

Информация о статье

Поступила в редакцию 02.02.2017, принята к печати 09.02.2017

doi:10.21047/1606-4313-2017-16-1-84-88

Ссылка для цитирования

Баранов А. Ю., Малышева Т. А. Моделирование процесса охлаждения поверхности кожного покрова пациента // Вестник Международной академии холода. 2017. № 1. С. 84-88.

Simulation of skin cryotherapy

D. Sc. A. Yu. BARANOV¹, Ph. D. T.A. MALYSHEVA

¹abaranov@corp.ifmo.ru

ITMO University

191002, St. Petersburg, Lomonosov str., 9

The article analyzes the situation in the field of empirical confirmation for the effectiveness of whole body cryotherapy (WBC). The views of Russian and foreign scientists on this issue diametrically oppose. WBC is developing successfully in Russia while foreign magazines remain skeptical about the method. This bounds export of Russian equipment and undermines the credibility of WBC in Russia. The article describes an attempt to analyze foreign experience by a numerical experiment. Using comparative experiment author shows that, if a wrong protocol and temperature regime of WBC were chosen, cryotherapeutic results might decrease by up to 10 times. Based on the articles about foreign experience, it was shown that the equipment used in those researches was unsuitable for receiving cryotherapeutic results. Some recommendations for proper equipment selection are given.

Keywords: whole body cryotherapy, cryotherapeutic system, cryotherapeutic effect, duration of analgesic action, nominal temperature.

Введение

Общее криотерапевтическое воздействие (ОКВ) — медицинская технология, основанная на искусственном охлаждении поверхности кожи пациента до температур от -2 до 2 °C. Такое переохлаждение раздражает пороговые холодовые рецепторы кожи и обеспечивает стимулирующее воздействие на центр терморегуляции центральной нервной системы (ЦНС) [1]. Для защиты центральной части тела пациента, так называемого ядра тела, для реализации ОКВ используют криогенные газовые с температурой не выше -130 °C [4]. Для проведения про-

цедур ОКВ производятся специализированные криогенные системы — криотерапевтические комплексы (КТК), которые состоят из теплоизолированной кабины пациента и системы ее криостатирования. В России разработаны и серийно производятся одноместные КТК. В других странах доминирует производство многоместных КТК, рассчитанных на одновременное размещение до 6 пациентов [6].

В Российской Федерации производятся исключительно одноместные КТК, 80% которых составляют криобассейны, разработанные сотрудниками кафедры криогенной техники Университета ИТМО. Высокие конку-

рентные преимущества отечественной аппаратуры практически полностью покрывают потребности медицинского рынка России в оборудовании для ОКВ. Отечественные КТК в 10–20 раз дешевле зарубежных аналогов и существенно превосходят последние по лечебной эффективности [5].

Доступность одноместных КТК создала условия для разноплановых медицинских исследований по клиническому применению техники и технологии ОКВ. За последние 10 лет в России защищено свыше 10 диссертаций, связанных с лечебным использованием криотерапии [6].

Клиническая практика использования одноместных КТК в России показала, что общая криотерапия обладает широким спектром позитивных воздействий на организм человека. Процедуры ОКВ на длительное время (до 8 ч), подавляют болевые ощущения любого происхождения, нормализуют работу важнейших систем организма. В список показаний к применению криотерапии входят сахарный диабет, ревматоидный артрит, псориаз и еще не менее 20 тяжелых патологий [8]. Процедуры ОКВ длятся не более 3 мин, но их позитивное действие сохраняется в течение 6–8 ч. Физиотерапевты относят криотерапию к неспецифическим методам лечения, поэтому список противопоказаний к применению ОКВ постоянно сокращается.

Хорошие эксплуатационные качества и богатая практика применения одноместных КТК создали условия для их экспорта, в том числе в страны, обладающие собственным производством криотерапевтической аппаратуры. В 2016 г. экспортировано свыше 70% одноместных криобассейнов.

Постановка задачи

В связи с экспортом отечественных КТК возникают проблемы недостаточной информированности зарубежных инвесторов в вопросах технических условий, обеспечивающих эффективное ОКВ. Это иллюстрируется материалами научных исследований посвященных спортивному применению криотерапевтической технологии [7, 9–15].

