

А. А. Ж е р д е в, А. В. Ш а к у р о в,
А. А. Щ е л ч к о в

СПОСОБЫ РЕАЛИЗАЦИИ ОБЩЕЙ КРИОТЕРАПЕВТИЧЕСКОЙ ПРОЦЕДУРЫ

Приведены основные способы реализации общей воздушной криотерапевтической процедуры. Дана краткая характеристика процедуры с теплофизической точки зрения. Отдельно описаны установки, использующие запас жидкого азота и холодильные машины. Проведен сравнительный анализ эффективности установок и основных проблем при эксплуатации. Предложены варианты перспективных установок.

E-mail: shakurov.bmstu@gmail.com

Ключевые слова: криотерапия, кабина, пароконденсационная холодильная машина, жидкий азот.

Физиотерапия — это специализированная область клинической медицины, изучающая физиологическое и лечебное действия природных и искусственно создаваемых физических факторов на организм человека.

Одной из областей физиотерапии является низкотемпературная воздушная физиотерапия (криотерапия, аэрокриотерапия), которая является перспективным и развивающимся методом лечения и профилактики заболеваний. История криотерапии насчитывает около 40 лет, в Россию метод пришел во второй половине 80-х гг. XX в. Метод успешно опробован в ревматологии, дерматологии, спортивной медицине, косметологии, травматологии, психиатрии. Наиболее перспективное широкое направление использования — профилактика заболеваний, укрепление иммунитета.

При процедуре в лечебно-оздоровительных целях используется кратковременный контакт кожного покрова пациента с низкотемпературным газом [1]. Происходит интенсификация естественного процесса отвода теплоты от тела человека. Процедура заключается в охлаждении тонкого (в среднем толщиной ~1 мм) поверхностного слоя тела человека до определенной температуры и с определенной скоростью (рис. 1). При общей криотерапии охлаждается максимально возможная поверхность тела, при локальной — определенный его участок. Внутренние органы человека не испытывают переохлаждения (рис. 2).

Цель процедуры — снизить температуру термочувствительных холодовых рецепторов [2]. Криотерапия по механизму лечебного воздействия может быть отнесена к стрессогенным физиотерапевтическим процедурам. В качестве лечебного фактора выступает не само физическое воздействие, а реакция организма на сформировавшуюся под

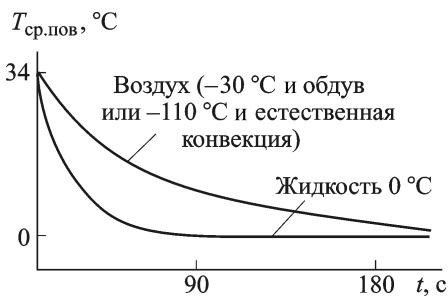


Рис. 1. Изменение температуры кожи в ходе процедуры [5]

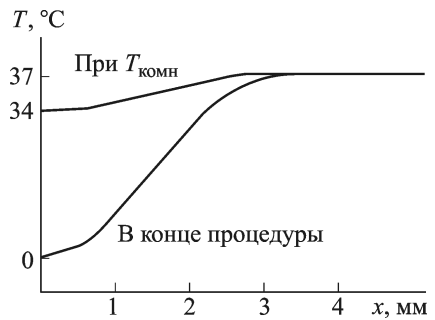


Рис. 2. Температура тела в глубине до и после процедуры [5] (под кожей находится жир — естественная теплоизоляция)

этим воздействием негативную информацию органов чувств [3]. Стоит отметить, что данный метод безлекарственный, лечебный эффект достигается только за счет физических факторов.

Конкретные параметры охлаждения должны назначаться практикующими конкретную медицинскую методику врачами. Температура кожи в конце процедуры задается в диапазоне от 0 до 12 °C, скорость охлаждения должна быть больше 5 °/мин [4] и обычно составляет около 10 °/мин.

Отметим, что при надлежащем проведении процедуры нет опасности для здоровья пациента. Холодовой ожог и простуда после процедуры на практике не встречаются ввиду того, что кожа не успевает охладиться до температуры -2 °C, высокоскоростное охлаждение и бурный приток крови к поверхности после процедуры не дают развиваться патогенной микрофлоре.

