

DOI: <https://doi.org/10.17816/RF607744>

Исследование способов локальной криотерапии коленного сустава

А.В. Пушкарёв^{1, 2}, Н.Ю. Саакян¹, А.В. Буторина³¹ Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), Москва, Российская Федерация;² Российская медицинская академия непрерывного профессионального образования, Москва, Российская Федерация;³ Российский национальный исследовательский медицинский университет им. Н.И. Пирогова, Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Локальная криотерапия является перспективным методом лечения заболеваний костно-мышечной системы для облегчения симптомов и восстановления. Для безопасного воздействия с прогнозируемым терапевтическим эффектом для разных локализаций необходим грамотный контроль и прогнозирование процедуры.

Цель работы — выявление измеряемых физических критериев эффективности локальной криотерапии и характеристик для дозирования процедуры, сравнение и анализ возможностей различных способов. В рамках данной работы рассматривается область коленного сустава.

Методы. В эксперименте приняло участие 16 волонтеров, рандомизированных по 4 группам. В первой и второй группе проводили воздействие криопакетами в течение 20 минут. В качестве хладоносителей использовались смесь льда с водой и 23,1% раствор хлорида натрия. Третья и четвертая группа подвергались воздействию азотной (в течение 3 минут) и воздушной (в течение 20 минут) локальной криотерапии, соответственно. Во время проведения эксперимента измерялась температура кожного покрова с помощью датчика температуры и тепловизионной камеры.

Результаты. Наименьшее значение минимальной конечной температуры было зафиксировано после охлаждения парами жидкого азота и равнялось $(0,88 \pm 1,75)^\circ\text{C}$. Минимальная площадь рабочей зоны составила $(33,7 \pm 7,1) \text{ см}^2$. При охлаждении криопакетом со смесью льда и воды наблюдалось наиболее равномерное среди исследуемых случаев распределение температурного поля с наибольшими значениями минимальной конечной температуры $(6,43 \pm 0,90)^\circ\text{C}$ и площадью рабочей зоны $(135,2 \pm 34,6) \text{ см}^2$.

Заключение. Сформулированы основные физические критерии эффективности локальной криотерапии — температура и динамика ее изменения на поверхности объекта воздействия. Предложена и оценена характеристика дозирования — площадь рабочей зоны. Это область, в которой достигается принятая целевая температура. Согласно им, проведено сравнение трех основных способов охлаждения. Целевого результата методы достигают по-разному. Наиболее простыми в применении и подготовке являются контактные способы с использованием криопакетов. Однако, воздушное охлаждение при исследуемом режиме легче переносится испытуемыми, при этом с точки зрения физических критериев, оно эквивалентно контактным способам. Охлаждение парами азота приводит к самому быстрому достижению целевой температуры на поверхности, следовательно, ограничено охлаждение вглубь биоткани.

Ключевые слова: воздушная криотерапия; азотная криотерапия; коленный сустав; температура кожи; физиотерапия.

Как цитировать:

Пушкарёв А.В., Саакян Н.Ю., Буторина А.В. Исследование способов локальной криотерапии коленного сустава // Холодильная техника. 2023. Т. 112, № 1. С. 39–47. DOI: <https://doi.org/10.17816/RF607744>

DOI: <https://doi.org/10.17816/RF607744>

Study of local cryotherapy methods for the knee joint

Aleksandr V. Pushkarev^{1,2}, Natalia Yu. Saakyan¹, Antonina V. Butorina³

¹ Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation;

² Federal State Budgetary Educational Institution of Further Professional Education «Russian Medical Academy of Continuous Professional Education» of the Ministry of Healthcare of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation;

³ Russian National Research Medical University, Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

BACKGROUND: A promising method for treating musculoskeletal disorders to alleviate symptoms and promote recovery is local cryotherapy (LC). Proper control and regulation of the procedure enable safe interventions with predictable therapeutic effects for various locations.

AIMS: This study aims to identify measurable physical criteria for the effectiveness of the LC procedure and the dosing characteristics and to compare and analyze the capabilities of various methods.

MATERIALS AND METHODS: The experiment involved 16 volunteers who were randomized into 4 groups. The first and second groups underwent LC using ice bags for 20 min with a cooling agent consisting of an ice and water mixture and a 23.1% sodium chloride solution. The third and fourth groups underwent nitrogen (for 3 min) and air (for 20 min) LC, respectively. During the experiment, the skin temperature was measured using a temperature sensor and thermal imaging camera.

RESULTS: The lowest value of the minimum final temperature after cooling was recorded with liquid nitrogen vapor as equal to 0.88 ± 1.75 °C. The minimum area of the work zone was 33.7 ± 7.1 cm². When cooled with an ice bag with water and ice, the most uniform distribution of the temperature field among the investigated cases was observed, with the highest values of the minimum final temperature (i.e., 6.43 ± 0.90 °C) and minimum area of the work zone (i.e., 135.2 ± 34.6 cm²) among the investigated methods.

