

УДК: 621.565.82, 521.564.25, 615.832.96

Разработка и апробация охлаждающего аэрозоля для спортивной медицины

Д-р мед. наук, профессор **Буторина А.В.** avbutorina@gmail.com

Российский национальный исследовательский медицинский университет имени Н.И. Пирогова

канд. техн. наук **Кондратенко Р.О.** rim19@mail.ru

д-р техн. наук **Нестеров С.Б.** rim19@mail.ru

НИИ Вакуумной техники имени С.А. Векшинского

Представлено описание опытных образцов охлаждающего аэрозоля для спортсменов «Ледяная волна», выпущенных в НИИВТ им. С.А. Векшинского. Получены экспериментальные данные по распределению температуры на охлаждаемой поверхности при дросселировании из сопла диаметром 0,1; 0,5; 1 мм пропан/бутан/R123 смеси на уровень температур $T_0 = -33; -25; -15, -10$ °С, применяемой для спортивной медицины. Получен рациональный для криотерапии в спорте период охлаждения биоткани от 3 до 10 минут, при быстром охлаждении до температуры 12 ± 2 °С на глубине до 3 мм.

Установлено, что применение аэрозоля, благодаря системе активного охлаждения, полностью проникает через кожу и дает положительный лечебный эффект, активизируя кровообращение в области поражения. Представлено описание изменения показателей микроциркуляции и скорости кровотока при воздействии охлаждающего аэрозоля. Суммарное время реабилитации травмированных спортсменов, пользовавшихся обезболивающей заморозкой сократилось почти в 2–3 раза. Новые технологии с использованием низких температур включены в комплекс восстановительных мероприятий и способствуют быстрейшему восстановлению спортивной работоспособности.

Ключевые слова: спорт, спортивная медицина, охлаждающий аэрозоль, охлаждение тонкой пленкой кипящей газовой смеси, экспериментальные данные по распределению температуры, пропан/бутан/R123.

Development and testing of cooling spray for sports medicine

D.Sc. **Butorina A.V.** avbutorina@gmail.com

Pirogov Russian National Research Medical University

Ph.D. **Kondrantenko R.O.** rim19@mail.ru

D.Sc. **Nesterov S.B.** rim19@mail.ru

JSC «Vekshinski Research Institute of Vacuum Technology»

The description of the cooling spray for athletes «Ice wave» (pre-production model) is given. It is developed and produced in the JSC «Vekshinsky Research Institute of Vacuum Technology». Experimental data are obtained on the temperature distribution on the cooled surface at throttling from the nozzle of 0,1; 0,5; 1 mm in diameter of the propane/butane/ R123 mixture to the temperature level $T_0 = -33; -25; -15, -10$ °C used in sport medicine. Rational cooling period for biotissue cryotherapy is obtained – from 3 to 10 minutes – at rapid cooling to 12 ± 2 °C to 3 mm depth.

It is established that cold penetrates through the skin and produces positive curing effect due to the enhancing of blood circulation in the damaged area. The description of microcirculation change data at the cooling spray application is given. The total rehabilitation time of athletes who used cooling spray is reduced by 2–3 times.

Keywords: sport, sport medicine, cooling spray, cooling by thin layer of boiling gas mixture, experimental data on the temperature distribution, propane/butane/ R123.

В последние годы, большое распространение в различных областях медицины и спорта получили методы лечения с использованием холода. Еще великий Гиппократ писал «Холод и помогает и убивает ...».

Одной из актуальных проблем современного спорта является повышенный травматизм. Количество травм на каждую тысячу спортсменов в различных видах спорта варьирует от 2 в легкой атлетике до 158 в регби [1, 5]. Это усложняет процесс спортивного совершенствования, вплоть до полного прекращения тренировочной и соревновательной активности.

К острым повреждениям и заболеваниям опорно-двигательного аппарата у спортсменов относятся: ушибы, растяжения, разрывы, вывихи, переломы.

Для успешного лечения последствий острых травм у спортсменов, а именно рассматривая травмы без нарушения анатомической непрерывности ткани (ушибы и растяжения), необходим поиск новых средств реабилитации.

