

МЕХАНИЗМ ТЕПЛОМАССОБМЕННОГО ПРОЦЕССА В ДИНАМИЧЕСКОЙ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ КОНДИЦИОНИРУЕМОЙ ОДЕЖДЫ

© 2009 Н.В. Савченко

Самарский государственный аэрокосмический университет

Поступила в редакцию 13.11.2009

Статья посвящена повышению эффективности тепловых процессов, используемых в кондиционируемой одежде. Рассмотрен механизм тепломассообмена в толще волокнистой теплозащитной оболочки при движении кондиционирующего воздуха навстречу внешнему тепловому потоку. Обоснован вывод о независимости его расхода от разности температуры на внешней и внутренней поверхности оболочки.

Ключевые слова: *кондиционируемая одежда; волокнистая оболочка, тепломассообмен, динамическая теплоизоляция*

Оболочки из волокнистых материалов достаточно широко используются для тепловой защиты объектов различного назначения. Они обладают рядом преимуществ перед иными видами теплоизоляции – это малая масса, практически не увеличивающиеся габариты объекта, не препятствующие изменению его геометрии, легкий доступ, демонтаж и, при всем при этом малая стоимость. В большинстве случаев волокнистые оболочки используются для защиты от охлаждения, реже применяются для защиты от нагревающего микроклимата. При необходимости длительной защиты от нагревающего микроклимата обязательно используется охлаждение. Это обычно продувка пространства под оболочкой охлажденным воздухом. Основным недостатком такой теплозащиты является использование значительного количества охлаждающего воздуха, увеличивающееся пропорционально с ростом температуры окружающей среды. На наш взгляд, при рациональном использовании теплоаккумулирующих способностей воздуха, его расход можно существенно уменьшить. Рассмотрим две схемы организации теплозащиты.

На рисунке 1 «а» приведена проточная схема термостатирования. Охлаждающий воздух протекает в зазоре между термостатируемым объектом 1 и защитной оболочкой 2 снимает тепло поступающее от объекта

(тепловой поток с интенсивностью q_1) и тепло, поступающее через оболочку 2 (тепловой поток с интенсивностью q_2). Количество снимаемого тепла определяется расходом кондиционирующего воздуха и возможностью его подогрева.

$$Q_2 - Q_1 = G_{\Pi} C_p (T_2 - T_1) \quad (1)$$

Как правило, такая схема термостатирования принципиально не экономична из-за существования допустимой степени подогрева воздуха $T_2 - T_1$, определяемой максимальной температурой объекта T_2 и располагаемой температурой охлаждающего воздуха T_1 или минимальной допустимой температуры объекта. Увеличение экономичности схемы термостатирования, на наш взгляд, возможно путем изменения направлений взаимодействия тепловых потоков и направления движения воздуха. В проточной схеме «а» внешний тепловой поток интенсивности q_2 перпендикулярен потоку движения воздуха с расходом G_{Π} . В предлагаемой динамической схеме «б» направление движения воздуха организовано навстречу тепловому потоку. Для этого воздух, после снятия тепла с поверхности термостатируемого объекта (тепловой поток интенсивности q_1), меняет направление на 90° и удаляется наружу через волокнистую термоизолирующую оболочку 3, т.е. движется навстречу внешнему тепловому потоку.

Савченко Нелли Вячеславовна, кандидат технических наук, доцент

Количество снятого тепла

$$Q_2 - Q_1 = G_d C_p (T_2 - T_1) + G_d C_p (T_4 - T_2) \quad (2)$$

Сравним (1) и (2).

$$G_{II} C_p (T_2 - T_1) = G_d C_p (T_2 - T_1) + G_d C_p (T_4 - T_2) \quad (3)$$

В конечном виде

$$\frac{G_{II}}{G_d} = \frac{T_4 - T_1}{T_2 - T_1} = 1 + \frac{T_4 - T_2}{T_2 - T_1} \quad (4)$$

при условии обеспечения

$$q_1 \leq G_d C_p (T_2 - T_1),$$

$$G_d \geq \frac{q_1}{C_p (T_2 - T_1)} \quad (5)$$

т.е. расход воздуха должен быть достаточным для снятия тепла выделяемого термостатируемым объектом и поддержания его температуры в заданных пределах. Из соотношения видно, что возможности снятия тепла с использованием динамической изоляции за счет полного использования теплоаккумулирующей способности воздуха потенциально выше, чем при просто прокачке охлаждающего воздуха через зазор. В уравнениях (1)-(4) мы оценивали только потенциальную возможность снятия тепла охлаждающим воздухом без связи с тепловым потоком извне q_2 .