CONCLUSIONS: The main physical criteria for the effectiveness of LC are identified as temperature and the dynamics of its changes on the surface of the object of exposure. A dosing characteristic, i.e., the area of the work zone, was proposed and evaluated. In the area of the work zone, the target temperature is achieved. Based on the main physical criteria, the three main cooling methods are compared. These methods achieve the target result in different ways. The easiest to use and prepare are contact methods using ice bags. Air cooling in the investigated mode is more easily tolerated by the subjects, and in terms of the physical criteria, it is equivalent to contact methods. Cooling with nitrogen vapor leads to the fastest achievement of the target temperature on the surface and the least cooling of internal tissues; therefore, cooling deep into the biological tissue is limited.

Keywords: air cryotherapy; nitrogen cryotherapy; knee joint; skin temperature; physical therapy.

To cite this article:

Pushkarev AV, Saakyan NYu, Butorina AV. Study of Local Cryotherapy Methods for the Knee Joint. *Refrigeration Technology*. 2023;112(1):39–47.

DOI: <https://doi.org/10.17816/RF607744>

ОБОСНОВАНИЕ

Около 8 % заболеваний населения Российской Федерации относятся к болезням костно-мышечной системы и являются одной из основных причин инвалидизации [1]. Для облегчения симптомов болезней и восстановления используются различные методы физиотерапии. Одним из перспективных методов является локальная криотерапия (ЛКТ), эффективность которой доказывается различными исследованиями [2]. ЛКТ способствует уменьшению воспалительного процесса, локальному замедлению обменных процессов в охлажденных тканях и снижению чувствительности [3–6]. Основной областью применения локальной криотерапии являются заболевания суставов. Исследовательский интерес представляет область коленного сустава [3, 6–10].

Способы локальной криотерапии подразделяются на контактные и бесконтактные. Для контактных используют криопакеты, компрессионное и, основанное на эффекте Пельтье, охлаждение. К бесконтактным относятся воздушная, азотная ЛКТ, гипербарическое распыление углекислого газа, охлаждающих спреев со смесью газов. Все способы имеют различные температурные уровни и особенности. Характеристики, определяющие режимы процедуры, должны учитывать геометрию и теплофизические свойства охлаждаемой области, и технические параметры установки. Для контактных подходов к характеристикам для дозирования процедуры относятся площадь зоны воздействия и температура рабочего вещества. Для бесконтактных необходимо дополнительно учитывать скорость обдува, расстояние от сопла до поверхности кожи, диаметр сопла и методику воздействия (лабильную, стабильную) [11].

В данном исследовании проведены эксперименты по охлаждению коленного сустава тремя способами — криопакеты, азотная и воздушная локальные криотерапии. Базовые режимы воздействия и физические критерии сравнения были определены на основе ранее полученных результатов на модельной среде — фантоме биоткани [2, 12].

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Выявление измеряемых физических критериев эффективности локальной криотерапии и характеристик для дозирования процедуры, сравнение и анализ возможностей различных способов.

МЕТОДЫ

Дизайн исследования

В эксперименте приняло участие 16 волонтеров (7 женщин и 9 мужчин), возрастом от 18 до 23 лет, весом ($72,3 \pm 10,1$) кг, ростом ($176,4 \pm 9,3$) см. Участники были

рандомизированы по 4 группам. Первая и вторая получали контактную локальную криотерапию, третья и четвертая — азотную и воздушную соответственно.

Критерии соответствия

После объяснения сущности исследования и рисков участники предоставили письменное информированное согласие. Все испытуемые на момент проведения экспериментов были здоровы и не имели противопоказаний для локальной криотерапии.

Продолжительность исследования

Участники исследования проходили однократную процедуру локальной криотерапии коленного сустава. Общая длительность эксперимента включала в себя время подготовки волонтера — испытуемый находился в комнате проведения процедуры в течение 20 минут для выравнивания температуры, времени охлаждения и период отдыха после процедуры для восстановления чувствительности кожи в области охлаждения. Окончательное время охлаждения было скорректировано в предварительных экспериментах, проведенных для каждого способа на двух случайно выбранных из группы испытуемых. В этих опытах фиксировались температура в центре надколенника и время. Для азотного способа оно составило 3 минуты. При воздействии сверх этого времени выявлена опасность переохлаждения наружных тканей. Для остальных рассматриваемых подходов время охлаждения было установлено на уровне 20 минут из-за резкого замедления скорости охлаждения и незначительных изменений температуры после 20 минут воздействия.

Проведенные в рамках исследования процедуры

Область воздействия включала в себя переднюю поверхность, а также частично латеральную и медиальную стороны коленного сустава [13]. Центром охлаждения выбран центр надколенника. При выборе режимов воздействия и критериев эффективности локальной криотерапии авторы базировались на результатах анализа литературных источников и собственных экспериментов по охлаждению фантома биоткани [2, 12].

Первой и второй группе проводили локальную криотерапию с использованием криопакетов. Для первой группы в качестве рабочего вещества (хладоносителя) использовалась смесь льда и воды с массовым соотношением 2:1 и с постоянной температурой 0 °С. Для второй группы в криопакет заливался раствор хлорида натрия (NaCl) с концентрацией 23,1% по массе, предварительно охлажденный до минус 18,4 °С. Время процедуры предварительно было выбрано на основе анализа предыдущих исследований и составило 20 минут [3, 8, 9, 14]. Для полного покрытия коленного сустава использовался применяемый на практике криопакет «ice bag» диаметром 23 см («Mueller», Германия), заполненный согласно рекомендации производителя

1 кг рабочего вещества. Криопакет фиксировался на испытуемом эластичным бинтом.