Применение холода для утоления боли и купирования воспаления имеет достаточно древнюю историю. Еще в древности люди знали, что если к месту ушиба приложить что-то охлаждающее, например, лед, снег, пятак или смоченную в воде ткань, боль отступала, а синяки и гематомы проходили быстрее [2, 5–8].

Сегодня понятие «криотерапия» включает совокупность физических методов лечения основанных на отведении тепла с помощью жидких, твердых и газообразных рабочих тел (от влажных холодных обтираний до воздействия сверхнизкими и ультранизкими температурами). Криотерапия оказывают интенсивное охлаждающее действие на кожный покров. Причем, охлаждающее воздействие возможно как на отдельные участки, так и на организм человека в целом. [3, 4, 9].

Оценка человеком внешних температурных условий построена на информации, поступающей от кожных терморецепторов, которые контролируют температуру поверхности кожного покрова. Площадь кожного покрова, у взрослого человека, составляет в среднем $1,6 \text{ м}^2$. На 1 см^2 кожи размещается до 200 болевых, 25 тактильных, 2 тепловых и 12–15 холодных точек, причем холодные рецепторы залегают ближе к поверхности кожи ($0,17 \text{ мм}$), чем тепловые ($0,3 \text{ мм}$). Общее число терморецепторов около 280 тысяч, в том числе 250 тысяч холодных. Таким образом, холодных рецепторов кожи в 10–15 раз больше, чем тепловых. Холодные рецепторы включаются при снижении температуры поверхности кожи до $+12 \text{ }^\circ\text{C}$. Их преобладание позволяет предположить, что воздействие низкими температурами способно оказывать выраженное действие как на местном, так и на центральном уровнях [2, 7–8]. Способ размещения рецепторов обеспечивает точное наблюдение за изменением температуры поверхности эпителия, которая определяется интенсивностью отвода тепла к охлаждающей среде.

В спортивной медицине для охлаждения поврежденных участков ткани с целью достижения быстрого эффекта анальгезии широко используется процедура нанесения на кожу тонкой пленки кипящей газовой смеси при температуре $T_0 = 0 \dots -35 \text{ }^\circ\text{C}$ [4, 6]. С физико-биологической точки зрения понижение температуры кожи уменьшает скорость передачи нервных импульсов, а при температуре $(12 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$ на глубине 3 мм от поверхности кожи проведение нервных импульсов полностью блокируется. Такая температура легко достигается при использовании охлаждающего аэрозоля.

На рисунке 1 представлен наглядный пример распределения температуры в различные промежутки времени после распыления охлаждающего аэрозоля (температура охлаждения $T_0 = -33 \text{ }^\circ\text{C}$) в течение одной секунды на руку человека. Изображение получено с помощью термографа «ИРТИС-2000 С». В результате наблюдается снижение мышечного тонуса и выраженный обезболивающий эффект при болевых синдромах различного происхождения. Кроме этого при охлаждении происходит сужение сосудов, увеличение электрического сопротивления тканей, снижение уровня тканевого метаболизма и потребления кислорода, подавление аллергических реакций. Вследствие улучшения оттока лимфы из тканей исчезают отеки.

При этом исключается замерзание ткани (необратимая криодеструкция клеток) на охлаждаемой поверхности, т.е. ее температура не должна быть ниже температуры кристаллизации клеток $T_3 \approx -2 \text{ }^\circ\text{C}$. Следовательно, в случае применения хладоносителя с температурой $T_0 < -3 \text{ }^\circ\text{C}$, необходимо прогнозировать предельный безопасный период охлаждения заданного участка биоткани (кожи, слизистой оболочки), который заканчивается моментом достижения температуры замерзания ткани T_3 на поверхности.

