

Оценка величины теплопритоков через верхнее сечение индивидуальных криобассейнов

Канд. техн. наук А. Ю. БАРАНОВ, А. В. САВЕЛЬЕВА, А. Ю. СИДОРОВА, Ю. А. КАРЦЕВА
Санкт-Петербургский государственный университет низкотемпературных и пищевых технологий
191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9

Saint-Petersburg State University of Refrigeration and Food Technologies Individual cryopools are devices for the general cryotherapy. Cooling cryopool is based on use of liquid nitrogen. Steams of nitrogen with temperature nearby 140 K are taken away from cryopool in atmosphere its top section. Steam movement reduces a supply of warmth heat conductivity to level of 4 Wt/m^2 . The warmth supply through the top section of pool in 1000 times is less than thermal emissions from a body of the patient. Thanks to steams of nitrogen warmth inflow through the top section is insignificant.

Key words: cryotherapy, cryopools, heat conductivity, liquid nitrogen.

Ключевые слова: криотерапия, криобассейн, теплопроводность, жидкий азот.

Индивидуальные криобассейны — наиболее распространенный вид криогенного физиотерапевтического оборудования. Они составляют свыше 85 % отечественного парка аппаратов для общей криотерапии. Общая криотерапия (ОК) — охлаждение поверхности человеческого тела в газовой среде температурой от 120 до 140 К [1]. Во время процедуры температура тонкого (0,2 мм) поверхностного слоя кожи, в котором расположены холодовые рецепторы, снижается до уровня $t_{i=1} = -2 \text{ }^\circ\text{C}$. Для защиты объекта криотерапии от переохлаждения время процедуры не должно превышать 3 мин.

Использование криогенного газа позволяет выполнять технологическую задачу процедуры ($t_{i=1} \rightarrow -2 \text{ }^\circ\text{C}$) без вреда для здоровья пациента. Ввиду значительного градиента температур между объектом ОК и криогенным газом-теплоносителем с поверхности объекта отводится беспрецедентно большой (для биологических систем) поток теплоты. Показано [2], что средний тепловой поток с поверхности тела составляет 3 кВт/м^2 , а с учетом полной площади кожного покрова ($1,5 \text{ м}^2$) и тепловыделений от изоляционной конструкции общая тепловая нагрузка на систему криостатирования одноместного аппарата для ОК достигает 5 кВт. В пересчете на единицу объема криобассейна средняя тепловая нагрузка достигает величины 10 кВт/м^3 . Отвод теплоты осуществляется на температурном уровне ниже 140 К, что значительно усложняет задачу криостатирования низкотемператур-

ной зоны аппарата для ОК. Доказано [2], что единственным рентабельным решением задачи криостатирования криотерапевтических установок (КТУ) является использование жидкостного квазицикла.

Использование жидкого криоагента в полной мере отвечает специфике медицинских учреждений, в частности обеспечивает минимальное энергопотребление и высокую компактность оборудования. Жидкостной квазицикл эффективно использовать в сочетании с контактным переносом теплоты от циркулирующего через низкотемпературную зону теплоносителя к криоагенту [2].

На заданном температурном уровне в качестве криоагента может быть использован только жидкий азот, поэтому в КТУ с контактным охлаждением теплоносителя газ-теплоноситель полностью состоит из паров азота и непригоден для дыхания. Для защиты пациентов индивидуальных КТУ от вдыхания паров азота используют различные конструкции исполнительного устройства КТУ — кабины пациента [3], которые ограничивают зону распространения газа-теплоносителя и предупреждают его попадание в органы дыхания.

Схема индивидуального криобассейна позволяет использовать гравитационные силы для локализации газа, обогащенного азотом. Обладая повышенной плотностью ($\rho_{\text{тн}} \approx 2,5 \text{ кг/м}^3$), криогенный теплоноситель стратифицируется в пределах теплового ограждения криобассейна (рис. 1).