Третьей группе проводили азотную локальную криотерапию по стабильной методике. Для этого был собран модуль, состоящий из сосуда Дьюара (ООО «НПО «Криомаш», СПД 25/60), наполненного жидким азотом, в который вставлена система для выдачи азота (ООО «Криогенные приборы», LNS-150W48V-PT-PS-LSCOM). К крану для подачи газа был прикреплен теплоизолированный шланг с внутренним диаметром 12 мм. Шланг фиксировался при помощи специального штатива, который был сконструирован для более точного измерения расстояния от торца подачи газообразного азота до охлаждаемой поверхности колена и для выполнения требования перпендикулярности потока относительно целевой области (рис. 1). Температура на выходе из шланга составляла минус 80 °C при расходе паров жидкого азота — 30 л/мин. Расстояние от торца шланга до поверхности кожи коленного сустава составляло 15 см, предварительное время охлаждения — от 4,4 до 15 минут [2].

Четвертой группе проводили воздушную локальную криотерапию по стабильной методике на экспериментальном аппарате (АО «ЦНИИ «Курс», ЛАКТ 1000) [15]. Температура на выходе из насадки диаметром 10 мм равнялась минус 30 °C при расходе воздуха 40 л/мин. Расстояние от насадки до целевой области составляло 10 см. Предполагаемое время охлаждения — от 13,3 до 21,5 минут [2].

Характеристики дозы

Основными измеряемыми физическими критериями, определяющими эффективность локальной криотерапии, являются температура на поверхности зоны воздействия и динамика ее изменения.

Целевой температурой в проведенных экспериментах на волонтерах было принято значение (10 ± 2) °C. Вследствие неравномерности распределения температуры на поверхности коленного сустава, возможно выделить такое понятие, как целевой диапазон температур — $(0-10)$ °C — это допустимый диапазон температур в области воздействия. Минимальная температура фиксируется с целью определения эффективности и безопасности процедуры. При опускании температуры поверхности кожи ниже 0 °C возникает вероятность переохлаждения и повреждения тканей.

Скорость изменения температуры является физическим критерием локальной криотерапии, от которого зависит терапевтический эффект процедуры. При более низкой скорости, можно увеличить время процедуры без опасности переохлаждения кожного покрова, при этом происходит охлаждение внутренних тканей, а значит увеличивается противовоспалительный эффект [2, 12]. При высокой скорости снижения температуры, происходит быстрое обезбоживание и незначительное понижение температуры в более глубоких тканях.

В качестве характеристики для дозирования процедуры была принята площадь рабочей зоны. Это площадь,

в которой температура после охлаждения опускалась ниже 10 °C. Важной задачей является регулирование и прогнозирование этой характеристики в зависимости от выбранной области воздействия.

Методы регистрации данных

Во время эксперимента измерялась температура поверхности кожи с использованием датчика температуры и тепловизионной камеры.

Выбран и откалиброван методом реперных точек датчик — термометр сопротивления Pt100. Электронное устройство для снятия показаний с датчика было выполнено на платформе Arduino с применением модуля MAX31865 и программного расширения PLX-DAQ. Датчик был закреплен на колене с помощью гипоаллергенного лейкопластыря из белого шелка Omnisilk (Hartmann, Германия) и защищен от прямого воздействия источника холода слоем флизелина (толщиной 2 мм и площадью поверхности 10x10 мм при использовании криопакетов и толщиной 2 мм и площадью поверхности 5x5 мм при охлаждении парами жидкого азота или холодным воздухом). Считывание показаний с датчика производилось каждую секунду на протяжении всего эксперимента.

Датчик был прикреплен к области с наибольшей вероятностью повреждения кожного покрова — к центру надколенника (коленной чашечки). Это зона с минимальной начальной температурой, определенная экспериментально с применением тепловизионного устройства.

Тепловизионным мобильным устройством Flir One (Flir Systems, Inc., США) фиксировались минимальные начальная и конечная температуры на поверхности кожи в зоне охлаждения и определялась площадь рабочей зоны. Для этого на полученных тепловизором изображениях выявлялись точки, в которых показания температуры равнялись $(10,0 \pm 0,1)$ °C. Далее цвета настраивались таким образом, чтобы область 10 °C и ниже отделялась от более высоких температур. Площадь этой области была выделена и измерена (рис. 2).

Этическая экспертиза

Методика проведения экспериментов на волонтерах была рассмотрена Этическим комитетом МГТУ им Н.Э. Баумана. На заседании Этического Комитета 22.12.2022 года согласно выписке из протокола № 2 было принято решение «Разрешить проведение исследований в соответствии с предоставленной методикой».

Статистический анализ

Обработка результатов проводилась с использованием пакета прикладных программ математического моделирования MATLAB. Были найдены усредненные результаты и среднеквадратичные отклонения. Результаты обработаны и представлены в табличном (табл. 1, 2) и графическом (рис. 3) видах.