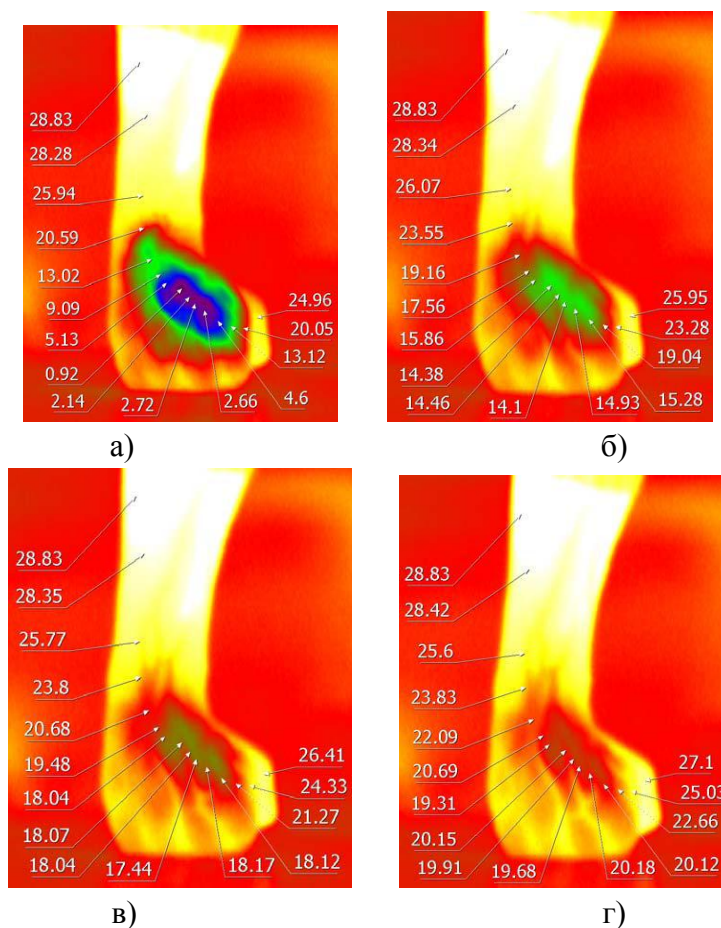


Рис. 1. Распределение температуры на поверхности руки человека, выраженной в °С, в различные промежутки времени после распыления охлаждающего аэрозоля (температура охлаждения $T_0 = -33$ °С) в течение 1 секунды с расстояния 20 см: а) сразу после охлаждения; б) через 20 секунд после охлаждения; в) через 40 секунд после охлаждения; г) через 60 секунд после охлаждения

Для оценки количества отводимого тепла Q_0 хладоносителем с температурой насыщения T_0 от поверхности ткани S_3 получены экспериментальные данные по распределению температуры на охлаждаемой поверхности при дросселировании из сопла диаметром 0,1; 0,5; 1 мм пропан/бутан/R123 смеси на уровень температур $T_0 = -33; -25; -15, -10$ °С, применяемой для нужд спортивной медицины [4, 6–8].

На рис. 2 представлен пример графика изменения температуры кожи руки во времени. Такие графики позволяют проследить динамику изменения температуры ткани во времени при ее охлаждении и отогревании, определить предельный безопасный период $\Delta t_{\text{б}}$ охлаждения заданного участка биологической ткани (кожи, слизистой оболочки), который заканчивается моментом достижения температуры замерзания ткани $T_3 = -2$ °С [3, 5, 10], а также определить время, спустя которое необходима повторная процедура охлаждения.