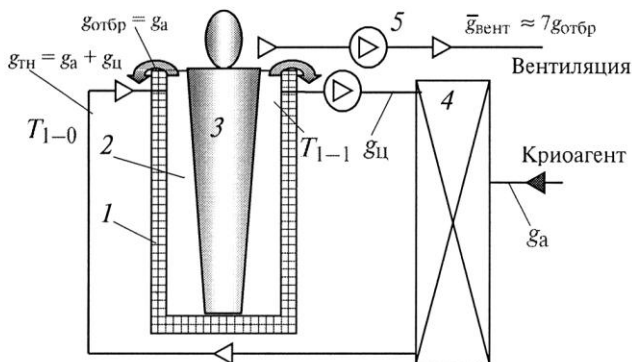


Рис. 1. Принципиальная схема индивидуального криобассейна:
 1 — тепловое ограждение; 2 — криогенный газ;
 3 — объект охлаждения; 4 — контактный теплообменник;
 5 — система вентиляции

Пациент размещается в криобассейне таким образом, чтобы органы дыхания находились в зоне, заполненной атмосферным воздухом. Площадь контакта между кожным покровом и теплоносителем снижается примерно на 10 %. Сокращение площади воздействия криогенного газа считается недостатком криобассейнов. Однако при использовании в качестве теплоносителя паров азота обеспечить полное погружение тела в теплоноситель невозможно. При любой конструкции исполнительного устройства не менее 5 % площади тела остается вне зоны охлаждения. В то же время в криобассейне полный комфорт и безопасность пациента сочетаются с простотой конструкции теплового ограждения.

Технологическая схема индивидуального криобассейна

Технология криостатирования криобассейна основана на передаче теплоты, выделяемой в низкотемпературной зоне КТУ, к жидкому криоагенту. Подвод теплоты вызывает интенсивное испарение жидкого азота, средний расход паров криоагента составляет $0,04 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^3)$.

При использовании системы криостатирования, построенной на основе жидкостного квазицикла, утилизировать теплоту перегрева отбросных паров невозможно. Поток отработанного азотного пара проходит через бассейн (см. рис. 1) и сбрасывается в атмосферу. При смешении холодного газа температурой 140 К и атмосферного воздуха образуется большой объем тумана, который привлекает внимание наблюдателей, воспринимается ими как признак нерационального использования криоагента и служит источником многочисленных предложений, направленных во избежание этих «потерь».

Открытая сверху кабина криобассейна также не соответствует общепринятым представлениям о низкотемпературных объектах. Высказываются предположения о значительных притоках теплоты из окружающей среды

через верхнее сечение кабины. Чтобы доказать положительные стороны конструкции криосауны, необходимо рассмотреть ее технологическую схему.

Температура газа 2, заполняющего пространство между объектом охлаждения 3 и тепловым ограждением бассейна 1, поддерживается на уровне 140 К за счет интенсивной вентиляции потоком газа, поступающего от контактного теплообменника 4. В теплообменник 4 подается циркуляционный поток теплоносителя $g_{ц}$ и поток криоагента g_a . В результате контактного теплообмена газ охлаждается, а криоагент испаряется. Из теплообменника в бассейн входит поток теплоносителя, состоящий из циркуляционного потока и паров криоагента. Расход потока теплоносителя составляет $g_{тн} = g_a + g_{ц}$. Температура газа-теплоносителя ниже, чем температура газа в объеме бассейна:

$$T_{1-0} = T_{1-1} - \Delta T_1.$$

В объеме бассейна теплоноситель отводит теплоту, выделяемую с поверхности объекта охлаждения q_2 и тепловой изоляции q_3 , и перегревается до температуры T_{1-1} . Основная часть теплоносителя $g_{ц}$ отводится из объема бассейна в теплообменник 4 на регенерацию. Часть потока в количестве $g_{отбр} = g_a$ сбрасывается через ограждение бассейна 1 в атмосферу. Для безопасности пациента пространство над бассейном вентилируется атмосферным воздухом. Расход воздуха в вентиляционной системе 5 в 7 раз превышает расход отбросного газа $\bar{g}_{вент} \approx 7g_{отбр}$.

Криостатирование объема бассейна осуществляется за счет перегрева газа-теплоносителя. Тепловой баланс бассейна: $g_{тн} c_p \Delta T_1 = q_{\Sigma} = q_2 + q_3$. Допустимый перегрев теплоносителя ограничен $\Delta T_1 \leq 20 \text{ К}$, поэтому удельный расход теплоносителя достаточно велик:

$$g_{тн} = \frac{q_{\Sigma}}{c_p \Delta T_1},$$

или

$$g_{тн} \approx 0,5 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^3).$$

Подвод теплоты в теплообменник 4 осуществляется циркуляционным потоком

$$q_{ц} = g_{ц} c_p (T_{1-1} - T_{1-0}) = g_{ц} c_p \Delta T_1.$$

Расход криоагента определяется из теплового баланса теплообменника 4:

$$g_a c_p (T_{1-1} - T_{1-0}) = g_a [r'_a + c_p (T_{1-0} - T''_a)],$$

где r'_a — теплота парообразования азота при атмосферном давлении, $r'_a = 199 \text{ кДж}/\text{кг}$;

T''_a — температура насыщенных паров азота, $T''_a = 78 \text{ К}$.