Газ в качестве теплоносителя выбран из требований гигиены и простоты при дозировании холода, но в этом случае требуется более низкая температура для проведения процедуры (см. рис. 1). При отводимом от тела тепловом потоке $\sim 3 \dots 5$ кВт/м² на захлаживание поверхности требуется ~ 3 мин (площадь человеческого тела в среднем составляет $1,5 \dots 2$ м²).

Принцип действия процедуры и эффект более полно описаны в других источниках [1, 2, 6, 7].

Любой криотерапевтический комплекс можно разделить на холодопроизводящую установку, теплоизолированное пространство для размещения пациента (кабину) и систему циркуляции хладоносителя (рис. 3). Элементы находятся в тесной технологической и конструктивной связи.

В вопросах выбора технологических параметров процедуры до сегодняшнего дня нет единых общепринятых представлений. Разброс

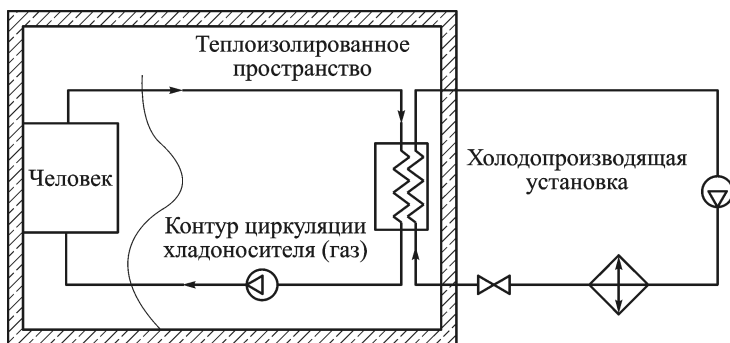


Рис. 3. Обобщенная схема криотерапевтической установки

температуры газа-хладоносителя, рекомендуемый разными авторами, достигает 100°C . В ранних публикациях, посвященных практике общей криотерапии, температура в кабине описывалась на уровне -180°C , но в последние годы температура в некоторых криотерапевтических комплексах составляет всего -80°C . При таком разбросе сведений об основном технологическом параметре процесса трудно сделать обоснованный выбор, тем более что выбор температуры определяется не физиотерапевтическими приоритетами, а возможностями технологии криостатирования. Продолжительность процедуры подбирается эмпирически на основании субъективных оценок врачей-физиотерапевтов.

Основными проблемами при внедрении метода криотерапии и криотерапевтических установок являются:

- низкая рентабельность установок на потребительском рынке при высокой стоимости процедур для пациентов, вызванная высокими капитальными и эксплуатационными затратами;
- недостаточная точность дозирования холодового воздействия на пациента в связи с отсутствием контроля температуры тела (контроль в течение процедуры вне зависимости от конкретного пациента), высокий градиент температур газа в кабине по росту человека (в некоторых азотных установках на уровне колена температура ниже на 50°C , чем на уровне шеи), низкая степень автоматизации процедур;
- недостаточно медицинской научно-исследовательской, методологической и практической информации по тематике криотерапии;
- современные отечественные производители — это малые предприятия, которые не ведут должным образом научно-исследовательскую деятельность, выпуская несколько модифицированные опытные образцы первой половины 90-х гг. XX в.

Производство новых опытных образцов установок позволит, используя накопленный опыт, создать более дешевые и эффективные установки.

Можно выделить два основных типа установок: использующие запас хладагента (обычно жидкий азот) и холодильные машины. Кроме того, существуют индивидуальные и групповые установки, предназначенные одновременно для одного или нескольких человек. В индивидуальных азотных установках кабины разделяют на открытые сверху криобассейны (криобочки) и закрытые криокабины.

Существуют варианты мобильных криотерапевтических комплексов (установленных на автомобиле), но обычно используются стационарные (установка в помещении).

Криотерапевтический комплекс включает в себя установку и пространство, подготовленное для проведения процедуры (процедурный кабинет).