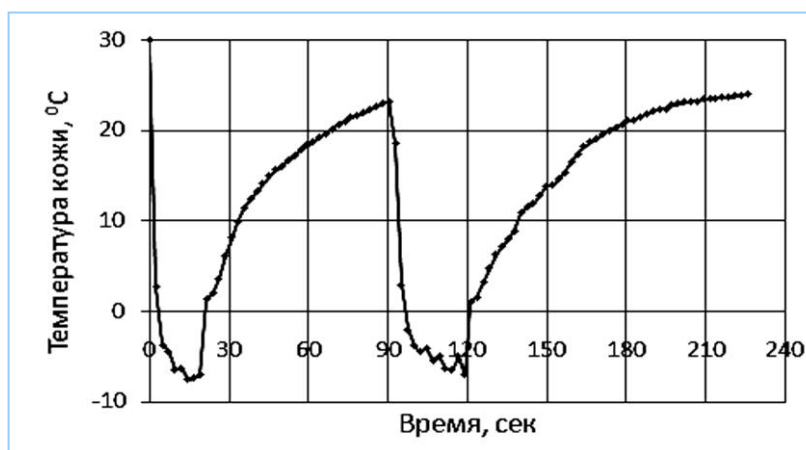


Рис. 2. Измерение температуры кожи руки во времени при циклическом распылении смеси пропан-бутан (40/60 % мольн.) $T_0 = -33\text{ }^{\circ}\text{C}$, расстояние до сопла $L = 100\text{ мм}$, диаметр сопла $d = 0,5\text{ мм}$, давление в баллончике 5,5 атм

На рис. 3 представлено распределение температуры кожного покрова после охлаждения смесью пропан/бутан (40/60 % мольн., $T_0 = -33\text{ }^{\circ}\text{C}$) и льдом (цилиндр диаметром 20 мм, высотой 30 мм).

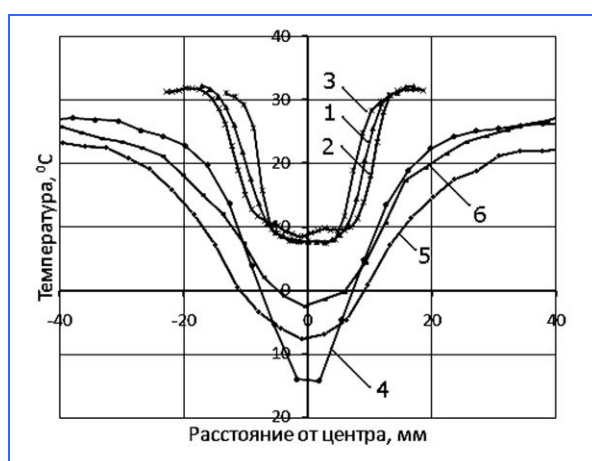


Рис. 3. Распределение температуры кожного покрова после охлаждения смесью пропан/бутан (40/60 % мольн., $T_0 = -33\text{ }^{\circ}\text{C}$) и льдом (цилиндр диаметром 20 мм, высотой 30 мм):
 1 – лёд, $t = 30\text{ сек}$; 2 – лёд, $t = 60\text{ сек}$; 3 – лёд, $t = 90\text{ сек}$;
 4 – спрей $T_0 = -33\text{ }^{\circ}\text{C}$, $L = 50\text{ мм}$, $d = 0,1\text{ мм}$, $t = 5\text{ сек}$;
 5 – спрей $T_0 = -33\text{ }^{\circ}\text{C}$, $L = 100\text{ мм}$, $d = 0,1\text{ мм}$, $t = 36\text{ сек}$;
 6 – спрей $T_0 = -33\text{ }^{\circ}\text{C}$, $L = 150\text{ мм}$, $d = 0,1\text{ мм}$, $t = 69\text{ сек}$;
 L – расстояние от сопла, d – диаметр сопла, t – время воздействия

Из графиков видно различие по уровню достигаемых температур. Локальное охлаждение льдом не позволяет получить температуру на поверхности кожного покрова менее $7\text{ }^{\circ}\text{C}$, что делает этот способ охлаждения менее эффективным, чем охлаждение аэрозолем, в свою очередь охлаждение аэрозолем позволяет получать температуры много ниже температуры замерзания ткани $T_3 = -2\text{ }^{\circ}\text{C}$, однако для получения обезболивания в кратчайший срок без опасности обморожения требуется, чтобы время распыления t не превышало предельный безопасный период $\Delta t_{\text{Б}}$ охлаждения заданного участка биоткани.

На основе полученных данных в НИИ Вакуумной техники имени С.А. Векшинского разработаны и выпущены опытные образцы охлаждающего аэрозоля для спортсменов «Ледяная волна» (рис. 4) с указанием наиболее рационального способа распыления. Смесь охлаждающего аэрозоля «Ледяная волна» имеет следующий состав: 1, 1, 1, 2-тетрафторэтан (R134a), бутан, пропан, изобутан, растительное масло персиковое, настойка календулы, изопропиловый спирт, эфирное масло лавандовое. Смесь находится в состоянии насыщения под давлением выше атмосферного.



