

РАЗРАБОТКА БИОТЕХНИЧЕСКОГО ЭМУЛЯТОРА ТЕПЛООБМЕНА СИСТЕМЫ «ЧЕЛОВЕК — ОКРУЖАЮЩАЯ СРЕДА»

© Д. А. Ставцев, А. В. Уваров, И. Е. Марков

Орловский государственный университет

Для досліджень процесів теплообміну в системі «людина — одяг — навколишнє середовище» (ЛОС) пропонується біотехнічний емулятор, за допомогою якого можна досить точно відтворювати не лише інтегральний теплообмін, але й кожен його складову. Прилад забезпечує квазістаціонарний режим теплообміну при граничних умовах першого роду. Розмістивши на зовнішній поверхні циліндра зразок одягу, можна отримати фізичну модель теплообміну в системі ЛОС. За допомогою емулятора проведено дослідження, які показали, що синтетичні матеріали втрачають до 50 % своїх теплозахисних властивостей при дії вітру.

Сделанные в России шаги по разработке биотехнического эмулятора теплообмена системы «человек — одежда — окружающая среда» позволили создать новые методы исследований и получить теплофизические характеристики ряда утеплителей российского и зарубежного производства, определить пути дальнейших исследований интенсивности теплообмена при естественной вентиляции пододожного пространства. Исследования в данном направлении позволяют разрабатывать новые конкурентоспособные наукоемкие технологии производства и конструкции специальной одежды для нужд авиационно-космической и других отраслей.

Создание одежды, способной выдержать конкуренцию на современном рынке средств индивидуальной защиты, должно основываться на прочных знаниях процессов теплообмена в системе «человек — одежда — окружающая среда».

Количественно процесс теплообмена на поверхности и внутри тела определяется тепловыми потоками и их плотностью. При этом температура атмосферного воздуха, а также его влажность и скорость движения (ветер) зачастую не являются главными факторами формирования теплового состояния человека. Чаще всего решающая роль в этом формировании принадлежит соответствующей одежде [1, 7].

При описании теплообмена человека в одежде традиционно используется параметр R , характеризующий теплоизоляционные свойства одежды в виде особой константы, куда входят лишь две составляющие стационарного процесса теплообмена, а именно: теплопроводность и конвекция. При этом тепловые расчеты параметров одежды сводятся к решению элементарных уравнений без учета большинства важнейших составляющих теплового баланса [5].

Известно, что в классическое понятие суммарно-

го теплового сопротивления входят теплопроводность и конвекция [2]:

$$R = \frac{1}{K} = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}, \quad (1)$$

где R — термическое сопротивление теплопередаче, K — коэффициент теплопередачи, α_1 — коэффициент теплоотдачи от нагретой жидкости или газа к твердой стенке, α_2 — коэффициент теплоотдачи от поверхности нагретой стенки к жидкости или газу, δ — толщина стенки, λ — коэффициент теплопроводности стенки.

Очевидно, что условия теплообмена в системе «человек — одежда — окружающая среда» не соответствуют тем допущениям, при которых справедливы понятия коэффициент теплопередачи и тепловое сопротивление. Во-первых, режим теплообмена в этой системе в очень редких случаях можно считать стационарным, во-вторых, коэффициенты α , характеризующие конвективный теплообмен, являются сложными функциями формы поверхности теплообмена, а также переменных температур и скорости движения обтекающей среды. Уже в этой связи R одежды не может быть константой. И наконец, при использовании понятия «тепловое сопротивление», вообще не рассматривается теплообмен излучением и возможный теплообмен при испарении и конденсации влаги с поверхности тела человека и в материалах пакета одежды.

Новый уровень понимания рассматриваемых процессов приводит к необходимости составления и решения дифференциальных, интегральных и интегро-дифференциальных уравнений.