Интерес к использованию КТК в спортивной медицине в значительной степени связана с научно-практической деятельностью российских ученых в этом направлении [6]. Особую роль в популяризации спортивной криотерапии сыграли случаи использования КТК в крупных международных соревнованиях. Разработанная под научным руководством кафедры криогенной техники Университета ИТМО мобильная версия одноместного криобассейна, использовалась при проведении велогонки «Тур де Франс» и вошла в состав мобильного медицинского комплекса ФНБА РФ, который обеспечивал сборную России на Универсиаде в г. Казани и Олимпиаде в г. Сочи.

Исследовательские программы по использованию криотерапевтических процедур при подготовке членов национальных сборных развернуты во Франции, Польше, Японии, Беларуси [7]. Активность научных исследований в области спортивного применения ОКВ выразилась в большом числе публикаций [9–15]. В период с 2010

по 2016 гг. опубликовано свыше 90 статей зарубежных авторов на тему спортивного применения криотерапевтических установок. Публикации российских авторов по этой тематике практически отсутствуют. Это создает проблемы для экспорта отечественных КТК, т. к. в публикациях зарубежных авторов содержится информация, которая противоречит результатам клинических наблюдений в России и ставит под сомнение целесообразность использования КТК в тренировочном процессе.

Описываются результаты сравнительных исследований эффективности ОКВ, гипотермических ванн (8 °C) и ледяных компрессов на затылочную часть головы [15]. На основе анализа данных обследования трех групп спортсменов, получавших разные виды описанных выше физиотерапевтических процедур, авторы делают вывод, что по эффективности ОКВ незначительно превосходит традиционные холодовые процедуры. Но, по мнению авторов, финансовые затраты на реализацию технологии ОКВ не оправдываются достигаемыми результатами, которые могут быть обеспечены при использовании традиционных охлаждающих средств.

Отрицание явных лечебных преимуществ ОКВ перед гипотермическими ваннами, не соответствует клинической практике России. Например, общепризнана успешная практика лечебного применения ОКВ при ревматоидном артрите и псориазе, но никто не сможет добиться сопоставимых результатов при использовании ванн с холодной водой.

Необходимо проанализировать процессы, протекающие во время контакта кожного покрова пациента с криогенным газом и холодной водой, выявить причины расхождения результатов исследований эффектов ОКВ в России и зарубежных странах.

Методы исследования

В Университете ИТМО разработаны аналитические зависимости для количественного описания позитивных эффектов ОКВ и программное обеспечение для проведения соответствующих вычислительных экспериментов [2, 4, 6].

Наиболее иллюстративным и универсальным эффектом общей криотерапии является длительность анальгетического действия [6]. Эту количественную характеристику ОКВ достаточно легко определить по субъективным оценкам пациентов. Практика показывает, что в оптимальных условиях длительность анальгетического действия ОКВ составляет примерно 6 ч. Сотрудниками Университета ИТМО предложено выражение для расчета продолжительности анальгетического ОКВ в ходе численных экспериментов [6]:

$$\tau^* = f \cdot \int_{\tau=0}^{\tau \leq \tau_{\max}} \frac{a}{(T_s - 270,5)^n} d\tau, \quad (1)$$

где T_s — текущая температура поверхности кожи пациента $T_s = f(\tau)$; f — площадь контакта кожи с криогенным газом; τ_{\max} — максимально допустимая продолжительность охлаждения; константы: $a = 20$, $n = 2$, при которых значение τ^* вычисляется в минутах.

Максимально допустимая продолжительность охлаждения τ_{\max} определяется временем соблюдения условий

гипотермической безопасности пациента, по которым недопустимыми считаются снижение температуры поверхности тела до уровня $T_s \leq 271$ К температуры внутренней границы жирового слоя кожи до уровня $T_f \leq 309$ К [8].

Зависимость $T_s = f(\tau)$, может быть получена в результате вычислительного эксперимента на математической модели оболочки тела человека, которая представляет оболочку в виде плоского полуграниченного тела, составленного из эпителиального $\delta_s = 2$ мм, жирового $\delta_f = 10$ мм и мышечного слоев. Начальная температура слоя эпителия $T_s = 305$ К, мышечного слоя $T_m = 310$ К, жирового слоя $305 \leq T_f \leq 310$ К. Температура на пассивной границе объекта постоянна 310 К. Оболочка охлаждается за счет естественной конвекции теплоотводящей среды.