Рис. 4. Охлаждающий аэрозоль для спортсменов «Ледяная волна»

Предлагаемое к испытаниям средство для местного применения (аэрозоль «Ледяная волна») представляет собой обоснованную попытку реализовать в практике спортивной медицины новые достижения отечественных исследователей. Мы старались провести оценку влияния охлаждающего аэрозоля для спортсменов «Ледяная волна» на симптомы острых повреждений опорно-двигательного аппарата, оценить интенсивность болевого синдрома, микроциркуляции и сроков времени и качества восстановления спортивной работоспособности.

Технический результат может быть получен при распылении данного средства на травмированное место. Он выражается в быстром охлаждении травмированного места с наступлением анальгезирующего действия, получении антибактериальной защиты и защиты от обморожения, предупреждении отека, воспаления, образования гематом. Данное средство является более действенным и удобным, чем, например, ледяной компресс, водяные примочки или хлорэтил. Внутреннее устройство охлаждающего аэрозоля представлено на рис. 5. Давление хладагента в баллончике 5–6 атм. Смесь при выходе из баллончика охлаждается до -10°C .

Сотрудники кафедры реабилитации и спортивной медицины Российского национального исследовательского медицинского университета им. Н.И. Пирогова выполнили апробацию разработанного обезболивающего охлаждающего аэрозоля «Ледяная Волна» [6].

Было проведено сравнение двух групп 58 спортсменов (40 мужчин и 18 женщин), в возрасте старше 18 лет, с острыми повреждениями опорно-двигательного аппарата (ушибы и растяжения мышц и связок). Из них 35 пациентов – в экспериментальной группе (средний возраст – $20 \pm 0,5$ лет), 23 пациента – в группе сравнения (средний возраст – $22 \pm 0,5$ лет). Спортивная специализация – единоборства (самбо, сумо, боевое самбо).

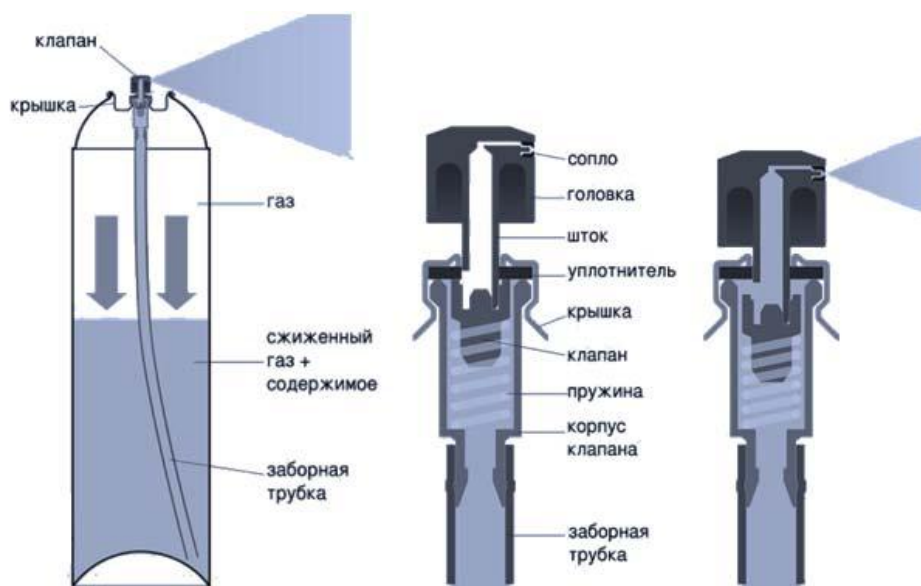


Рис. 5. Внутреннее устройство охлаждающего баллончика

При проведении исследований и обработки данных анализировались изменения, наступавшие в результате применения различных программ лечения:

Первая группа – получала лечение замораживающим средством «Ледяная волна»: т.е. экспериментальная группа.

