

**ИСПАРИТЕЛЬНОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ В КОНДИЦИОНИРУЕМОЙ ОДЕЖДЕ**

© 2012 Н.В. Савченко

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва  
(национальный исследовательский университет)

Поступила в редакцию 27.04.2012

Рассмотрена возможность применения в кондиционируемой одежде процессов кипения и испарения воды для перехвата теплового потока, поступающего из окружающей среды. Приведены расчетные характеристики тепловых процессов. Полученные результаты могут быть использованы при разработке кондиционируемой одежды, применяемой в условиях нагревающего производственного микроклимата.

Ключевые слова: нагревающий микроклимат, индивидуальное кондиционирование, испарение, теплозащита, фазовый переход “вода-пар”.

Технология охлаждения с использованием энергоемкости перехода вещества из одного агрегатного состояния в другое, в частности из жидкого состояния в газообразное, достаточно продолжительное время используется в технике. Один из самых энергоемких переходов имеет вода. В соответствии с концепцией создания и применения энергопотребляющих средств индивидуальной защиты [5], предусматривающей вовлечение в процессы функционирования средств индивидуальной защиты (СИЗ) ранее не применяемых физических явлений, рассмотрим возможность использования данного явления в схемах процесса охлаждения кондиционируемой одежды.

Принято различать фазовые переходы первого ряда, имеющие одинаковую энергоемкость и получившие наименование “кипение” и “испарение”. При кипении тепло к жидкости поступает от поверхности, соприкасающейся с ней. При испарении тепло поступает к открытой поверхности, соприкасающейся с окружающим воздухом. В кондиционируемой одежде процесс кипения воды нашел применение для охлаждения вихревой трубы индивидуального кондиционера [3].

Рассмотрим иные случаи использования энергоемкости фазового перехода “вода – пар” в испарительном охлаждении.

Испарительное охлаждение в условиях умеренной температуры окружающей среды

Испарительное охлаждение реализуется в теплозащитной одежде при работе в нагревающем производственном климате с температурой окружающей среды до + 50 °С и низкой относительной влажности воздуха, а также при работе в летнее время на открытом воздухе.

Такой способ охлаждения используется достаточно часто и заключается в периодическом обливании одежды водой и ее последующем ис-

*Савченко Нелли Вячеславовна, кандидат технических наук, доцент. E-mail: snellyv@mail.ru*

парении. Рядом авторов описаны исследования одежды с постоянной подачей воды на поверхность или на один из ее внутренних слоев [1, 2]. Однако эти исследования не носили самостоятельного характера, а были способом расширить возможности вентилируемой теплозащитной одежды. Однако, несмотря на получение устойчивого положительного эффекта охлаждения, данный способ практически не был реализован в каких-либо модификациях кондиционируемой одежды из-за ряда возникших неудобств: необходимость периодического обливания одежды достаточно обременительный процесс, а постоянный равномерный полив ее через систему перфорированных шлангов или систему форсунок при кажущейся простоте организовать на практике оказалось затруднительным. Кроме того, при такой системе под охлаждаемым верхним слоем изолирующей одежды образовывается среда с высокой относительной влажностью, препятствующая испарению пота, т.е. блокируется один из естественных каналов отведения метаболического тепла, возникающего в результате жизнедеятельности организма. Но основная неудача распространения испарительного способа охлаждения, на наш взгляд, заключается в том, что ее всерьез не воспринимали и не пытались довести до практически приемлемого состояния.