В качестве примера рассмотрим уравнение теплового баланса цилиндрического элемента тела человека, окруженного тонкой оболочкой из ткани:

$$D_1 + Q_{\text{изл}} + Q_{\text{конв}} + Q_{\text{внут}} = 0, \quad (2)$$

где $D_1 = m_b c_b \left(\frac{dT_b}{dt} \right)$ — изменение внутренней энергии элемента тела человека (аналог дефицита тепла);

$$Q_{изл1} = \varepsilon_e \sigma 2\pi r l \left[\left(\frac{T_b}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_o}{100} \right)^4 \right]$$

— интенсивность теплообмена излучением между поверхностью элемента тела человека и тонкой оболочкой;

$$Q_{конв1} = \frac{\lambda 2\pi r l}{\delta} \varepsilon_k (T_b - T_o)$$

— конвективный теплообмен в прослойке воздуха под одеждой; $Q_{внут}$ — метаболическое тепловыделение.

Уравнение теплового баланса оболочки имеет вид

$$D_2 + Q_{изл1} + Q_{конв1} + Q_{рад} + Q_{конв2} + Q_{изл2} = 0, \quad (3)$$

где

$$D_2 = m_o c_o \left(\frac{dT_o}{dt} \right)$$

— изменение внутренней энергии оболочки;

$$Q_{конв2} = \alpha_{ext} 2\pi(r + \delta)l(T_o - T_e)$$

— конвективный теплообмен оболочки с окружающей средой;

$$Q_{изл2} = \varepsilon_o \sigma 2\pi(r + \delta)l \left[\left(\frac{T_o}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_e}{100} \right)^4 \right]$$

— теплообмен излучением между оболочкой и окружающей средой;

$$Q_{рад} = AJ 2\pi(r + \delta)l$$

— падающий поток солнечного излучения.

Рассмотрим следующую систему уравнений теплового баланса:

$$\begin{aligned} & -m_b c_b \left(\frac{dT_b}{dt} \right) - \varepsilon_e \sigma 2\pi r l \left[\left(\frac{T_b}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_o}{100} \right)^4 \right] - \\ & - \frac{\lambda 2\pi r l}{\delta} \varepsilon_k (T_b - T_o) + Q_{int} = 0, \\ & -m_o c_o \frac{dT_o}{dt} + \varepsilon_e \sigma 2\pi(r + \delta)l \left[\left(\frac{T_b}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_o}{100} \right)^4 \right] + \\ & + \frac{\varepsilon_k \lambda 2\pi(r + \delta)l}{\delta} (T_b - T_o) + \\ & + AJ 2\pi(r + \delta)l - \alpha_{ext} 2\pi(r + \delta)l \cdot (T_o - T_e) - \\ & - \varepsilon_o \sigma 2\pi(r + \delta)l \left[\left(\frac{T_o}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_e}{100} \right)^4 \right] = 0, \end{aligned}$$

где r — радиус элемента тела человека, l — длина элемента тела человека, δ — толщина воздушной прослойки, m_b — масса элемента тела человека, c_b — удельная теплоемкость элемента тела человека, e_e — приведенная степень черноты излучающих поверхностей, e_o — степень черноты наружной

поверхности оболочки, σ — постоянная Стефана—Больцмана, m_o — масса оболочки, C_o — удельная теплоемкость оболочки, A — коэффициент поглощения поверхности оболочки, T_o — температура оболочки, T_e — температура окружающей среды, λ — коэффициент теплопроводности воздуха, ε_k — коэффициент конвекции, α_{ext} — средний коэффициент теплоотдачи, J — интенсивность солнечной радиации, τ — время эксперимента. Индексы b, o, e — относят величины соответственно к человеку, оболочке и окружающей среде.

Задав константы и начальные условия, можно решить данную систему уравнений как задачу Коши. Результат представлен на рис. 1.

Верхняя линия (1) отражает динамику изменения температуры оболочки, окружающей элемент тела человека, нижняя (2) — температуру тела.

На начальном этапе рассматриваемого процесса тепловой поток направлен от тела в окружающую среду. Начиная с 5-6 мин, тепловой поток в рассматриваемой системе изменяет направление, и в таком случае R становится величиной отрицательной, т. е. при положительной разности температур тела человека и окружающей среды теряет физический смысл.