Вторая группа – группа сравнения, когда применялись другие методы лечения, использовалась локальная гипотермия (лед), давящие повязки.

Системное лечение анальгезирующими препаратами не проводилось ни в экспериментальной группе, ни в группе сравнения.

Во время ушиба аэрозоль распыляли равномерно на кожу в области повреждения, оставляли на коже в течение 1–3-х минут, при необходимости повторного обезболивания процедуру повторяли с промежутком в 5–15 минут. Общая продолжительность исследования составляла 4 недели. Каждый пациент получал 3-х недельное лечение с последующим наблюдением в течение 1 недели, после чего осуществлялась итоговая оценка. Во время исследования каждый из пациентов совершал по 4 визита в клинику; промежутки между посещениями составляли 7 дней.

Противопоказанием являлось повреждение кожного покрова в области лечения; непереносимость и повышенная чувствительность к холоду; и другие факторы, затрудняющие участие пациента в исследовании (например, запланированные долгие поездки и др.).

Первичные критерии эффективности лечения проявлялись в уменьшении болевого синдрома и отеков, рассасывании гематом, восстановлении микроциркуляции, восстановлении спортивной работоспособности. Основным критерием для оценки эффективности охлаждающего аэрозоля служило время, за которое травмированный спортсмен мог возвратиться к тренировкам и соревнованиям.

Вторичные критерии эффективности были следующие: улучшение субъективной оценки самочувствия, увеличение объема пассивных и активных движений в поврежденных сегментах, ускорение периода восстановления и возврат к тренировочным объемам нагрузок.

Для оценки эффективности охлаждающего аэрозоля «Ледяная волна» проведены следующие исследования:

- оценка выраженности болевых ощущений по Словесной рейтинговой шкале в покое, при пальпации, при движении, «стартовой» боли, боли после нагрузки, ночной боли (в баллах: 0 – отсутствие боли, 1 – незначительная боль, 2 – слабая боль, 3 – умеренная боль, 4 – сильная боль, 5 – нестерпимая боль);

- оценка локального воспаления по сумме 3 показателей: отек, гиперемия, гипертермия (каждый показатель оценивается по 5-балльной системе: 0 – признак отсутствует; 1 – признак выражен незначительно; 2 – признак выражен слабо; 3 – признак выражен умеренно; 4 – признак выражен значительно; 5 – признак резко выражен);

– оценка динамики рассасывания гематомы измерением наибольшего размера гематомы;
 – оценка микроциркуляции и ее динамики в области повреждения (с помощью доплерографа ультразвукового компьютеризированного «Минимакс-доплер-К»). Оцениваются следующие параметры: линейная скорость кровотока, объемная скорость кровотока, индексы PI, RI, ISD. Измерения последовательно проводятся на пораженном участке и симметричном ему участке тела (для определения «нормальных» параметров микроциркуляции).

Исследование было направлено на выявление динамических отличий между выборками (аэрозоль «Ледяная волна» и отсутствие наружного лечения, т.е. экспериментальная группа и группа сравнения, при дуге лечения). Обе группы при первичном обследовании статистически значимо не различались ни по одному из анализируемых параметров.

Анализ по данным словесной рейтинговой шкалы продемонстрировал преимущества местного применения аэрозоли «Ледяная волна»: степень статистически значимого уменьшения достигала в экспериментальной группе – 75 %, против 36 % – в группе сравнения, т.е. было отмечено практически двукратное превосходство.

Применение средства «Ледяная волна» отличалось более высокой обезболивающей активностью. Особенно разительные отличия были отмечены по двум показателям – боли при движении и боли после нагрузки. То есть аэрозоль «Ледяная волна» оказывает преимущественное влияние на важнейшие симптомы травматических повреждений опорно-двигательного аппарата: боль во время и после физических нагрузок.

Динамика показателя выраженности локального воспаления в анализируемых группах спортсменов с повреждениями опорно-двигательного аппарата до начала лечения в процессе лечения продемонстрировал преимущества местного применения средства «Ледяная волна» (табл. 1).