Математическая модель оболочки человеческого тела построена на базе одномерного уравнения энергии

$$\rho \frac{\partial h}{\partial \tau} = - \frac{\partial q_x}{\partial x} + q_v, \quad (2)$$

которое решается путем замены производных разностными приближениями. После преобразований [2, 5] получается выражение для расчета энтальпии элементарного участка на новом временном слое:

$$h'_i = h_i + \frac{(q_{i-1} - q_{i+1} + q_v \Delta x) \Delta \tau}{\Delta x \cdot \rho}, \quad (3)$$

где h_i, h'_i — теплосодержание материала в i -точке в моменты времени τ и $\tau + \Delta \tau$, соответственно; q_{i-1}, q_{i+1} — подвод теплоты от последующей и предстоящей узловых точек, соответственно; q_v — подвод теплоты от внутренних источников в объеме, отнесенном к i -точке; Δx — толщина элементарного участка, $\Delta y = \Delta z = 1$ м; ρ — плотность материала элементарного участка.

Источники теплоты для элементарного участка:

$$q_{i-1} \approx - \frac{(T_i - T_{i-1})}{\Delta x}; q_{i+1} \approx - \frac{(T_i - T_{i+1})}{\Delta x}; q_v = \rho \cdot q_g \quad (4)$$

Граничные условия:

$$i = 1; q_{i-1} = \alpha(T_1 - T_i); i = n, T_i = 310 \text{ К.}$$

Коэффициент естественно-конвективной теплоотдачи α вычисляется с учетом температуры T_1 и физических свойств теплоотводящей среды.

На математической модели оболочки тела был выполнен эксперимент по исследованию процесса охлаждения тела пациента криогенным газом с температурой 140 К и водой с температурой 281 К. Время пребывания в воде в соответствии с данными составляло 300 с.

Обсуждение результатов

Моделирование процесса переохлаждения поверхности тела пациента в жидкой теплоотводящей среде проводилось в изотермических условиях:

$$0 < \tau \leq \tau_{\max} = 300 \text{ с}; T_1 = 211 \text{ К.}$$

При моделировании воздействия газообразной средой учитывался закон изменения температуры охлаждающей среды. Во всех случаях пациент не может переместиться из окружающей среды в криогенный теплоноси-

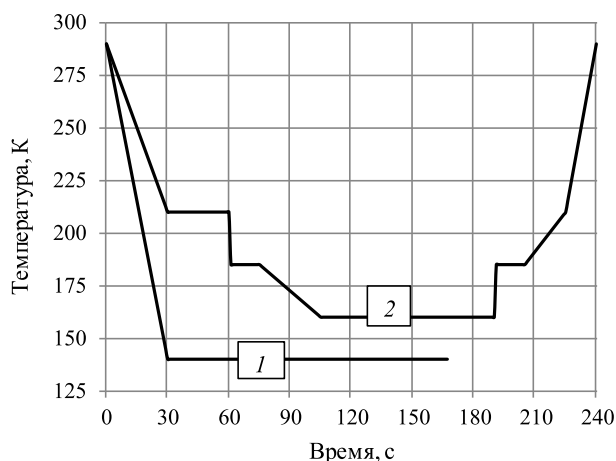


Рис. 1. График изменения температуры газообразной теплоотводящей среды в одноместном (1) и многоместном (2) КТК

тель мгновенно. В зависимости от конструкции КТК время выхода процедуры ОКВ на номинальный температурный режим может значительно изменяться.

В одноместных криобассейнах российского производства время выхода на установившийся температурный режим составляет не более 30 с [3, 6]. Пациента размещают в процедурной кабине, заполненной атмосферным воздухом, который в течении 30 с заменяют теплоносителем с номинальной температурой. По окончании процедуры, теплоноситель через открытые двери кабины сбрасывается в окружающую среду, поэтому температура газа вокруг тела пациента повышается почти мгновенно (рис. 1).

Многоместная кабина пациента отделена от окружающей среды одной или двумя шлюзовыми камерами, в которых поддерживается более высокая температура. При перемещении из окружающей среды в зону ОКВ и обратно, пациент проходит шлюзовую камеры с температурой -60°C .

Из-за этого температура охлаждающего газа снижается ступенчато и достигает номинального уровня только через 100 с [3]. Общая продолжительность сеанса не должна превышать 240 с. С учетом затрат времени на возврат из основной кабины в окружающую среду, пребывание пациента при номинальной температуре составляет только 90 с, что составляет 37,5% общей длительности сеанса ОКВ в многоместной кабине (см. рис. 1).