К сожалению, адекватных математических описаний интегрального теплообмена человека в одежде в виде функциональных уравнений, позволяющих проводить полноценные численные эксперименты, пока еще нет. Во многом это объясняется трудностями разделения составляющих комбинированного теплообмена, включающего все одновременно действующие в рассматриваемой системе виды передачи теплоты.

Для преодоления этих трудностей предлагается использовать основы теории подобию с целью моделирования теплообмена биотехнической системы на соответствующих технических устройствах. Одно из таких устройств описано в работе [7].

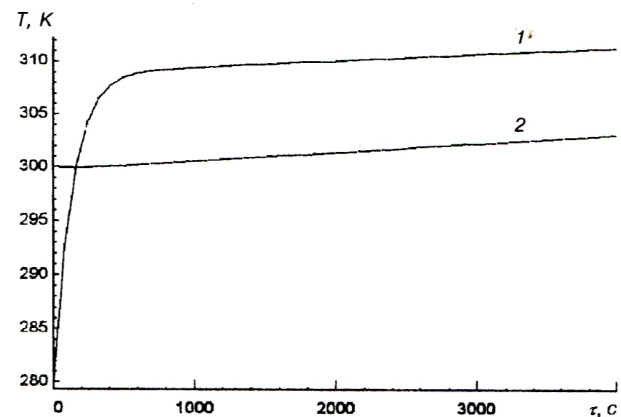


Рис. 1. Результаты численного решения системы уравнений

Для определения интенсивности комбинированного теплообмена на рабочей поверхности устройства используется так называемый квазистационарный режим испытаний. Сущность этого режима определяется тепловой инерцией рабочего тела, нагреваемого внутренним источником тепла и охлаждаемого окружающей средой.

Обладая теплоемкостью, тело, нагреваясь от внутреннего источника энергии в заданных пределах температуры, накапливает строго определенное количество тепла. При отключении внутреннего источника энергии тело, остывая до заданной температуры, отдает это тепло в окружающую среду. Если использовать в качестве внутреннего источника тепла электрический нагреватель с позиционным регулятором температуры, то, измеряя длительность импульса подачи электрического питания нагревателю от момента его включения до момента выключения, можно определить количество энергии, передаваемой от нагревателя рабочему телу за один рабочий цикл.

Далее тело, остывая до заданной температуры, отдает накопленное тепло в окружающую среду. Этот процесс, вследствие тепловой инерции тела, также будет протекать в течение определенного времени до момента повторного включения регулятора внутреннего нагревателя. Время, проходящее между повторными включениями внутреннего нагревателя, будем называть временем рабочего цикла. При «избыточной» мощности внутреннего нагревателя, т. е. такой мощности, которая наверняка превышает теплоотдачу тела в окружающую среду, рабочие циклы можно повторять любое заданное число раз. При этом процесс отдачи тепла с рабочей поверхности тела в окружающую среду будет происходить непрерывно как в цикле нагрева, так и в цикле охлаждения в соответствии с физическими законами теплообмена. Так как теплоемкость рабочего тела может быть достаточно высокой, например при использовании воды, то на наружной рабочей поверхности колебания температуры будут незначительными. Это позволяет считать процесс теплообмена рабочей поверхности с окружающей средой близким к стационарному, т. е. вполне адекватно соответствующим теплообмену в системе «человек — окружающая среда».

Если включить в электрическую цепь переменного или постоянного тока нагревателя амперметр и вольтметр, то при стабилизированном напряжении питания и токе в цепи, мощность Q_n , подаваемая электронагревателем, будет равна произведению напряжения питания U и соответствующего в цепи тока I

$$Q_n = UI. \quad (4)$$

Зная время τ_1 работы нагревателя, можно рассчитать количество энергии, передаваемой телу за

каждый рабочий цикл нагревателя (время от его включения до выключения). Предполагая, что эта энергия равномерно отдается телом окружающей среде, можно рассчитать мощность, а зная площадь поверхности теплообмена, можно рассчитать и плотность теплового потока, рассеиваемого с рабочей поверхности за каждый рабочий цикл тела. При этом расчетное время теплоотдачи тела τ_2 определяется длительностью промежутка между повторными включениями нагревателя, так как именно за этот промежуток времени энергия, полученная от нагревателя за его рабочий цикл, рассеивается в окружающую среду.