Таблица 1

Динамика показателей микроциркуляции в процессе лечения

Показатели	До лечения	После лечения	P ₁₋₂	P _{a-б}
	1	2		
А) применение аэрозоли «Ледяная волна» (первая группа)				
Линейная скорость кровотока, см/с:				
а) на неповрежденном участке,	13.94±0.942	14.88±0.940	>0.1	1. <0.001
б) на границе повреждения	9.67±0.620	12.4±0.632	<0.001	2. <0.05
Объемная скорость кровотока, мл/мин:				
а) на неповрежденном участке,	8.69±0.626	9.98±0.603	>0.1	1. <0.05
б) на границе повреждения	7.07±0.505	8.45±0.597	<0.001	2. >0.05
Индекс пульсации (PI):				
а) на неповрежденном участке,	1.54±0.101	1.68±0.120	>0.1	1.>0.1
б) на границе повреждения	1.69±0.102	1.71±0.103	>0.1	2.>0.1
Индекс периферического сопротивления (RI):				
а) на неповрежденном участке,	0.71±0.021	0.75±0.032	>0.1	1.>0.05
б) на границе повреждения	0.66±0.021	0.74±0.021	<0.001	2.>0.1
Б) Без наружного лечения аэрозоли «Ледяная волна» (вторая группа)				
Линейная скорость кровотока, см/с:				
а) на неповрежденном участке,	14.84±0.767	15.15±0.714	>0.1	1. <0.001
б) на границе повреждения	10.54±0.619	11.94±0.609	<0.01	2. <0.01
Объемная скорость кровотока, мл/мин:				
а) на неповрежденном участке,	8.84±0.540	9.57±0.469	>0.1	1. <0.05
б) на границе повреждения	7.21±0.547	8.0±0.542	>0.05	2. <0.05
Индекс пульсации (PI):				
а) на неповрежденном участке,	1.79±0.124	1.81±0.130	>0.1	1.>0.1
б) на границе повреждения	1.59±0.148	1.80±0.125	>0.05	2.>0.1
Индекс периферического сопротивления				

(RI):				
а) на непораженном участке,	0.71±0.013	0.74±0.026	>0.1	1.>0.1
б) на границе повреждения	0.68±0.018	0.71±0.013	>0.05	2.>0.1

Помимо сопоставления значений анализируемых показателей микроциркуляции до и после лечения в исследуемых группах по этим параметрам были прослежены темпы инволюции патологической симптоматики травматических повреждений. Для этого были изучены данные, полученные на 7-ой день лечения.

В экспериментальной группе к 7-ому дню лечения линейная скорость кровотока (V), измеренная на визуализируемой границе повреждения, увеличилась в среднем на 21,1 %. Объемная скорость кровотока (Q) возросла на 14,6 %. Измерения в неповрежденной области, дистальнее травмы мягких тканей, также продемонстрировали положительную динамику: линейная скорость кровотока увеличилась на 20,4 %, объемная на 16,5 %. В группе сравнения через 7 дней линейная скорость кровотока увеличилась лишь на 8,6 %, а объемная – на 7,4 %. (табл. 2)

Таблица 2

**Изменение скорости кровотока под действием охлаждающего аэрозоля
«Ледяная волна» в экспериментальной группе**

V1		V2		Q1		Q2	
До лечения	Через 7 дней	До лечения	Через 7 дней	До лечения	Через 7 дней	До лечения	Через 7 дней
13,94	16,79	9,67	11,72	8,69	10,13	7,07	8,1

Примечания:

V1 - Линейная скорость кровотока на непораженном участке (мм/с),

V2 - Линейная скорость кровотока на границе повреждения (мм/с),

Q1 - Объемная скорость кровотока на непораженном участке (мл/мин),

Q2 - Объемная скорость кровотока на границе повреждения (мл/мин).

Дальнейшие исследования показали, что к концу второй недели проводимого лечения у большинства пациентов экспериментальной группы наблюдалось ускорение регенеративных процессов в тканях, окружающих повреждение. В результате активации регенераторных возможностей организма подвергавшийся механическому воздействию участок кожной поверхности восстанавливал свой исходный цвет. Это так же было подтверждено показателями микроциркуляции: скорости объемного и линейного кровотока увеличились, возобновилась микроциркуляция в центральной зоне повреждения.