Установки с испарением жидкого азота. Газовая среда в азотных установках охлаждается вследствие испарения и перегрева жидкого азота. Температура смеси азота с воздухом на входе в кабину колеблется от -120 до -150 °С. В установках используют тепломасообменные аппараты непосредственного охлаждения (контактные теплообменники, в которых в поток воздуха подается жидкий азот) из-за их большей эффективности по сравнению с рекуперативными (рис. 4).



Рис. 4. Внешний вид кабины индивидуальной азотной криотерапевтической установки Азот+

Капитальные затраты на азотную установку меньше, чем на пароконпрессионную, быстрее происходит выход на режим при запуске.

Недостатки азотных установок следующие: трудности с доставкой жидкого азота (зависит от местоположения комплекса); возможно возникновение гипоксии у пациента при отсутствии или плохой работе приточно-вытяжной вентиляции; возможность возникновения непредвиденного контакта тела оператора или пациента с жидким азотом при несоблюдении техники безопасности.

Фирмы-производители установок с испарением жидкого азота следующие: ООО “НПП “КРИОН” (www.krion.ru), “Мед-Крионика” (www.cryomed.ru), ООО “Криомед” (www.criomed.com.ua), “Juka” (www.juka.com.pl), “Азот+”. Подробнее можно ознакомиться в Интернете.

Несколько лет назад появилась азотная криотерапевтическая установка “Азот+”, в основе которой лежит установка “КАЭКТ-01-КРИОН”. Новинка отличается улучшенной автоматикой и более эргономичной кабиной для принятия процедур (см. рис. 4).

В настоящей работе предложен вариант мобильного азотного комплекса. Азот подается в контактный теплообменник на форсунку из криогенной емкости под давлением. Система замкнута в отличие от современных азотных установок, где часть отработанного газа сбрасывается в окружающую среду, тем самым вызывая перерасход жидкого азота. В качестве хладоносителя используется воздух, смешанный с перегретыми парами азота, хладагентом является подаваемый в систему сжиженный азот, расход которого можно регулировать (рис. 5), в качестве изолированного пространства — криобассейн, закрытый сверху (рис. 6, см. рис. 4).

Техническая характеристика установки “Азот+”

Температура в камере, °С	От –120 до –140
Холодопроизводительность при –120 °С, кВт	7,5
Датчик температуры в кабине	Штатный
Длительность процедуры, мин	2-3
Кабина	Индивидуальная

Основные особенности установки:

1. Замкнутый цикл (газ циркулирует по системе и сбрасывается только при повышенном давлении в кабине);

2. Кабина герметична, голова пациента и шея находятся вне кабины. Герметичность создается с помощью воротника, который не ограничивает движения человека во время процедуры. С точки зрения

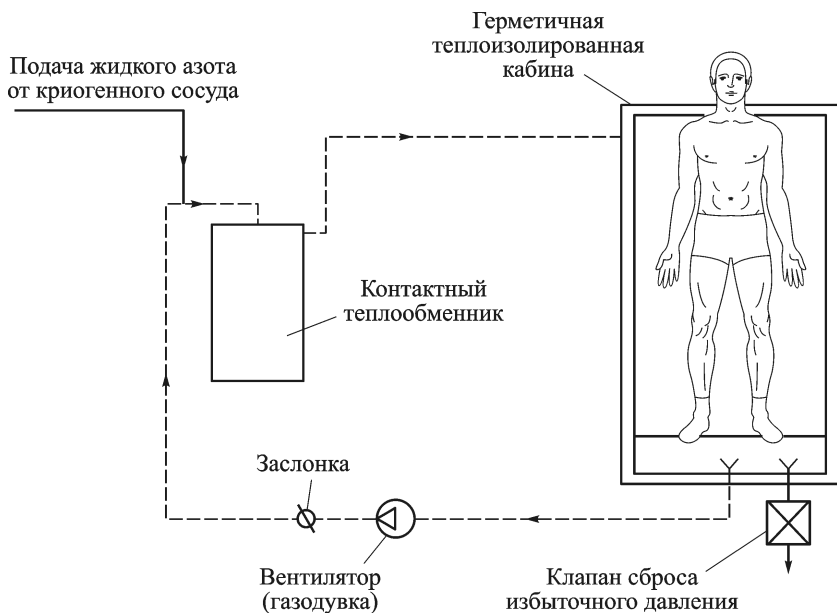


Рис. 5. Упрощенная схема предлагаемой азотной криотерапевтической установки

гигиены используется одноразовая тканевая прокладка между воротником и шеей пациента;