Кроме того необходимо учесть существенные различия в выборе номинальной температуры газа. В одноместных криобассейнах рабочая температура составляет 140 К. В многоместных КТК поддерживают температуру 160 К.

Моделирование процесса охлаждения поверхности тела пациента в воде с температурой 281 К, одноместном криобассейне с номинальной температурой газа 140 К и многоместном КТК с рабочей температурой 160 К, позволило рассчитать графики изменения температуры поверхности кожи (рис. 2).

Из графиков, показанных на рис. 2, можно сделать вывод, что охлаждение поверхности кожи в одноместном

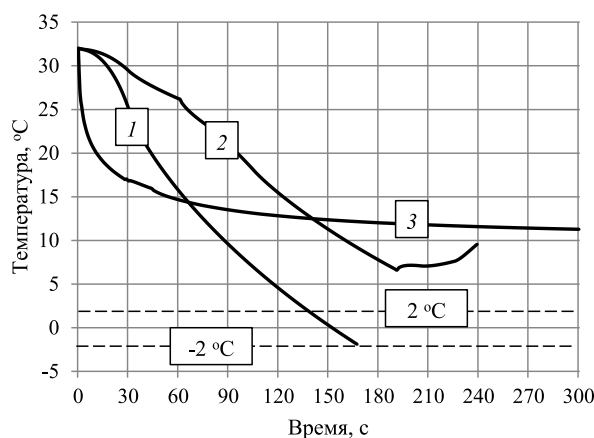


Рис. 2. Изменение температуры поверхности кожи пациента при разных вариантах охлаждения: 1 — одноместный КТК, $T_{ном} = 140$ К; 2 — многоместный КТК, $T_{ном} = 160$ К; 3 — вода, $T_{ном} = 281$ К

КТК обеспечивает достижение условий, необходимых для интенсивной стимуляции холодовых рецепторов кожи. На завершающем этапе ОКВ температура поверхности кожи достигла субтерминального уровня $t_s \leq 2^\circ\text{C}$ [1, 8], а охлаждение было прекращено по условию гипотермической безопасности $t_s \leq -2^\circ\text{C}$. В многоместном КТК минимальная температура составила 7°C , а к моменту завершения сеанса ОКВ температура кожи повысилась до уровня $9,5^\circ\text{C}$. Сравнение графиков изменения температуры поверхности кожи при разных способах охлаждения позволяет сделать вывод о том, что результаты отвода теплоты в многоместном КТК имеют большое сходство с результатами охлаждения водой.

Обработка зависимостей $T_s = f(\tau)$ позволила рассчитать продолжительность анальгетического действия процедур. В варианте № 1 время анальгетического действия ОКВ составило 274 мин, в вариантах № 2 и 3 получены значения 25 и 22 мин соответственно.

Обсуждение результатов

Результаты математического моделирования процесса охлаждения поверхности кожи в криотерапевтических комплексах и холодной воде согласуются с выводами зарубежных исследователей [9–15]. В отдельных случаях процедуры с использованием криогенных газовых сред обеспечивают крайне низкий лечебный результат. В частности, расчетное время анальгетического действия процедуры в многоместном КТК с номинальной температурой 160 К оказалось меньше, чем эффект от холодных ванн. Причина этого достаточно очевидна, выражение (1) определяет величину анальгетического эффекта путем интегрирования гиперболической функции от разности температур $T_s - 270,5$ К, в пределах временного интервала $\tau < \tau_{max}$. Продолжительность водных процедур заведомо больше (300 с), поэтому температура поверхности кожи поддерживалась на уровне менее 15°C в течение 235 с (см. рис. 2, линия 3). В многоместном КТК аналогичная температура сохранялась только 100 с, что и стало причиной получения меньшего результата

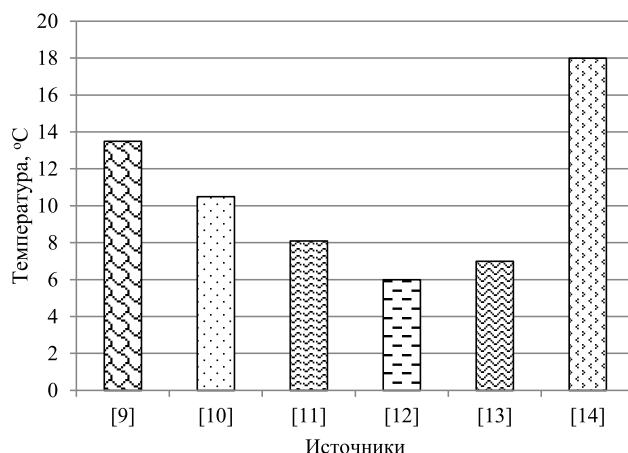


Рис. 3. Результаты измерения температуры поверхности кожи по завершению сеанса ОКВ

интегрирования. В тоже время, анальгетический эффект продолжительностью в 25 или 22 мин, пренебрежимо мал по сравнению с результатом охлаждения в одноместном КТК, поэтому не имеет практического значения.