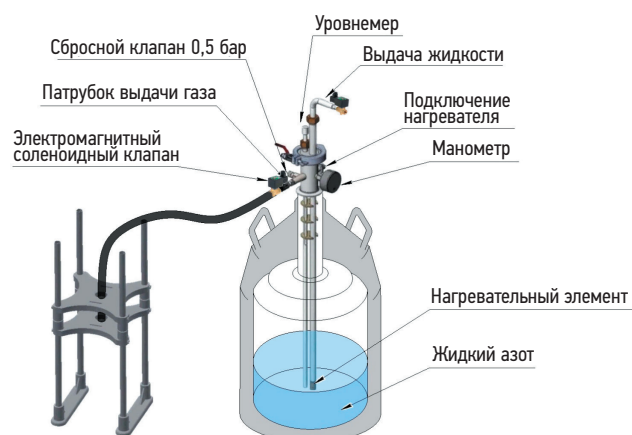


Рис. 1. Экспериментальный модуль для азотной ЛКТ.

Fig. 1. Experimental module for nitrogen LC.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В таблице 1 представлены усредненные результаты измерения температуры, определенные с применением тепловизора. Наименьшее значение минимальной конечной температуры было зафиксировано после охлаждения парами жидкого азота (третья группа) и равнялось $(0,88 \pm 1,75)^\circ\text{C}$. При этом была получена наименьшая площадь рабочей зоны — $(33,7 \pm 7,1) \text{ см}^2$. Это в 4 раза меньше, чем у рассматриваемых контактных способов (первая и вторая группы) и в 2,8 раз меньше, чем у воздушного обдува (четвертая группа). При охлаждении льдом наблюдалось наиболее равномерное среди исследуемых случаев распределение температурного поля: наибольшие значения минимальной конечной температуры $(6,43 \pm 0,90)^\circ\text{C}$ и площади рабочей зоны $(135,2 \pm 34,6) \text{ см}^2$. Аналогичные результаты в пределах стандартного отклонения показал второй контактный способ с использованием в качестве рабочего вещества раствора хлорида натрия.

Усредненные результаты, полученные с датчика, представлены в графическом виде на рис. 3. Контрольные значения и результаты расчета средней скорости охлаждения показаны в таблице 2. При сравнении скорости охлаждения в первые три минуты воздействия, максимальная скорость изменения температуры наблюдалась у третьей группы и равнялась $(-8,28 \pm 0,84)^\circ\text{C}/\text{сек}$. Это в 2,2 раза больше, чем у первой группы, в 1,6 раз больше, чем у второй и в 2,1 раз больше, чем у четвертой. При дальнейшем воздействии скорость охлаждения значительно уменьшалась. Во всех случаях в пределах заданного времени воздействия была достигнута температура 10°C и не наблюдалось опускания температуры ниже 0°C .

ОБСУЖДЕНИЕ

Температура поверхности

Наименьшая минимальная температура, близкая к 0°C , зафиксирована при воздействии парами жидкого

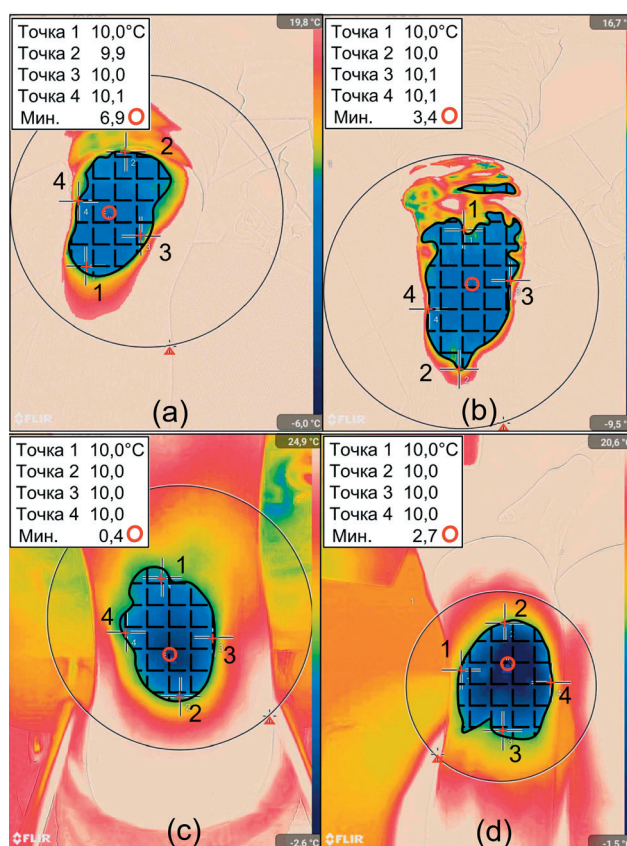


Рис. 2. Термограмма коленного сустава с выделенной областью температур ниже 10°C после ЛКТ: (a) криопакет со смесью льда и воды; (b) криопакет с 23,1% NaCl; (c) азотная ЛКТ; (d) воздушная ЛКТ.

Fig. 2. Thermogram of the knee joint with the selected temperature range below 10°C after local cryotherapy (LC) with: (a) ice bag with ice and water mixture; (b) ice bag with 23.1% sodium chloride solution; (c) nitrogen; and (d) air.