В практику можно ввести следующие формулы для подсчета мощности и плотности теплового потока:

$$W = UI\tau_1/\tau_2, \quad (5)$$

$$q = W/S, \quad (6)$$

где W — мощность теплоотдачи с рабочей поверхности цилиндра, q — плотность теплового потока, S — площадь рабочей (теплоотдающей) поверхности, U — напряжение питания, I — ток в цепи нагревателя, τ_1 и τ_2 — соответственно время нагрева и рабочего цикла прибора.

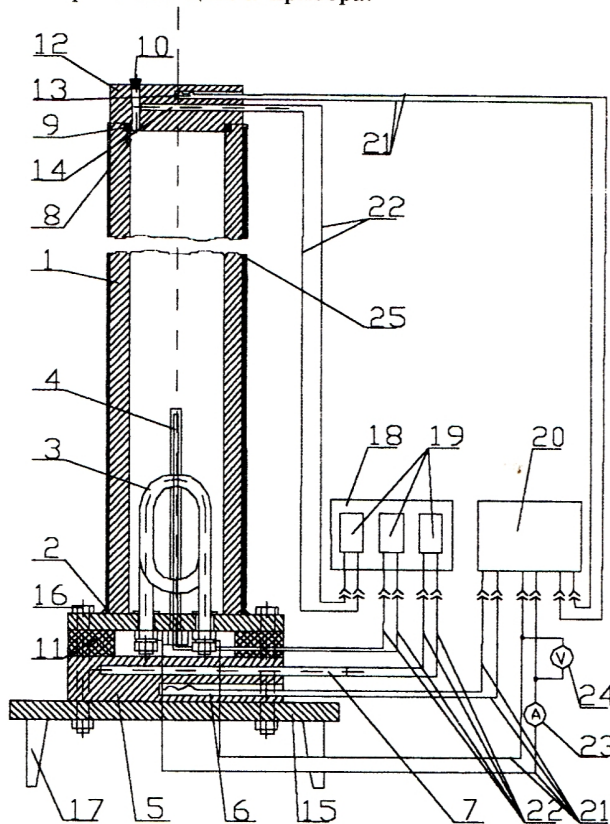


Рис. 2. Биотехнический эмулятор теплообмена

Далее, измеряя разность температур окружающей среды t_1 и рабочей поверхности t_2 , получаем тепловое сопротивление по ГОСТ 20489:

$$R = (t_2 - t_1)/q. \quad (7)$$

Экспериментальная установка (рис. 2) представляет собой алюминиевую цилиндрическую емкость 1 длиной 1 м, наружным диаметром 0.12 м, внутри которой смонтированы электронагреватели 3 и чувствительный элемент термометра 4 . Под фланцем 2 расположен нижний тепловой компенсатор, состоящий из алюминиевого корпуса 5 , электронагревателя 6 и чувствительного элемента термометра 7 . Верхний торец емкости герметизируется алюминиевой крышкой 8 с прокладкой 9 . Крышка оснащена предохранительным клапаном 10 и закрепляется на торце емкости с помощью винтов 11 . На крышке предусмотрен верхний тепловой компенсатор, включающий корпус 12 , электронагреватель 13 и чувствительный элемент термометра 14 . Фланец емкости закреплен на текстолитовой платформе 15 с помощью болтов 16 . Платформа устанавливается на ножки 17 .

Электрическая часть установки включает в себя автономный блок управления 18 , состоящий из источников питания 20 , трех регуляторов температуры 19 , силовых 21 и управляющих 22 цепей. В цепь питания нагревателей включены измерительные приборы 23 , 24 для контроля потребляемой мощности.

С помощью эмулятора были проведены экспериментальные исследования, результаты которых приведены в таблице.