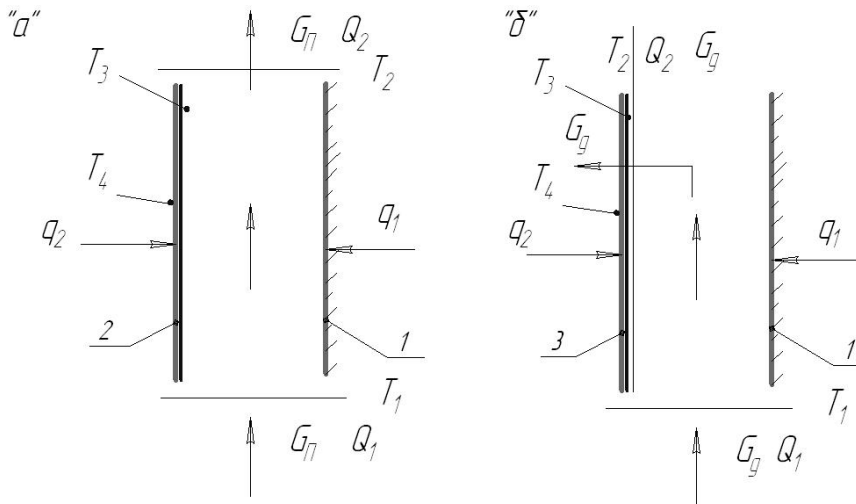


Рис. 1. Расчетная схема термостатирования: «а» - проточная, «б» - динамическая

Рассмотрим тепловой баланс в единицу времени через единицу площади оболочки и определим расход охлаждающего воздуха, при котором происходит полная компенсация теплового потока q_2 . Принимаем, что температура воздуха, поступающего в оболочку T_3 .

$$\frac{\lambda}{\delta} (T_4 - T_3) = G_d C_p (T_4 - T_3) \quad (6)$$

$$G_d = \frac{\lambda}{\delta \cdot C_p} \quad (7)$$

Тепловой баланс (6) построен исходя из условия, что тепло, проходящее через теплоизолирующую оболочку толщиной δ идет на нагрев воздуха, текущего навстречу тепловому потоку. На рис. 2 приведен

расход воздуха в зависимости от толщины теплоизоляции δ и коэффициента теплопроводности λ .

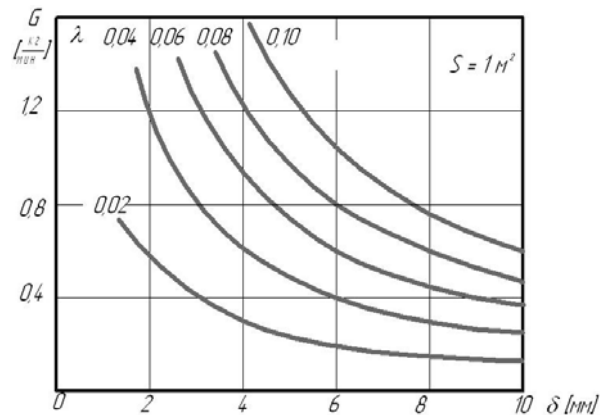


Рис. 2. Зависимость расхода воздуха от толщины теплоизоляции и коэффициента теплопроводности

Полученные значения расхода охлаждающего воздуха (7) являются предельными и, они достижимы только при условии обеспечения некоторых теплообменных процессов. Рассмотрим механизм теплообменных процессов, протекающих в динамической теплоизоляции. Пористый материал состоит из твердых волокон, пространство между которыми заполнено воздухом. Рассмотрим гипотетический перенос тепла через тонкую пространственную конструкцию, осуществляемый теплопроводностью. Теплообмен через волокна и воздух представим как два отдельных независимых процесса. На рис. 3 приведена условная расчетная схема структуры волокнистой теплоизоляции, состоящей из цилиндрических элементов, окруженных воздухом.

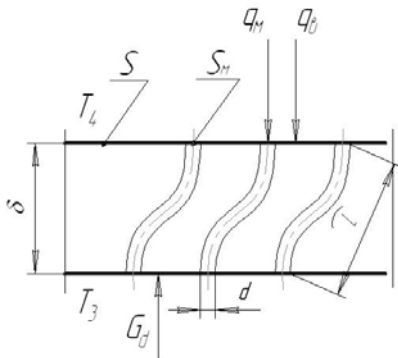


Рис. 3. Условная расчетная схема структуры волокнистой теплоизоляции:

q_m , q_g – тепловые потоки, проходящие через твердые элементы и окружающий воздух соответственно, $q_m + q_g = q_2$; S – площадь поверхности динамической изоляции; S_m – суммарная площадь сечения твердых конструктивных элементов; L – эквивалентная длина волокон теплоизоляции; λ , λ_m , λ_g – коэффициенты теплопроводности динамической изоляции коэффициенты теплопроводности материала твердых элементов, коэффициент теплопроводности воздуха соответственно; ρ , ρ_m – плотность динамической изоляции и плотность материала твердых конструктивных элементов соответственно; T_3 , T_4 – температура внутренней и наружной поверхностей динамической изоляции соответственно.