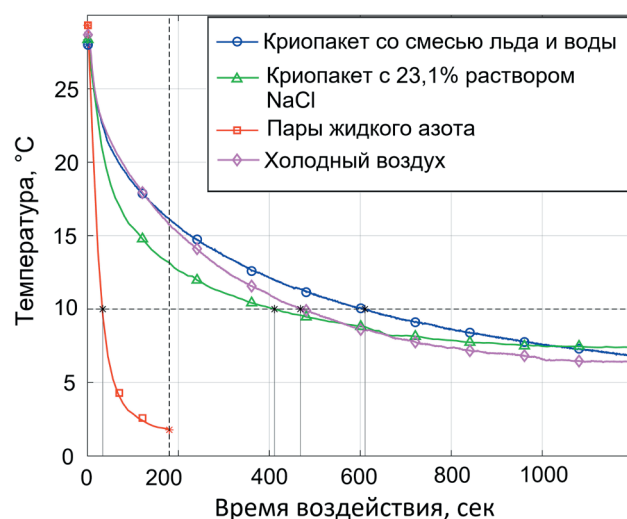


Рис. 3. Изменение температуры на поверхности кожи в центре надколенника при ЛКТ коленного сустава.

Fig. 3. Temperature change on the skin surface at the center of the patella during LC of the knee joint.

Таблица 1. Усредненные показания тепловизора
Table 1. Average readings of the thermal imager

№ группы — рабочее вещество	Масса рабочего вещества (расход)	Время охлаждения, мин	Площадь рабочей зоны, см ²	Начальная температура, °C	Конечная минимальная температура, °C
1 — смесь льда и воды	1 кг	20	135,2 ± 34,6	30,33 ± 2,65	6,43 ± 0,90
2 — раствор NaCl	1 кг	20	127,1 ± 32,3	30,25 ± 0,31	5,75 ± 0,96
3 — пары жидкого азота	30 л/мин	3	33,7 ± 7,1	29,05 ± 0,83	0,88 ± 1,75
4 — воздух	40 л/мин	20	93,8 ± 16,1	29,13 ± 1,12	4,42 ± 0,61

Таблица 2. Усредненные показания датчика
Table 2. Average readings of the temperature sensor

№ группы — рабочее вещество	Начальная температура, °C	Конечная температура, °C	Время охлаждения до 10°C, сек	Средняя скорость изменения температуры, °C/мин	Средняя скорость изменения температуры первые 3 минуты, °C/мин
1 — смесь льда и воды	27,99 ± 1,13	6,71 ± 0,71	610 ± 56	-1,038 ± 0,084	-3,732 ± 0,33
2 — раствор NaCl	28,39 ± 0,95	7,39 ± 1,21	411 ± 50	-1,050 ± 0,126	-5,094 ± 0,241
3 — пары жидкого азота	28,35 ± 1,28	1,78 ± 1,55	33 ± 11	-8,28 ± 0,84	-8,28 ± 0,84
4 — воздух	28,67 ± 1,85	6,43 ± 0,37	468 ± 63	-1,116 ± 0,096	-3,930 ± 0,288

азота. Снижение температуры ниже данного значения может вызвать обморожение. Следовательно, важно контролировать температуру во время процедуры. Это затруднительно сделать с помощью тепловизора, так как потоки паров жидкого азота во время процедуры могут вызывать ошибки измерений. Поэтому целесообразно использовать датчик или пирометр, направленный в центр надколенника, и в целях запаса по безопасности останавливать охлаждение при снижении температуры ниже 2 °C.

Конечные температуры для контактных и воздушного способов, зафиксированные с тепловизора и с датчика, имеют близкие значения в пределах стандартного отклонения и выше 4 °C. Более продолжительное охлаждение не приводит к снижению температуры до 0 °C, вследствие значительного падения скорости изменения температуры со временем процедуры.

Минимальная конечная температура, зарегистрированная с помощью тепловизора, была ниже измеренной при использовании температурного датчика. Область с минимальной температурой находится в области надколенника, но не совпадает с местом крепления датчика. Минимальная температура была зафиксирована для оценки риска повреждения кожного покрова. А показания температуры с датчика были сняты для оценки динамики изменения температуры.

Скорость изменения температуры

Скорость охлаждения на поверхности рабочей зоны при использовании азотной ЛКТ значительно выше по сравнению с другими способами. Это позволяет

сократить время, необходимое для достижения целевой температуры на поверхности. Однако, такой подход может привести к недостаточному охлаждению тканей на более глубоких уровнях.

В течение всего периода охлаждения (20 минут) средняя скорость изменения температуры одинакова для контактных и воздушного способов, и значения конечной температуры в центре надколенника близки друг к другу в пределах стандартного отклонения. Следовательно, эти способы можно использовать взаимозаменяемо с точки зрения воздействия на поверхность. Однако, при использовании контактного подхода испытуемые информировали о чувстве сильного жжения в области охлаждения в течение первых 10 минут, после чего жжение уменьшалось. При азотной ЛКТ чувство жжения практически отсутствовало. Испытуемые не заметили резкого изменения температуры, так как скорость охлаждения была относительно высокой, и «температура обезболивания» наступала быстро. При воздушном охлаждении испытуемые отмечали небольшое жжение в течение первых 7–8 минут.