Можно определить отношение материальных потоков теплообменника:

$$g_a = g_{ц} \frac{c_p(T_{1-1} - T_{1-0})}{r'_a + c_p(T_{1-0} - T''_a)}$$

или $g_a = k_a g_{ц}$ ($k_a \approx 0,083$).

Материальный баланс теплообменника 4 позволяет определить величину $g_{ц}$:

$$g_{тн} = g_a + g_{ц},$$

или

$$g_{тн} = g_{ц}(1 + k_a),$$

тогда $g_{ц} = g_{тн}/(1 + k_a)$, или $g_{ц} = g_{тн}/(1 + 0,083) = 0,923g_{тн}$.

С учетом полученного ранее значения расхода теплоносителя $g_{тн} \approx 0,5 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^3)$ можно определить удельные величины материальных потоков через теплообменник 4: $g_{ц} \approx 0,462 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^3)$ и $g_a \approx 0,038 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^3)$.

Таким образом, через верхнее сечение криобассейна в вертикальном направлении движется поток отбросного газа $g_{отбр} = g_a \approx 0,038 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^3)$. По известному расходу газа в отбросном потоке можно определить потери от недорекуперации:

$$q_{нед} = g_{отбр} c_p (T_{ос} - T_{1-1}),$$

или

$$q_{нед} = 5,7 \text{ кВт}/\text{м}^3.$$

Потери составляют около 36 % от полной теплоотводящей способности криоагента, но на температурном уровне 140 К невозможно использовать холодопроизводительность, потерянную из-за сброса в атмосферу холодного отбросного потока. Для повышения энергоэкономичности криотерапевтических систем можно использовать компрессионные циклы криостатирования, что неизбежно увеличит капитальные затраты на изготовление КТУ.

На сегодняшний день экономия энергии не оправдывает увеличения капитальных затрат, поэтому КТУ с жидкостным криостатированием наиболее рентабельны. Однако по мере роста пропускной способности криотерапевтических кабин компрессионные циклы могут быть востребованы.

Тепловой баланс верхнего сечения криобассейна

Конструкция криобассейна отличается от большинства низкотемпературных установок тем, что заполненное криогенным газом пространство в верхнем сечении не имеет теплового ограждения. Это конструктивное решение обеспечивает выполнение ряда специфических

медицинских требований, но вызывает предположения о значительном количестве теплоты, проникающей из окружающей среды в низкотемпературную зону бассейна. Ниже приводится тепловой анализ процесса переноса теплоты в верхнем сечении бассейна, который позволяет оценить величину теплопритоков вдоль вертикальной оси симметрии.

Для анализа воспользуемся схемой материальных и тепловых потоков в верхней части криобассейна (рис. 2).

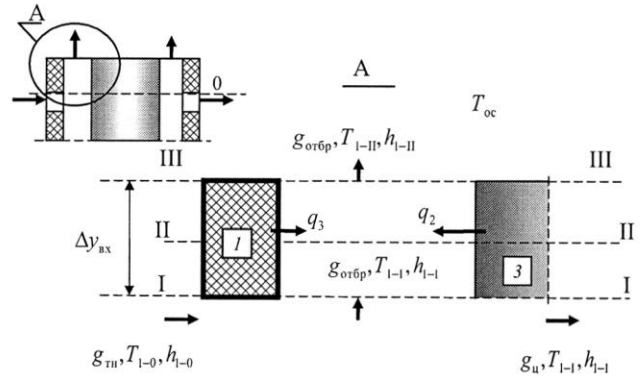


Рис. 2. Тепловая схема верхнего участка кабины криобассейна

Теплоноситель $g_{тн}$ подается в бассейн в сечении I–I, расположенном ниже верхней границы ограждения на расстоянии $\Delta y_{вх} = 0,05 \text{ м}$. В той же плоскости осуществляется отвод циркуляционного потока газа $g_{ц}$ на регенерацию. Отбросной поток $g_{отбр}$, отводится в окружающую среду через кольцевой канал образованный поверхностью объекта охлаждения 3 и тепловым ограждением бассейна 1.