Тепло, передаваемое через теплоизоляцию, рассмотрим состоящим из тепла, передаваемого через конструкционный материал Q_m и передаваемого через заполняющий ее объем воздуха Q_g .

$$Q = Q_m + Q_g \quad (8)$$

$$\frac{\lambda}{\delta} S \cdot \tau(T_4 - T_3) = \frac{\lambda_m}{l} S_m \cdot \tau(T_4 - T_3) + \frac{\lambda_g}{\delta} (S - S_m) \cdot \tau(T_4 - T_3) \quad (9)$$

Масса теплоизоляции

$$S \cdot \delta \cdot \rho = S_m l \rho_m \quad (10)$$

Решаем совместно уравнения (9) и (10) и определяем отношение эквивалентной длины волокон l к толщине δ .

$$\lambda_m \frac{\rho}{\rho_m} \left(\frac{\delta}{l}\right)^2 - \lambda_g \frac{\rho}{\rho_m} \left(\frac{\delta}{l}\right) - \lambda_g - \lambda = 0 \quad (11)$$

$$\frac{\delta}{l} = \frac{\lambda_g \rho}{2 \rho_m} \pm \sqrt{\left(\frac{\lambda_g \rho}{2 \rho_m}\right)^2 + \lambda - \lambda_g} \quad (12)$$

По статистической оценке для большинства тканевых теплоизолирующих материалов $\lambda/l \leq 0,2$, т.е. средняя эквивалентная длина теплопроводящего элемента значительно превышает конструктивную толщину ткани. Исходя из этого, соотношение площади поверхности теплопроводящего элемента к площади теплопроводящего сечения, например для ткани толщиной 4 мм и диаметром нити 0,1 мм.

$$\frac{\pi \cdot d \cdot l \cdot \delta}{0,2 \cdot \pi \cdot d^2} = \frac{\delta}{0,2\delta} = 200 \quad (13)$$

Этого вполне достаточно для снятия через боковую поверхность тепла, передаваемого по нити ткани. Схема механизма теплопередачи внутри ткани через воздух приведена на рис. 4. Выделим слой воздуха толщиной $d\delta$, движущейся навстречу тепловому потоку. Считаем, что тепловой поток за время dt повышает температуру воздуха на dT . При условии блокирования теплового потока минимальная скорость перемещения воздуха должна обеспечить за $d\tau$ перемещения нагретого слоя на $d\delta$.

$$\frac{\lambda_g}{d\delta} S \cdot dT \cdot d\tau = SV \cdot d \cdot \tau \rho_g C_p dT \quad (14)$$

где V – скорость движения воздуха.

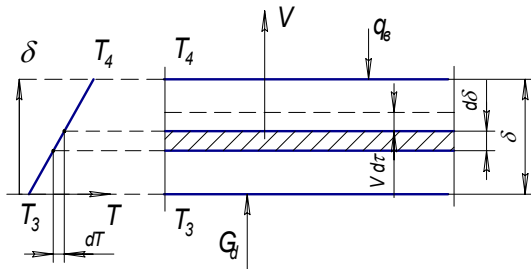


Рис. 4. Схема тепломассообмена через воздух внутри ткани

После интегрирования получаем

$$V_{\min} = \frac{\lambda_{\delta}}{\delta \rho C_p} \quad (15)$$

$$G_{d \min} = \frac{\lambda}{\delta C_p} \quad (16),$$

что по структуре соответствует ранее выведенной формуле (7). При определении минимального расхода воздуха, достаточного для блокирования поступающего извне тепла, правомерно использование справочных значений коэффициента теплопроводности рассчитываемой волокнистой теплоизоляции.

Выводы:

1. Изменение направления движения охлаждающего воздуха приводит к более рациональному использованию его теплоаккумулирующих возможностей и значительно сокращает потребный расход.
2. Минимальное потребное количество охлаждающего воздуха, достаточного для полного блокирования внешнего теплопритока в динамической теплоизоляции, не зависит от перепада температуры на внешней и внутренней поверхностях оболочки.
3. Существует целесообразная предельная величина толщины динамической теплоизоляции, зависящая от теплопроводности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Савченко, Н.В. Динамическая теплоизоляция в кондиционируемой одежде нового поколения. // Безопасность транспортных систем: сб. науч. тр. - Самара, 2002. - С. 115-117.
2. Савченко, Н.В. Локальное обеспечение оптимальных температурных условий. // Экология и здоровье человека: Материалы VI Междун. Конгр. Самара, 1999. - С. 180-181.

MECHANISM OF HEAT-MASS-TRANSFER PROCESS IN THE DYNAMIC HEAT INSULATION OF CONDITIONED CLOTHES

© 2009 N.V. Savchenko

Samara State Aerospace University

Article is devoted to increase of the efficiency in the thermal processes used in conditioned clothes. The mechanism heat-mass-transfer in thickness of fibrous heat-shielding shell at traffic of conditioning air towards to external thermal flow is observed. A conclusion about independence of its rate flow of a difference of temperature on external and internal surface of a shell is proved.

Key words: *conditioned clothes, fibrous shell, heat-mass-transfer, dynamic thermal insulation*