Табл. 1. Зависимость суммарного теплового сопротивления R материалов-утеплителей для швейной промышленности от скорости ветра V

Наименование материала	$R, \text{ м}^2\text{К/Вт}$	
	$V = 0$	$V = 7.4 \text{ м/с}$
Экспериментальный утеплитель ВНИИНМ, поверхностная плотность 125 г/м^2	0.305	0.082
Олений мех, 2 слоя, толщина 37 мм	0.801	0.537
Аэрозип «TOREY» (Япония) толщина 10 мм	0.407	0.195
То же с тканью верха, арт. 5119-87	0.410	0.294
Синтетический утеплитель «FINNPILE» (Финляндия) толщина 9 мм	0.306	0.129
То же с тканью верха, арт. 5119-87	0.306	0.255
Синтетический утеплитель «FINNFILL» (Финляндия) толщина 10 мм	0.317	0.131
То же с тканью верха, арт. 5119-87	0.317	0.275
Экспериментальный утеплитель ВНИИНМ, поверхностная плотность 125 г/м^2	0.305	0.082
То же с тканью верха арт. 5119-87	0.305	0.261

Исследования показали, что отечественные и зарубежные синтетические материалы теряют до 50% своих теплозащитных свойств при воздействии ветра. Использование покрывных тканей при этом обеспечивает существенное улучшение теплозащитных характеристик пакета [7].

Дальнейшие работы по совершенствованию предложенного метода будут направлены на разделение составляющих комбинированного теплообмена в системе «Человек — одежда — окружающая среда». Это позволит получать динамические характеристики утеплителей при увлажнении или сушке, определять интенсивность теплообмена при вентиляции и т. д., что в свою очередь обеспечит разработку принципиально новых наукоемких и конкурентоспособных конструкций специальной и бытовой одежды для авиационно-космических, арктических, антарктических и других нужд.

1. ГОСТ Р12.4.185—99 ССБТ. Средства индивидуальной защиты от пониженных температур. Методы определения теплоизоляции комплекта.
2. Губанов С. В., Марков И. Е., Уваров А. В. Разработка модели и методик энергомассообмена в биотехнической системе «Человек — СИЗ — окружающая среда» // Человек и космос: Сб. тез. — Днепропетровск: НЦАОМУ, 2000.—С. 290.
3. Сериков И. О., Фиолина М. А., Марков И. Е. Разработка метода исследования теплообмена в системе «Человек — одежда — окружающая среда» // Человек и космос: Сб. тез. — Днепропетровск: НЦАОМУ, 2002.—С. 433.
4. Ставцев Д. А., Уваров А. В., Марков И. Е. Разработка метода определения коэффициента теплопроводности изоляционных материалов // Человек и космос: Сб. тез. — Днепропетровск: НЦАОМУ, 2002.—С. 438.
5. Стандарт ISO 11092. Текстиль — Физиологические воздействия — Определение теплового сопротивления и сопротивления проводимости водяного пара в установившемся режиме (Испытания с использованием физической модели человеческой кожи) 15.10.1993.
6. Тихонов Е. Л., Марков И. Е., Уваров А. В. Создание управляемой биотехнической системы «Человек — СИЗ — окружающая среда» // Человек и космос: Сб. тез. — Днепропетровск: НЦАОМУ, 2000.—С. 291.
7. Уваров А. В. Улучшение условий и охраны труда работников АПК путем разработки и внедрения спецодежды для защиты от переохлаждения и перегрева: Дис. ... канд. техн. наук. — Изд-во С-П. ГАУ, 2000.—212 с.—Машинопись.

DEVELOPMENT OF THE BIOTECHNICAL EMULATOR OF HEAT EXCHANGE SYSTEMS «THE PERSON — THE ENVIRONMENT»

D. A. Stavtsev, A. V. Uvarov, I. E. Markov

The made steps in Russia on development of the biotechnical emulator of heat exchange of system «the person — clothes — an environment» have allowed to create new methods of researches and to receive is warm — physical characteristics of some heaters of the Russian and foreign manufacture, to define ways of the further researches of intensity of heat exchange at natural ventilation of space under clothes. Researches in the given direction allow developing new competitive high technologies of manufacture and a design of special clothes for needs: aerospace, Arctic, Antarctic, etc.