3. Требуемый интенсивный тепловой поток отводится за счет конвекции, но отличие в том, что охлаждающий газ подается из четырех распределительных панелей. Струя омывает тело человека сверху вниз, таким образом создается более равномерное поле температур в кабине;

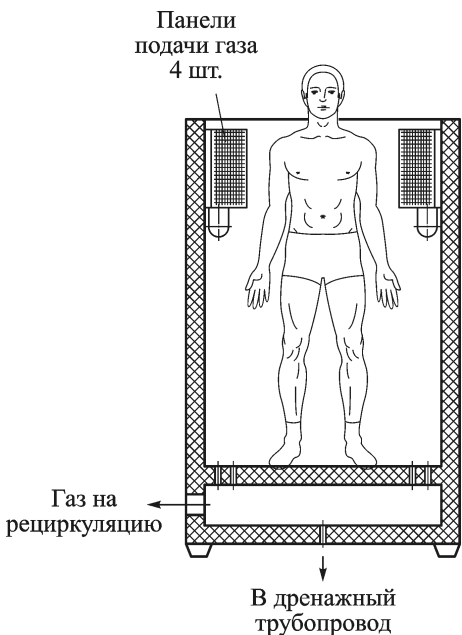


Рис. 6. Вид кабины (фронтальный разрез) с пациентом (находится внутри камеры, на него надет воротник — не показан); его обдувают низкоскоростные воздушные струи с четырех сторон; оператор контролирует температуру в азотной установке по штатному датчику в кабине; блок подготовки газа находится внутри фургона мобильного комплекса

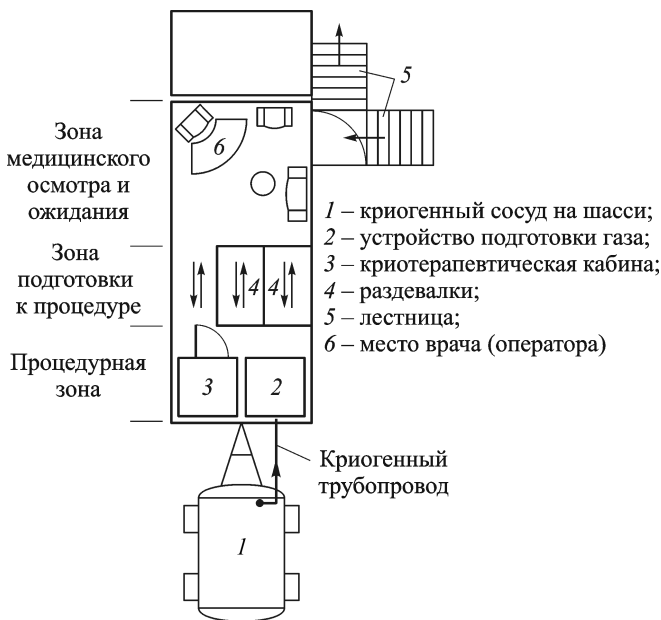


Рис. 7. План мобильного криотерапевтического комплекса

4. Теплообмен, а также отбивание крупных капель азота и снега, образованного при теплообмене, происходит в одном аппарате — контактном теплообменнике оригинальной конструкции;

5. Мобильный комплекс (рис. 7) с криогенной цистерной на прицепе и установкой, расположенной в машине, позволят сэкономить на доставке жидкого азота.

Установки с холодильными машинами. Воздух в таких установках охлаждается различными холодильными машинами до температуры от -80 до -120 °С (рис. 8). Применяются смесевые, трехкаскадные, двухкаскадные парокompрессионные холодильные машины. Воздушные холодильные машины пока не нашли применения.