Техническая сложность организации подвода воды к испаряющей поверхности и равномерное ее распределение по всей площади преодолена в конструкции охлаждаемой панели, приведенной на рис. 1 (а). Охлаждаемая панель состоит из слоя тканного материала 1 толщиной  $d$ . Этот материал изготовлен из смачиваемого волокна (лен, хлопок) и имеет объемную плотную структуру, образующую сеть капилляров. Его капиллярная структура позволяет воде перемещаться вдоль ткани и удерживает ее в виде тонкой пленки на поверхности. Аналогичную

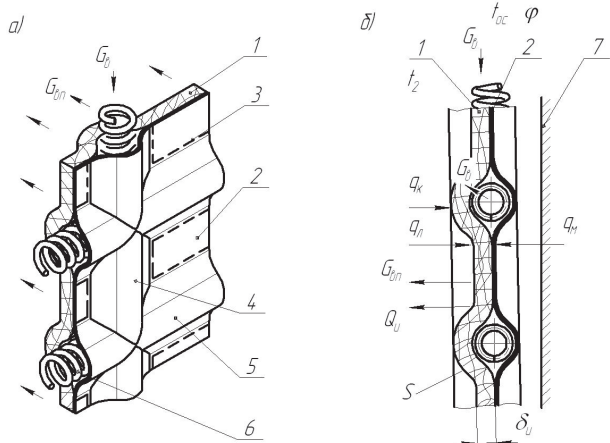


Рис. 1. а - конструкция охлаждаемой панели; б - схема тепломассобмена

картину можно наблюдать на поверхности тканых пожарных рукавов. С внутренней стороны ткани 1 располагается тонкая влагонепроницаемая ткань 2, пришитая швами 3 таким образом, что образует сеть, состоящую из коллектора 4 и разводящих каналов 5. В коллектор и разводящие каналы вставлена спираль 6, изготовленная из упругой пластиковой нити. В такой конструкции на большой площади достигается непосредственный контакт жидкости с тканно-волоконистым материалом испаряющей панели. Вода в подводящие каналы из коллектора подается под небольшим давлением и пропитывает весь массив ткани.

Для оценки возможности использования испарительного охлаждения в кондиционируемой одежде необходимо определить минимальную достижимую температуру панели и расход испаряемой охлаждающей воды в зависимости от температуры и влажности окружающей среды и состояния кондиционируемого объекта. На рис. 1 (б) приведена схема тепломассобмена с использованием охлаждающей панели, прикрывающей часть поверхности 7 тела человека. В установившемся режиме минимальная достижимая температура панели  $t_2$  (рис. 2) будет определяться температурой окружающей среды  $t_{oc}$  и относительной влажностью  $\varphi$  окружающего воздуха (по данным психрометрических таблиц).

Установившийся тепловой баланс охлаждаемой панели имеет вид:

$$Q_k + Q_l + Q_m - Q_u = 0,$$

где  $Q_k = q_k S \tau$  – тепло, поступающее из окружающей среды в результате конвективного теплообмена на площадь поверхности  $S \text{ м}^2$  в течение времени  $\tau$ . Интенсивность конвективного теплового потока  $q_k = \alpha(t_{oc} - t_2)$ . Коэффициент теплоотдачи к поверхности из окружающей среды  $\alpha$  в основном зависит от местной скорости и направления перемещения воздуха относительно охлаждаемой панели. В есте-

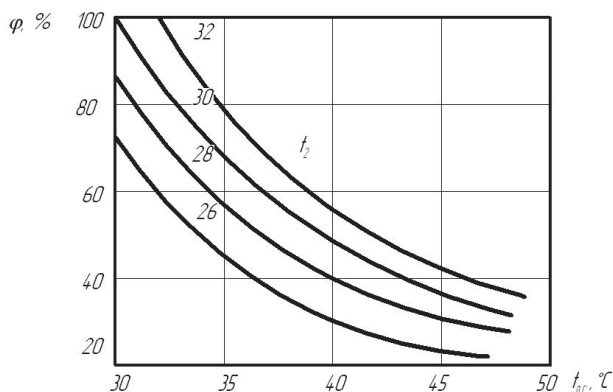


Рис. 2. Минимальная температура панели, охлаждаемой испарением воды, в зависимости от температуры и влажности окружающей среды

ственных условиях коэффициент теплоотдачи может изменяться в пределах  $3 \div 30$ .