Площадь рабочей зоны

При постоянной температуре хладоносителя рабочую зону контактных способов можно увеличивать или уменьшать за счет изменения размера или количества криопакетов. В бесконтактных способах на площадь влияют размер насадки, расход и расстояние до поверхности. Однако, изменение режимов бесконтактных способов может влиять на значения скорости охлаждения и минимальной

конечной температуры. Следовательно, необходимо корректно прогнозировать площадь рабочей зоны и в зависимости от этого варьировать режимы воздействия.

Диаметр насадки на выходе равнялся 12 и 10 мм при азотном и воздушном способах соответственно. Расстояние от торца до поверхности при воздушном охлаждении было меньше на 5 см. Из-за большего расхода (в 1,3 раза) и более длительного воздействия (в 6,7 раз), площадь рабочей зоны при обдуве воздухом значительно больше (в 3 раза), несмотря на более низкую температуру паров жидкого азота. Увеличение скорости потока паров жидкого азота приводит к увеличению скорости охлаждения и вероятности переохлаждения кожного покрова. Следовательно, для увеличения времени воздействия и площади рабочей зоны, необходимо варьировать размер насадки и расстояние от торца шланга до поверхности кожи.

Ограничения исследования

Результаты других исследователей [3,7–9,14,16] говорят о следующем. Достижение целевой температуры при контактной криотерапии зависит не только от рабочего вещества и температуры предварительного охлаждения, но и от криопакета, наличия дополнительных барьеров защиты от переохлаждения кожи и области воздействия, а также зоны и способа измерения температуры. Измерения в сторонних исследованиях показывают значительные различия, что затрудняет сравнение полученных результатов. Это подчеркивает важность точного измерения температуры во время процедур локальной криотерапии для возможности регулирования времени воздействия.

Причины возникновения погрешностей в методах измерения могут быть различными. Во-первых, чтобы защитить датчик от непосредственного контакта с рабочим веществом, он был покрыт слоем флизелина, что могло привести к различиям в температуре кожи под датчиком. Во-вторых, тепловизор измеряет температуру поверхности, но поверхность кожи не является ровной и покрыта волосатым покровом, что может влиять на точность измерений. Наконец, после выключения системы при использовании бесконтактного охлаждения, потоки холодного газа продолжают обтекать кожу, что также может оказывать влияние на измерения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сформулированы основные физические критерии эффективности локальной криотерапии — температура и динамика ее изменения на поверхности объекта воздействия. Предложена и оценена характеристика дозирования — площадь рабочей зоны. Это область, в которой достигается принятая целевая температура.

Наиболее простым в использовании и подготовке является контактный способ криотерапии с использованием

криопакетов. Относительно легко можно изменять площадь обрабатываемой зоны. При правильном выборе режима обеспечивается достижение целевой температуры (10 ± 2) °C, не приводя при этом к снижению температуры наружных тканей до предельного значения 0 °C. Однако, охлаждение может сопровождаться чувством жжения.

Воздушное охлаждение при исследуемом режиме практически не вызывало ощущения жжения у волонтеров и, с точки зрения полученных температур, было эквивалентно контактным подходам. Однако, существуют трудности изменения площади обрабатываемой зоны без потери эффективности процедуры.

Измеренные температуры и скорость охлаждения показывают, что использование азотного охлаждения значительно отличается от других рассмотренных способов. Следовательно, важно понять, как правильно использовать преимущество жидкого азота — низкую температуру кипения. При исследуемом режиме способ обеспечил достижение целевой температуры, не повреждая кожный покров. Однако, зона воздействия была меньше площади поверхности коленного сустава.

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

Вклад авторов. А.В. Пушкарев — руководство исследованием, участие в проведении экспериментальных исследований, обработка экспериментальных результатов, сбор и анализ литературных источников, написание текста и редактирование статьи; Н.Ю. Саакян — разработка экспериментальных стендов, проведение экспериментальных исследований, анализ экспериментальных результатов, сбор и анализ литературных источников, написание текста и редактирование статьи; А.В. Буторина — участие в проведении экспериментальных исследований, обработка экспериментальных результатов, сбор и анализ литературных источников, написание текста и редактирование статьи. Все авторы подтверждают ответственность своего авторства международным критерием ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с проведенным исследованием и публикацией настоящей статьи.

Источник финансирования. Исследование выполнено при поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых — кандидатов наук (МК-3631.2022.1.2), за исключением разработки методики и проведения экспериментальных измерений с использованием тепловизионной камеры Flir One (выполнено за счет гранта РФ (21-19-00676)).