Недостатки установок с холодильными машинами следующие: длительное время захлаживания по сравнению с азотными (табл. 1, 2); большее, по сравнению с азотной установкой, число сложных элементов; высокое электропотребление.

Основные фирмы-производители — Linde Gas Therapeutics GmbH (mecotec, www.mecotec.net), U.Seus & Team GmbH (www.seus.de), Zimmer MedizinSysteme GmbH (www.zimmer.de), ОАО ХОЛОД (www.kholod.kiev.ua), Grosso Limited (www.crio-cube.com). Подробнее можно ознакомиться в сети интернет.

Несколько лет назад появилась индивидуальная установка CRIОHOME на основе двухкаскадной холодильной машины на -80 °С (рис. 9) (www.mecotec.net, www.criohome.com).

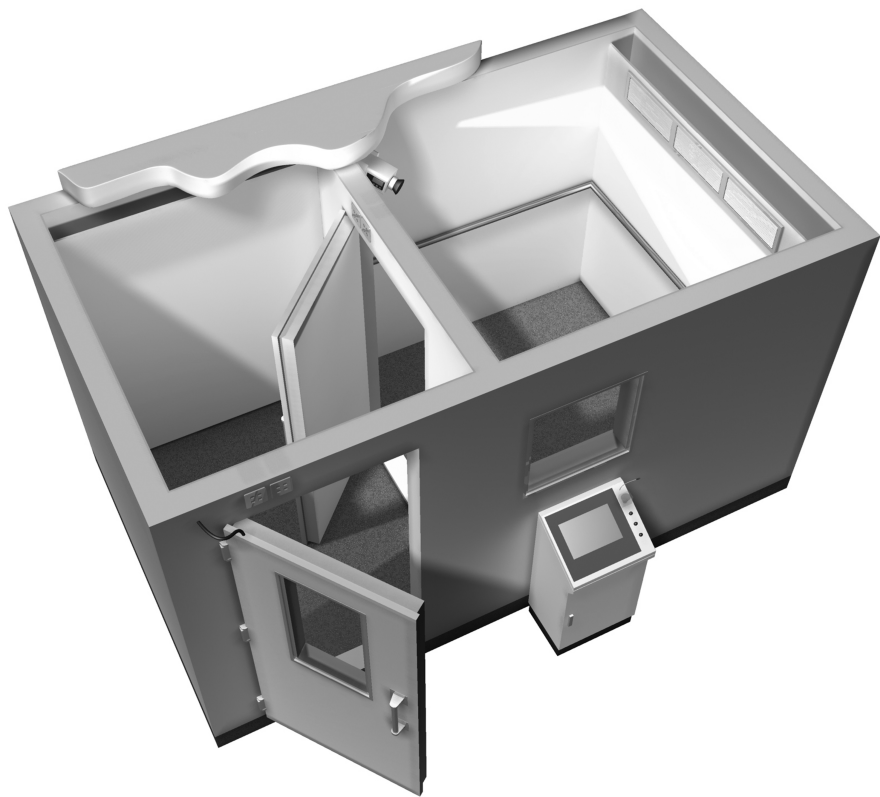


Рис. 8. Внешний вид кабины групповой трехкаскадной криотерапевтической установки. Кабина состоит из промежуточного и основного отделений, в котором находятся пациенты во время процедуры. Холодный воздух подается через решетки сверху. Оператор следит за процедурой по показаниям пульта управления и через окно в основное отделение

На взгляд авторов, может быть и не стоит гнаться за слишком низкой температурой в кабине пациента, а просто грамотно организовать теплообмен и режимы воздействия [7]. Современные криотерапевтические установки для организации режима теплообмена в кабине используют газ при температурах около -100°C в условиях, приближенных к естественной конвекции, что является неэффективным по экономическим соображениям [2]. С этой точки зрения стоит повысить температурный уровень в кабине пациента, при этом организовать теплообмен и режимы воздействия, исходя из требований медицинских работников.