$Q_l = q_l S \tau$  – тепло, поступающее в виде излучения и поглощенное поверхностью. Интенсивность лучистого теплового потока зависит от многих параметров. Мы рассмотрим случай использования кондиционируемой одежды на открытом пространстве в средних географических широтах. Интенсивность поглощенного теплового потока солнечной радиации в данном случае не превысит  $30 \text{ Вт/м}^2$ .

$Q_m$  – метаболической тепло, поступающее от поверхности тела человека к охлаждаемой панели, зависит от многих параметров, в том числе и от вида и соотношения процессов теплоотдачи к охлаждаемой панели. Для оценки его величины воспользуемся экспериментальными данными [2] и примем не выше  $60 \text{ Вт/м}^2$ .

$Q_u = G_e r \tau$  – тепло, отводимое в окружающую среду в процессе испарения воды с расходом  $G_e$ , удельной теплотой парообразования  $r$ , при образовании пара в количестве  $G_{en} = G_e$ .

В результате решения уравнения теплового баланса определяется потребный минимальный расход воды, испаряющейся с охлаждаемой панели. На рис. 3 приведена зависимость расхода испаряющейся воды  $G_e = f(t_{oc}, \varphi)$ .

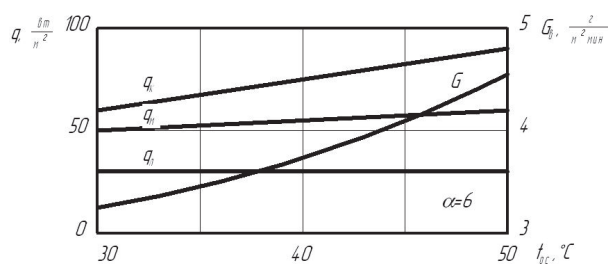
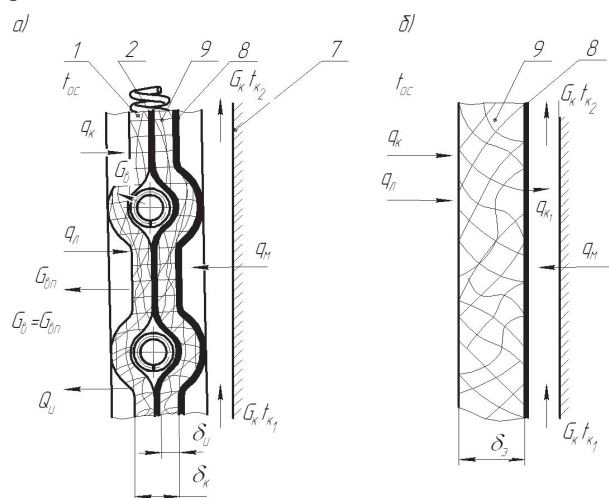


Рис. 3. Интенсивность тепловых потоков к охлаждаемой панели и расход испаряющейся воды в зависимости от температуры окружающей среды

### ОХЛАЖДАЕМАЯ ВНЕШНЯЯ ОБОЛОЧКА КОНДИЦИОНИРУЕМОЙ ОДЕЖДЫ ДЛЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ С КРАЙНЕ ВЫСОКОЙ ТЕМПЕРАТУРОЙ

В вентилируемой кондиционируемой одежде для уменьшения расхода кондиционирующего воздуха используется пассивная или динамическая теплоизоляция. Динамическая теплоизоляция [4] принципиально уменьшает потребление кондиционирующего воздуха и делает его расход независимым от температуры окружающей среды. Однако при высокой подвижности воздуха окружающей среды использование динамической теплоизоляции становится затруднительным из-за локального изменения ее характеристик. При пассивной теплоизоляции расход кондиционирующего воздуха обратно пропорционален ее толщине, но из условий эксплуатации, толщина теплоизоляции имеет ограничение. Кроме того, с ростом температуры окружающей среды внешний слой теплоизоляции приходится изготавливать из более плотных материалов. Рассмотрим возможность применение внешней оболочки кондиционируемой одежды охлаждаемой испарением с целью уменьшения суммарной толщины теплоизоляции. На рис. 4 (а) приведена схема теплообмена при комбинированной теплоизоляции (нумерация элементов схем рис. 1 и 4 одинаковая). В зазоре между поверхностью 7 тела человека и изолирующей оболочкой 8 продувается кондиционирующий воздух с расходом  $G_k$  и средней температурой  $t_k$ . Изолирующая оболочка с внешней стороны имеет теплоизоляцию 9. К этому слою примыкает оболочка 1, охлаждаемая испарением воды с внешней поверхности.