В группе сравнения (пациенты, не получавшие аэрозоль «Ледяная волна») – полное исчезновение гематом наблюдалось лишь к концу третьей недели исследования.

Как в экспериментальной, так и в группе сравнения (отсутствие местного лечения) нежелательные явления (побочные эффекты терапии) не были отмечены ни в одном случае.

Эффективность применения обезболивающего замораживающего аэрозоля «Ледяная Волна» отмечалась в виде уменьшения отека, исчезновения гиперемии, снятия болевых ощущений. Основным критерием для оценки эффективности охлаждающего аэрозоля было время, за которое травмированный спортсмен мог возвратиться к тренировкам.

В результате проведенного исследования мы установили, что применение аэрозоля «Ледяная волна» благодаря системе активного охлаждения полностью проникает через кожу и достаточно быстро дает положительный эффект. Активизируя кровообращение в области поражения, обеспечивает максимальный лечебный эффект. В ходе апробации было выявлено, что суммарное время реабилитации травмированных спортсменов, пользовавшихся обезболивающей заморозкой сократилось почти в 2–3 раза по сравнению со временем реабилитации спортсменов, не использующих обезболивающую заморозку. За период наблюдения (4 недели) назначение аэрозоля «Ледяная волна» привело к уменьшению потребности в приеме иных медикаментозных средств (включая системные анальгетики).

Новые технологии, с использованием низких температур, включены в комплекс восстановительных мероприятий у спортсменов, способствуют быстрейшему восстановлению

спортивной работоспособности, в зависимости от адекватной и последовательной реализации реабилитационных мероприятий на предтренировочном и тренировочных этапах, с ориентацией на конкретный вид спорта и сохранность компенсаторно-восстановительных процессов в организме спортсмена.

Список литературы

1. Избранные лекции по спортивной медицине. Том 1, 2, 3. Учебное издание (под ред. Поляева Б.А.). – М.: РАСМИРБИ, 2008.
2. *Архаров А.М. и др.* Машины низкотемпературной техники. Криогенные машины и инструменты. – Москва, 2011. – 583 с.
3. *Кондратенко Р.О., Нестеров С.Б., Романько В.А.* Применение промышленных газов в качестве хладагентов для нужд медицины и радиотехники // Химическое и нефтегазовое машиностроение. Вып. 6. – Москва, 2010. – С. 22–23.
4. *Кондратенко Р.О., Нестеров С.Б.* Исследование температурного поля на различных поверхностях при охлаждении тонкой пленкой кипящей газовой смеси // Вакуумная техника и технология. – 2010. Т. 20. Вып. 4. – С. 264–267.
5. Исследование температурного поля на поверхности биологической ткани и оценка количества отводимого от нее тепла при охлаждении тонкой пленкой кипящей газовой смеси для нужд спортивной медицины / Р.О. Кондратенко и др. // Лечебная физкультура и спортивная медицина. – Москва, 2011. – Т. 87, № 3. – С. 20–27.
6. *Кондратенко Р.О., Буторина А.В., Нестеров С.Б., Романько В.А.* Исследование температурного поля на поверхности биологической ткани при охлаждении тонкой пленкой кипящей газовой смеси. - Материалы 6 Международной научно-технической конференции «Вакуумная техника, материалы и технология», Москва, 2011. – С. 85–91.
7. *Цыганов Д.И.* Теоретические и экспериментальные основы, создание криохирургической аппаратуры и медицинских технологий ее применения. – Диссертация доктора технических наук – М., 1994. – 315 с.
8. *Цыганов Д.И., Архаров А.М., Микулин Е.И.* Современные медико-технические аспекты создания криохирургической аппаратуры // Вестник МГТУ, 1996. – С. 140–156.
9. *Цыганов Д.И., Птуха Т.П., Жолобов Н.И., Веденков В.Г.* Криогенная медицинская техника. Методические рекомендации. – М., 1991. – 56 с.