В настоящей работе предложен проект энергетически эффективной, экономичной и удобной в эксплуатации криотерапевтической установки на базе одноступенчатой низкотемпературной коммерческой холодильной установки (рис. 10) и холодильной камеры с интенсивной циркуляцией воздуха (рис. 11) (кабина для пациента находится внутри камеры), т.е. в качестве хладоносителя циркулирует воздух и

Сравнение азотных криотерапевтических установок

Характеристика	“КАЭКТ-01-Крион”	“KRIO-KOMORA”, Польша	“Криомед 20/150-01”	Предлагаемый вариант азотной установки
Тип комплекса	Криобассейн	Криокабина	Криокабина	Криобассейн
Вместимость, чел.	1	5	1	1
Рабочая температура, °С	от – 120 до – 140	от – 110 до – 160	от – 110 до – 170	От – 120 до – 160
Тип холодопроизводящей установки	Запас жидкого азота	Запас жидкого азота	Запас жидкого азота	Запас жидкого азота
Тип хладоносителя	Азотовоздушная смесь	Азотовоздушная смесь	Азотовоздушная смесь	Азотовоздушная смесь
Расход азота при процедуре (без учета захлаживания), кг/мин	1,5	3–12 (групповая)	2	0,6–0,9
Пусковые затраты азота, кг	5	5–10	5	1,5–2
Время подготовки к работе, мин	1–5	5–10	5–10	1–5
Время процедуры, мин	2–3	2–3	2–3	2–3
Кратность процедуры, ч ⁻¹	10–15	До 40–60	10–15	15–20
Градиент температуры относительно вертикальной оси, °С/м	До 50	До 50	Около 10	Не более 3... 5
Скорость газобразных потоков около тела, м/с	0,1–0,5	0,1–0,5	0,1–0,5	0,1–0,5
Наличие контроля температуры поверхности тела, точность ±°С	Нет	Нет	Нет	Нет
Объем процедурной кабины, м ³	0,65	7	1	1,2
Потребляемая мощность, кВт	1,5	2–6	1,5	1
Степень автоматизации	Средняя			Высокая (за счет регулирования работы вентилятора и подачи азота)
Капитальные затраты, млн руб.	0,5–1	2–3	0,7–1,2	0,7–1

Сравнение установок с холодильными машинами

Тип холодильной установки	Трехкаскадные	Двухкаскадные	Смесевые	Предлагаемый вариант
Температура в кабине, °С	–110	–80	–120	–30
Тип хладоносителя	Воздух	Воздух	Воздух	Воздух
Пациентов при процедуре	1–5	1	1–5	1
Расчетное число пациентов в час (максимальное)	20–25	10–12	15–20	15–20
Средняя потребляемая установкой электрическая мощность, кВт	20–25	8–10	20–22	5–7
Время выхода на режим, мин	60–120	40–60	60–120	20–30 (ожидаемое)
Градиент температур относительно вертикальной оси камеры по росту человека, не более, °/м	10–20	15–25	10–20	3–5
Скорость газообразных потоков около тела, м/с	0,1–0,5	0,1–0,5	0,1–0,5	1–1,5
Капитальные затраты, млн р.	10	7	–	1
Эксплуатационные затраты в сравнении	Высокие	Средние	Высокие	Низкие
Степень автоматизации в сравнении	Высокая	Высокая	Средняя	Высокая
Наличие контроля температуры поверхности тела, точность ± °С	Нет	Нет	Нет	5



Рис. 9. Внешний вид кабины индивидуальной двухкаскадной криотерапевтической установки CRIOHOME; имеется только основное отделение; холодный воздух подается через фальш-потолок; окно совмещено с дверью

и теплоизолированное пространство — камера из сэндвич-панелей. Холодопроизводящей установкой является одноступенчатая ПКХМ, теплоизолированное пространство — камера из сэндвич-панелей (см. рис. 4).