Установившийся тепловой баланс комбинированной теплоизоляции имеет вид:



**Рис. 4.** Схема теплообмена при комбинированной теплоизоляции с испарительным охлаждением (а) и при пассивной теплоизоляции (б)

$$Q_k + Q_l + Q_m - Q_u - Q_v = 0,$$

где  $Q_k$  – тепло, поступающее из окружающей среды в результате конвективного теплообмена,  $Q_m$  – метаболическое тепло, поступающее от поверхности тела человека в поток кондиционирующего воздуха,  $Q_u$  – тепло, отводимое в окружающую среду в процессе испарения воды.

Порядок расчета величин  $Q_k$  и  $Q_m$  аналогичен рассмотренному в предыдущем примере.

$Q_l = q_l St$  – тепло, поступившее в виде излучения.

Интенсивность лучистого теплового потока:

$$q_l = \varepsilon_{np} C \left[ \left( \frac{273 + t_{oc}}{100} \right)^4 - \left( \frac{273 + t_2}{100} \right)^4 \right]$$

$$\varepsilon_{np} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} = 0,88 \text{ – приведенная}$$

степень черноты.

Из условий предполагаемого применения кондиционируемой одежды для ремонта не полностью расхоложенных нагревающих (плавильных) печей для охватываемой поверхности принимаем степень черноты  $\varepsilon_1 = 0,97$ . Такую степень черноты имеют большинство футеровочных материалов, в частности динасовый кирпич. Степень черноты “охватываемой” поверхности – охлаждаемой панели кондиционируемой одежды принимаем  $\varepsilon_2 = 0,9$ .

$$C = 5,7 \frac{вт}{м^2 К^4} \text{ – коэффициент излучения}$$

абсолютно черного тела.

$Q_v = G_k C (t_{k2} - t_{k1})$  – тепло, отводимое в окружающую среду в процессе кондиционирования.

$t_{k1}, t_{k2}$  – температура кондиционирующего воздуха на входе и выходе из кондиционируемой одежды.

$C = 992 \frac{дж}{кг \cdot К}$  – удельная теплоемкость воздуха.

$G_k$  – расход кондиционирующего воздуха.

В результате решения уравнения теплового баланса определим расход испаряющейся охлаждаемой воды и толщину пассивной теплоизоляции эквивалентную комбинированной. Из общего теплового баланса выделим тепловой баланс охлаждаемой панели.

$$Q_k + Q_l - Q_{1к} - Q_u = 0,$$

где  $Q_{1к} = q_{1к} S \tau$  – тепло, отводимое в поток кондиционирующего воздуха через внутреннюю поверхность изолирующей оболочки.

Интенсивность теплового потока

$$q_{1к} = \frac{\lambda}{\delta_u} (t_2 - t_{ксп}).$$

Принимаем в качестве допущения температуру внутренней поверхности изолирующей оболочки равной средней температуре кондиционирующего воздуха (+ 28 °С). При более высокой температуре отведение метаболического тепла в поток воздуха становится затруднительно. Температуру охлаждаемой панели принимаем равной температуре кипения воды ( $t_2 = 100$  °С). Толщина теплоизоляции ( $\delta_u = 0,006$  м) выбрана из конструктивных соображений, ее назначение – несколько ослабить интенсивность теплового потока в кондиционирующий воздух. Ряд нетканых материалов, которые по своим характеристикам могут быть использован в конструкции кондиционируемой одежды, обладает коэффициентом теплопроводности  $\lambda = 0,04 \frac{вт}{м \cdot к}$ .