ADDITIONAL INFORMATION

Authors' contribution. A.V. Pushkarev — scientific director of the research, participation in experimental research, processing of experimental results; N.Yu. Saakyan — development of experimental installations, conducting experimental studies, analysis of experimental results; A.V. Butorina — participation in experimental research, processing of experimental results. All authors made a substantial contribution to the work's conception, acquisition, analysis, interpretation of data, drafting, and revision and the final approval of the version to be published and agreed to be held accountable for all aspects of the work.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Funding source. The study was supported by the Grant of the President of the Russian Federation for state support for young Russian scientists—candidates of science (MK-3631.2022.1.2), except for developing a methodology and conducting experimental measurements using a Flir One thermal imaging camera (was supported by a grant from the Russian Science Foundation (21-19-00676)).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Росстат. Здравоохранение в России: статистический сборник. Москва: 2021. № 3–46. С. 171.
2. Саакян Н.Ю., Пушкарев А.В. Исследование локального криовоздействия на фантоме биоткани // Холодильная техника. 2022. Т. 111, № 3. С. 181–188. doi: 10.17816/RF112350
3. Jill A., Selfe J., Rhodes D., et. al. Mapping knee skin surface sensitivity and temperature following cryotherapy // J. Quant. Res. Rehabil. Med. 2019. N 2. P. 1–5.
4. Буренина И.А. Современные методики криотерапии в клинической практике // Вестник современной клинической медицины. 2014. Т. 7. С. 57–61.
5. Волотовская А.В., Колтович Г.К., Козловская Л.Е., и др. Криотерапия: учеб.-метод. пособие для врачей. Минск: Бел. МАПОБ, 2010.
6. Kang J.I., Kim Y.N., Choi H. Effects of Low-intensity Pulsed Ultrasound and Cryotherapy on Recovery of Joint Function and C-reactive Protein Levels in Patients after Total Knee Replacement Surgery // Journal of physical therapy science. 2014. Vol. 26, N 7. P. 1033–1036. doi: 10.1589/jpts.26.1033
7. Holwerda S.W., Trowbridge C.A., Womochel K.S., et al. Effects of cold modality application with static and intermittent pneumatic compression on tissue temperature and systemic cardiovascular responses // Sports health. 2013. Vol. 5, N 1. P. 27–33. doi: 10.1177/1941738112450863
8. Kim J.S., Mettler J., McCurdy K., et al. Effects of Focal Knee Joint Cooling on Static and Dynamic Strength of the Quadriceps: Innovative Approach to Muscle Conditioning // International Journal of Environmental Research and Public Health. 2021. Vol. 18, N 9. P. 4890. doi: 10.3390/ijerph18094890

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают свою искреннюю благодарность МГТУ им. Н.Э. Баумана за предоставление доступа к лицензионной программе математического моделирования MathWorks — MATLAB R2020b. Также выражается благодарность АО «ЦНИИ «Курс» за предоставленный аппарат воздушной локальной криотерапии, который использовался при проведении экспериментов. Этот вклад и поддержка значительно способствовали успешному выполнению исследования.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors would like to express their sincere gratitude to Bauman Moscow State Technical University for providing access to the licensed mathematical modeling software MathWorks–MATLAB R2020b. They would also like to extend their appreciation to the Central Scientific Research Institute «Kurs» for providing the equipment for air local cryotherapy that was used in the experiments. This contribution and support significantly contributed to the successful completion of the research.

9. Furmanek M.P., Słomka K.J., Sobiesiak A., et. al. The Effects of Cryotherapy on Knee Joint Position Sense and Force Production Sense in Healthy Individuals // Journal of human kinetics. 2018. Vol. 61. P. 39–51. doi: 10.1515/hukin-2017-0106
10. Кульчицкая Д.Б., Фесюн А.Д., Самойлов А.С., и др. Применение физических факторов в программах реабилитации пациентов после тотального эндопротезирования коленного сустава // Вестник восстановительной медицины. 2022. Т. 21, № 2. С. 46–52. doi: 10.38025/2078-1962-2022-21-2-46-52
11. Техника и методики физиотерапевтических процедур / Под ред. В.М. Боголюбова. Москва : БИНОМ, 2015.
12. Саакян Н.Ю., Пушкарев А.В. Целевая температура локальной криотерапии. Холодильная техника. 2022. Т. 111, № 4. С. 289–295. doi: 10.17816/RF114722
13. Разумов А.Н., Григорьева В.Д., Дашина Т.А. Воздушная криотерапия в восстановительном лечении больных остеоартрозом и ревматическими заболеваниями мягких тканей: пособие для врачей. Москва : 2004.
14. Chesterton L.S., Foster N.E., Ross L. Skin temperature response to cryotherapy // Archives of physical medicine and rehabilitation. 2002. Vol. 83, N 4. P. 543–549. doi: 10.1053/apmr.2002.30926
15. Бычков Е.Г., Храпова К.И., Ковалев А.А., и др. Разработка аппарата для проведения локальной криотерапевтической процедуры ЛАКТ-1000 // Проблемы развития корабельного вооружения и судового радиоэлектронного оборудования. 2015. Т. 4. С. 178–186.
16. Ostrowski J. Effectiveness of Salted Ice Bag Versus Cryo-Compression on Decreasing Intramuscular and Skin Temperature // Journal of Sport Rehabilitation. 2017. Vol. 28, N 2. P. 1–22. doi: 10.1123/jsr.2017-0173