Техническая характеристика установки с холодильными машинами

Температура воздуха в камере, °С.....	От –25 до –35
Холодопроизводительность при –40 °С, кВт.....	7
Коэффициент преобразования.....	1,05
Датчик температуры тела.....	Бесконтактный
Ожидаемая длительность процедуры, мин.....	2–3
Кабина.....	Индивидуальная

Основные особенности предлагаемого проекта.

1. Повышенная температура в кабине (уменьшена разность температур между телом и средой, в начале процедуры $\Delta t = 62 \dots 66 \text{ }^\circ\text{C}$, а не $\Delta t = 110 \dots 140 \text{ }^\circ\text{C}$, как в каскадных);

2. Требуемый тепловой поток отводится за счет струйного натекания газа на поверхность тела ($Q_{\text{чел}} = 3 \dots 5 \text{ кВт/м}^2$);



Рис. 10. Внешний вид предлагаемой криотерапевтической установки в помещении (оператор проводит процедуру, пациент находится внутри камеры, его обдувают воздушные струи вентиляторов; визуальный контроль проводится через стеклянную дверь, контроль температуры — по пирометру, установленному внутри кабины); холодильная установка располагается снаружи

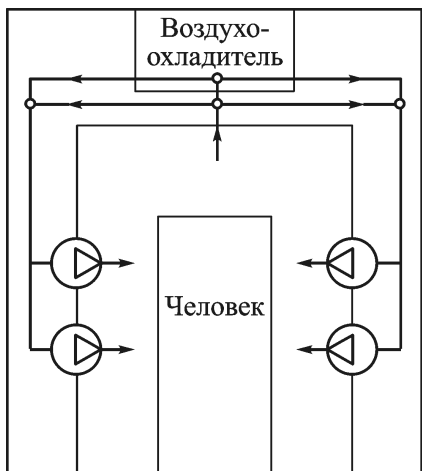


Рис. 11. Схема интенсификации обдува в кабине (воздушная струя из вентиляторов обдувает человека и через фальш-потолок поступает к воздухоохладителю)

3. Бесконтактный термометр (пирометр) показывает момент окончания процедуры, чего нет в существующих установках;

4. Холодная промежуточная стенка интенсифицирует теплоотвод от человека излучением (температура внутренней стенки кабины, непосредственно взаимодействующей с телом, $t_{ст} = -30\text{ }^{\circ}\text{C}$).

5. Парокомпрессионная машина представляет собой вполне обычный низкотемпературный агрегат коммерческого холода. Выбор парокомпрессионной холодильной машины обусловлен удобством эксплуатации, технологичностью, широкой распространенностью и удобством автоматизации.

Метод криотерапии доказал свою эффективность на практике. Существует широкий модельный ряд установок и два основных способа охлаждения. За последние годы набран некоторый опыт в проведении

процедур. Необходимо сделать следующий шаг в развитии данного направления криомедицинской техники.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баранов А. Ю., Кидалов В. Н. Лечение холодом. Криомедицина. – СПб.: Атон, 1999.
2. Будрик В. В. Физические основы криометодов в медицине. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 130 с.
3. Клинико-физиологические аспекты применения криотерапии / А.Г. Шиман, В.В. Кирьянова, А.В. Максимов и др. // Вестник СПб. гос. мед. академии им. И.И. Мечникова. – 2001. – № 1.
4. Зависимость формирования терморегуляторных реакций на охлаждение от типа активности кожных терморепцепторов / Е.Я. Ткаченко и др. // Бюллетень СО РАМН. – 2010. – Т. 30. № 4. – С. 95–100.
5. Выбор и обоснование технологии аэро-криотерапевтического воздействия / А.Ю. Баранов и др. // Изв. СПб. гос. ун-та низкотемпературных и пищевых технологий. – 2003. – № 2. – С. 84–86.
6. Жердев А. А., Сергеева А. А. Взаимосвязь механизмов теплообмена и терморегуляции человека в низкотемпературных камерах // Холодильная техника. – 2007. – № 6.
7. Жердев А. А., Сергеева А. А. Обзор становления криотерапевтического оборудования // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. – 2008. Спец. выпуск. – С. 112–120.

Статья поступила в редакцию 27.06.2012