Низкая эффективность многоместных КТК с номинальной температурой 160 К определяется неверным выбором температуры газа и нерациональной организацией процесса охлаждения. Пациент затрачивает на перемещение по шлюзовым камерам КТК более 60% времени сеанса ОКВ. Среднее значение температуры теплоносителя за цикл ОКВ в многоместном КТК составило 191 К, а в одноместном 152 К. Разница температур почти в 40 К качественно влияет на позитивный результат сеансов ОКВ.

Результаты математического моделирования процессов в многоместном КТК хорошо согласуются с данными о температуре кожи пациента после процедур ОКВ, опубликованными в литературе [9–13, 14] и представленными в виде гистограммы на рис. 3.

В статьях [9–11, 14] описаны результаты исследований на КТК с компрессионной системой криостатирования, которая поддерживает температуру не ниже -160 К [5]. Время пребывания пациентов в криогенной газовой среде в экспериментах, описанных в источнике [14], составляло только 180 с, что объясняет высокое значение температуры кожи по завершению сеанса.

Минимальные значения температуры кожи получены вовремя процедур в многоместных установках польского производства [12, 13]. В этих аппаратах в качестве хладагента используют жидкий азот, поэтому рабочая температура в основной кабине опускается до уровня -140 К, это позволяет снизить температуру поверхности кожи до уровня $6 \div 7^\circ\text{C}$.

Можно сделать вывод о том, что установленное авторами [9–11, 14, 16, 17] отсутствие явных преимуществ ОКВ перед традиционными гипотермическими методиками, является следствием неудачного выбора средств для реализации метода общего криотерапевтического воздействия, который стал возможным из-за незнания или неприятия теоретических основ эффективности криогенной физиотерапии.

Выводы

1. Результаты математического моделирования хорошо согласуются с данными, полученными путем прямых измерений, что свидетельствует о достоверности методики измерений и адекватности математической модели.

2. Минимальное значение температуры поверхности кожи зависит от выбора номинальной температуры охлаждающего газа в кабине пациента и выбора схемы проведения процедуры.

3. Проведение процедур в многоместных КТК нерационально, так как более 50% времени затрачивается на перемещение пациента из окружающей среды в процедурную кабину и обратно, из-за этого средняя за цикл температура охлаждающего газа оказывается значительно выше номинальной температуры в основной кабине КТК.

4. Проведение сеансов ОКВ в одноместных КТК с номинальной температурой 140 К, позволяет реализовать лечебные эффекты ОКВ, за счет оптимального выбора температуры теплоносителя и рациональной организации процесса охлаждения.

Литература (References)