Для оценки величины подвода теплоты к сечению I–I теплопроводностью через сечение III–III используем одномерное дифференциальное уравнение энергии газового потока [4]

$$\rho \frac{\partial h}{\partial \tau} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) - \rho \left(w_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) - \rho h \left(\frac{\partial w_y}{\partial y} \right) + q_v,$$

или

$$\rho \frac{\partial h}{\partial \tau} = \frac{\partial q_\lambda + \partial q_w + \partial q_\rho}{\partial y} + q_v,$$

где ∂q_λ — перенос теплоты теплопроводностью;

∂q_w — конвективный перенос теплоты;

∂q_ρ — перенос теплоты, связанный с изменением плотности газа;

q_v — подвод теплоты от внутренних источников.

Численное решение уравнения энергии позволяет оценить влияние подвода теплоты на температуру газа на участке, ограниченном сечениями I–I и III–III. Новое значение энтальпии газа в сечении II–II определится из выражения:

$$h'_{II} = h'_{II} + \frac{(\Delta q_{\lambda} + \Delta q_w + \Delta q_p + q_v \Delta y) \Delta \tau}{\rho \Delta y}$$

Граничные условия решения уравнения энергии:

для сечения I–I $T_I = T_{I-0}$, $h_I = h_{I-0}$;

для сечения III–III $T_{III} = T_{oc}$, $h_{III} = h_{oc}$.

Начальные условия: при $\tau = 0$ в сечении II–II

$$T_{I-II} = \frac{T_{I-I} + T_{oc}}{2},$$

$$h_{I-II} = \frac{h_{I-I} + h_{oc}}{2}.$$

Ранее получено $g_{отбр} = g_a \approx 0,038$ кг/(с·м³). Используя численное решение уравнения энергии, моделируем процесс переноса теплоты через среднее сечение II–II. В результате расчета получаем график изменения температуры теплоносителя в сечении II–II в течение 30 с от начала работы криобассейна (рис. 3).

Температура теплоносителя в сечении II–II быстро снижается от значения $T_{I-II} = \frac{T_{I-I} + T_{oc}}{2} = 215$ К при $\tau = 0$ до равновесного значения $T_{I-II} \approx 149$ К при $\tau = 30$ с. Характер кривой $T_{I-II} = f(\tau)$ показывает, что в сечении II–II достигнут тепловой баланс между теплотой, подведенной от внутренних источников подводом теплоты теплопроводностью, и количеством теплоты, отведенной отбросным потоком. Отбросной поток выполняет роль «динамической» теплоизоляции, поэтому подвод теплоты из окружающей среды к циркуляционному потоку теплоносителя $g_{ц}$ составляет не более 40 Вт/кг, что вызывает пренебрежимо малый перегрев циркуляционного потока $T_{\lambda} < 0,1$ К. В дальнейшем подвод теплоты из окружающей среды через верхнее сечение кабины можно не учитывать.

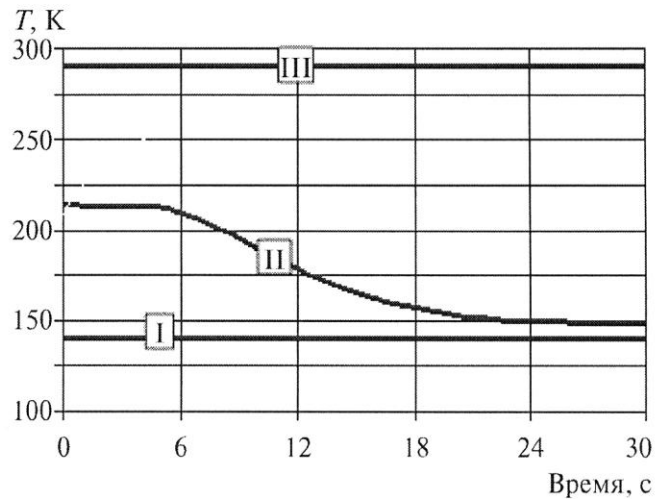


Рис. 3. График изменения температуры газа в верхнем сечении криобассейна: I, II, III — температура в сечениях I–I, II–II и III–III соответственно

Список литературы

1. Баранов А. Ю., Трубников С. Н. Оптимизация технологии аэрокриотерапевтического воздействия // Сб. науч. тр. «Медицинская криология». 2001. № 2.
2. Баранов А. Ю., Сулов А. Е. Анализ тепловой нагрузки на блок подготовки теплоносителя в устройствах криотерапевтического воздействия // Вестник Международной академии холода. 1999. № 4.
3. Баранов А. Ю. Патент на полезную модель № 38591 «Криотерапевтическое устройство». Бюл. № 19, 2004.
4. Исаченко В. А., Осипова А. С., Сукомел А. С. Теплопередача. — М.: Энергоиздат, 1981.