На рис. 5 приведен расход воды на охлаждение панели испарением в зависимости от температуры окружающей среды.

Комбинированная теплоизоляция имеет значительно более сложную конструкцию, чем пассивная, и ее применение оправдано только при наличии иных преимуществ. Одним из параметров сравнения может быть толщина, увеличение которой регламентируется удобствами эксплуатации кондиционируемой одежды. Определим толщину пассивной теплоизоляции, эквивалентной по теплозащитным свойствам комбинированной теплоизоляции. Критерием при их сравнении может быть расход кондиционирующего воздуха, поскольку для его снижения в основном и применяется теплоизоляция. Расход кондиционирующего воздуха определяется количеством тепла, поступающего в него через внутреннюю поверхность теплоизоляции и метаболическим теплом. Величина метаболического тепла не зависит от способа теплоизоляции. В обоих случаях она одинаковая. Приравняв тепловые потоки идущие через внутреннюю поверхность

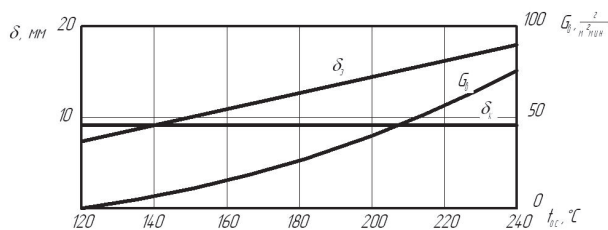


Рис. 5. Толщина теплоизоляции и расход воды на охлаждение панели испарением в зависимости от температуры окружающей среды

изолирующей оболочки, получим толщину эквивалентной пассивной теплоизоляции

$$\delta_3 = \delta_u \frac{t_{oc} - t_{ксп}}{t_2 - t_{ксп}}.$$

На рис. 5 эта величина представлена в зависимости от температуры окружающей среды  $\delta_3 = f(t_{oc})$ . Конструктивно комбинированная теплоизоляция укладывается в толщину  $\delta_k \approx 9$  мм. Начиная с температуры окружающей среды + 140 °С комбинированная теплоизоляция имеет преимущество перед пассивной по толщине.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Городинский С.М.* Средства индивидуальной защиты для работ с радиоактивными веществами. М.: Атомиздат, 1973, 296 с.
2. *Кащеев В.С., Кузнец Е.И.* Физиология и гигиена индивидуальной защиты человека в условиях высоких температур. М.: Медицина, 1986, 256 с.
3. *Савченко Н.В.* Гибридная двухкаскадная схема охлаждения сжатого воздуха для энергопотребляющих средств индивидуальной защиты // Известия Самарского научного центра РАН. 2009. Том 11 № 3. С. 245-248.
4. *Савченко Н.В.* Механизм теплообменного процесса в динамической теплоизоляции кондиционируемой одежды // Известия Самарского научного центра РАН. 2009. Том 11. №5. С. 344-347.
5. *Савченко Н.В.* Энергопотребляющие средства индивидуальной защиты для работы в промышленном нагреваемом микроклимате. Самара: Самарский научный центр РАН. 2011. 160 с.

## EVAPORATIVE COOLING IN THE CONDITIONED CLOTHING

© 2012 N.V. Savchenko

Samara State Aerospace University named after academician S.P Korolyov  
(National Research University)

Is examined the possibility of application in the conditioned clothing of the processes of boiling and evaporating the water for the interception of the heat flux, which enters from the environment. Design characteristics of thermal processes are given. The obtained results can be used for the development of the conditioned clothing, used under the conditions of the microclimate with the high temperature of air.

Keywords: microclimate, individual conditioning, evaporation, heat shielding, the phase transition “of water- pairs”.

*Nelly Savchenko, Candidate of Technics, Associate Professor.*  
E-mail: snellyv@mail.ru