1. Антонен Е. Г. Спинной мозг (анатомо-физиологические и неврологические аспекты) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.petrstu.ru/Chairs/Neuro/metod/content.htm> [Antonien E. G. Spinal cord (Anatomical and physiological and neurological aspects) (in Russian)]
2. Баранов А. Ю., Малышева Т. А. Моделирование нестационарного теплообмена в криомедицине // Вестник Международной академии холода. 2000. № 2. С. 38–41. [Baranov A. Yu., Malysheva T. A. Modeling unsteady heat transfer in cryomedicine. *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda*. 2000. No 2. p. 38–41. (in Russian)]
3. Баранов А. Ю., Малышева Т. А., Савельева А. В., Сидорова А. Ю. Выбор схемы общего криотерапевтического воздействия // Вестник Международной академии холода. 2012. № 4. с. 40–44. [Baranov A. Yu., Malysheva T. A., Savelyeva A. V., Sidorova A. Yu. Selecting the general scheme of cryo-therapeutic action. *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda*. 2012. No 4. p. 40–44. (in Russian)]
4. Баранов А. Ю., Малышева Т. А., Савельева А. В., Сидорова А. Ю. Перенос теплоты в объекте общего криотерапевтического воздействия // Вестник Международной академии холода. 2012. № 2, с. 35–40. [Baranov A. Yu., Malysheva T. A., Savelyeva A. V., Sidorova A. Yu. Heat transfer in the object of general cryo-therapeutic action. *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda*. 2012. No 2. p. 35–40. (in Russian)]
5. Баранов А. Ю., Баранов В. А., Малышева Т. А. Энергетические основы эффективности криотерапевтической аппаратуры // Физиотерапия, бальнеология и реабилитация. 2005. № 2. с. 29–31. [Baranov A. Yu., Baranov V. A., Malysheva T. A., Energetic basis of efficiency of cryotherapeutic equipment. *Fizioterapiya, bal'neologiya i reabilitatsiya*. 2005. No 2. p. 29–31. (in Russian)]
6. Баранов А. Ю., Малышева Т. А. Экспериментальная проверка результатов измерения температуры поверхности кожного покрова пациента до и после общего криотерапевтического воздействия // Лечебная физкультура и спортивная медицина. 2016. № 4 (136). С. 40–46. [Baranov A. Yu., Malysheva T. A. Experimental verification of patients' skin-surface temperature measurements before and after whole body cryotherapy. *Lechebnaya fizkul'tura i sportivnaya meditsina*. 2016. No 4 (136). p. 40–46. (in Russian)]
7. Маханёк А. А., Левин М. Л., Драгун В. Л. Теплофизические аспекты общей газовой криотерапии // Вести НАН Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. 2011. № 3. С. 59–71. [Makhaniok A. A., Levin M. L., Dragun V. L. Thermophysical aspects gas cryotherapy. *Founded by the national academy of sciences of Belarus, Physico-Technical Series*, 2011. No 3. P. 59–71.]
8. Шиман А. Г., Кирьянова В. В., Максимов А. В., Баранов А. Ю. Клинико-физиологические аспекты применения криотерапии // Вестник СПб ГМА им. И. И. Мечникова. 2001. № 1, С. 27–35. [Shiman AG, Kiryanov VV, Maksimov AV, Baranov AY, Clini-to-physiological aspects of the application of cryotherapy. *Vestnik SPb GMA im. I. I. Mechnikova*. 2001. No 1. p. 27–35. (in Russian)]
9. Amilton Vieira, Martim Bottaro, Joao B. Ferreira-Junior, Carlos Vieira, Vitor A. Cleto, Eduardo L. Cadore, Herbert G. Simões, Jake Do Carmo, and Lee E. Brown, Does whole-body cryotherapy improve vertical jump recovery following a high-intensity exercise bout? *Open Access J Sports Med*. 2015. P. 49–54.
10. Chris M. Bleakley, François Bieuzen, Gareth W. Davison and Joseph T Costello, Whole-body cryotherapy: empirical evidence and theoretical perspectives. *Open Access J Sports Med*. 2014. P. 25–36.
11. Costello JT, Donnelly AE, Karki A, Selfe J. Effects of whole body cryotherapy and cold water immersion on knee skin temperature. *Int J Sports Med*. 2014. P. 35–40.
12. Hausswirth C, Schaal K, Le Meur Y, Bieuzen F, Filliard J-R, Volondat M, Louis J. Parasympathetic activity and blood catecholamine responses following a single partial-body cryostimulation and a whole-body cryostimulation. [Electronic resource]. — Access mode: <http://www.uscryotherapy.com/assets/studies/hausswirth2013.pdf>
13. Cholewka A., Stanek A., Sieroń A., Drzazga Z. Thermography study of skin response due to whole-body cryotherapy. *Skin Res Technol*. 2012. P. 180–187.
14. Cholewka A., Drzazga Z., Sieroń A., Stanek A. Thermovision diagnostics in chosen spine diseases treated by whole body cryotherapy. *J Therm Anal Calorim*. 2010. P. 113–119.
15. Westerlund T., Oksa J., Smolander J., Mikkelsen M. Thermal responses during and after whole-body cryotherapy. *J Therm Biol*. 2003. P.601–608.
16. Mila-Kierzenkowska C., Wozniak A., Wozniak B., et al. Whole-body cryostimulation in kayaker women: a study of the effect of cryogenic temperatures on oxidative stress after the exercise. *J Sports Med Phys Fitness*. 2009;49 (2):. P. 201–207.
17. Banfi G., Melegati G., Barassi A., et al. Effects of whole-body cryotherapy on serum mediators of inflammation and serum muscle enzymes in athletes. *J Thermal Biol* 2009; 34: p. 55–59.