REFERENCES

1. Rosstat. *Healthcare in Russia: stat. sat.* Moscow: 2021;3–46:171. (In Russ).
2. Saakyan NY, Pushkarev AV. Local cryotherapy investigation on the biotissue phantom. *Refrigeration Technology.* 2022;111(3):181–188. (In Russ.). doi: 10.17816/RF112350
3. Jill A, Selfe J, Rhodes D, et. al. Mapping knee skin surface sensitivity and temperature following cryotherapy. *J. Quant. Res. Rehabil. Med.* 2019; 2:1–5.
4. Burenina IA. Modern methods of cryotherapy in clinical practice. *The Bulletin of Contemporary Clinical Medicine.* 2014;7(1):57–61. (In Russ).
5. Volotovskaya AV, Koltovich GK, Kozlovskaya LY, et al. *Cryotherapy: educational and methodical manual for doctors.* Minsk: BelMAPO; 2010. (In Russ).
6. Kang JI, Kim YN, Choi H. Effects of Low-intensity Pulsed Ultrasound and Cryotherapy on Recovery of Joint Function and C-reactive Protein Levels in Patients after Total Knee Replacement Surgery. *Journal of physical therapy science.* 2014;26(7):1033–1036. doi: 10.1589/jpts.26.1033
7. Holwerda SW, Trowbridge CA, Womochel KS, Keller DM. Effects of cold modality application with static and intermittent pneumatic compression on tissue temperature and systemic cardiovascular responses. *Sports health.* 2013;5(1):27–33. doi: 10.1177/1941738112450863
8. Kim JS, Mettler J, McCurdy K, Kim KM. Effects of Focal Knee Joint Cooling on Static and Dynamic Strength of the Quadriceps: Innovative Approach to Muscle Conditioning. *International Journal of Environmental Research and Public Health.* 2021;18(9):4890. doi: 10.3390/ijerph18094890
9. Furmanek MP, Słomka KJ, Sobiesiak A, et. al. The Effects of Cryotherapy on Knee Joint Position Sense and Force Production Sense in Healthy Individuals. *Journal of human kinetics.* 2018;61:39–51. doi: 10.1515/hukin-2017-0106
10. Kulchitskaya DB, Fesyun AD, Samoilov AS, Kolbakhova SN. The Physical Factors Application in Rehabilitation Programs for Patients after Total Knee Replacement. *Bulletin of Rehabilitation Medicine.* 2022;21(2):46–52. (In Russ.). doi: 10.38025/2078-1962-2022-21-2-46-52
11. Bogolyubov VM, editor. *Technique of physiotherapy procedures.* Moscow: BINOM; 2015. (In Russ.).
12. Saakyan NY, Pushkarev AV. Target temperature of local cryotherapy. *Refrigeration Technology.* 2022;111(4). (In Russ.). doi: 10.17816/RF114722
13. Razumov AN, Grigoryeva VD, Dashina TA. *Air cryotherapy in the rehabilitative treatment of patients with osteoarthritis and rheumatic diseases of soft tissues: Guide for Physicians.* Moscow: 2004. (In Russ.).
14. Chesterton LS, Foster NE, Ross L. Skin temperature response to cryotherapy. *Archives of physical medicine and rehabilitation.* 2002;83(4):543–549. doi: 10.1053/apmr.2002.30926
15. Bychkov EG, Chrapova KI, Kovalev AA, et. al. Development of a device for local cryotherapy LACT-1000. *Problems of ship armament and vessel radioelectronic equipment development.* 2015; 4:178–186. (In Russ).
16. Ostrowski J. Effectiveness of Salted Ice Bag Versus Cryo-Compression on Decreasing Intramuscular and Skin Temperature. *Journal of Sport Rehabilitation.* 2017;28(2):1–22. doi: 10.1123/jsr.2017-0173

ОБ АВТОРАХ

*** Пушкарев Александр Васильевич,**
ведущий инженер, канд. техн. наук;
адрес: Российская федерация, 105005, Москва,
Лефортовская наб., д. 1;
ORCID: 0000-0002-1737-7838;
eLibrary SPIN: 5796-8324;
e-mail: pushkarev@bmstu.ru

Саакян Наталия Юрьевна,
студент;
ORCID: 0000-0001-6799-5450;
eLibrary SPIN: 4390-3138;
e-mail: natali.saakyan@mail.ru

Буторина Антонина Валентиновна,
д.м.н., профессор;
ORCID: 0000-0001-8465-0593;
eLibrary SPIN: 8832-1995;
e-mail: avbutorina@gmail.com

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

AUTHORS' INFO

*** Aleksandr V. Pushkarev,**
Leading Engineer, Cand. Sci. (Tech.);
address: 1 Lefortovskaya Naberezhnaya, 105005 Moscow,
Russian Federation;
ORCID: 0000-0002-1737-7838;
eLibrary SPIN: 5796-8324;
e-mail: pushkarev@bmstu.ru

Natalia Yu. Saakyan,
Student;
ORCID: 0000-0001-6799-5450;
eLibrary SPIN: 4390-3138;
e-mail: natali.saakyan@mail.ru

Antonina V. Butorina,
Dr. Sci. (Med.), Professor;
ORCID: 0000-0001-8465-0593;
eLibrary SPIN: 8832-1995;
e-mail: avbutorina@gmail.com