



Рисунок 2 — Мужской ботинок с разбивкой на зоны

Исследование удельных теплотерь пакетов верха показали, что за первый час пребывания на холоде наибольшие теплотери с единицы поверхности несет носочная часть обуви и ее задинка. Затем по мере быстрого остывания носка разность температур поверхности носка и окружающей среды уменьшается, а, следовательно, снижаются и теплотери. Напротив, теплотери задинки остаются в дальнейшем больше, чем носка, за счет большей площади внешней поверхности задинки и больше, чем у союзки и голенища, за счет более высокого коэффициента теплоотдачи.

УДК 685.34.017.87+685.34.017.84

О ВЛИЯНИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВНУТРИ ПАКЕТА ОТ ВРЕМЕНИ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА НЕГО НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР НА КОМФОРТНОСТЬ СТОПЫ НОСИКА

*Т.М. Осина, доцент, А.Б. Михайлов, к.ф.-м.н., доцент,
Р.Ф. Афанасьева, д.м.н., профессор, Е.В. Компанченко, инженер
ФГБОУ ВПО «Южно-Российский государственный университет экономики и сервиса»,
г. Шахты, Российская Федерация*

Разработан программный продукт для решения задач нестационарных процессов теплообмена для системы «стопа — обувь — окружающая среда» при условии зависимости коэффициентов теплопроводности от температуры, который позволяет осуществлять расчет распределения температуры внутри пакета материалов и расчета зависимости удельных и абсолютных теплотерь с поверхности различных конструктивных узлов обуви при определении времени комфортного пребывания человека в различных климатических зонах.

Для реализации программного продукта авторы рассматривали нестационарный процесс теплообмена в системе «стопа — обувь — окружающая среда» для пакетов материалов, представляющих плоскую пластину, цилиндрические и сферические сегменты с краевыми условиями второго, третьего и четвертого рода. Для ее разработки с помощью программы 3D Studio MAX 5 был построен геометрический образ модели обуви на примере мужского зимнего ботинка.

Рассмотрен нестационарный процесс теплопередачи через пакеты материалов с учетом зависимости коэффициентов теплопроводности от температуры материалов пакета.

Исследовался пакет материалов, составляющих низ обуви, имеющий при 20 °С тепловое сопротивление 0,57 (м² °С/Вт). Проведены расчеты зависимости теплового сопротивления пакета материалов от воздействия на стопу низких температур в диапазоне от -30 °С до 0 °С при различных тепловых потоках стопы. На установке, созданной в МГУДТ, подтвердили, что при воздействии на стопу низких температур тепловое сопротивление материалов изменяется, что необходимо было учитывать при разработке математической модели. Основной целью математической модели, разработанной в данной работе, является описание распределения температуры внутри обувных пакетов различной формы. На основе этого можно получить зависимость температуры внутриобувного пространства от времени эксплуатации обуви в условиях низких температур, чтобы иметь возможность выработать рациональные принципы зонального утепления обуви с учетом локального теплообмена различных участков стопы человека в обуви с внешней средой. Изготовленные базовые модели мужские зимние ботинки — испытывались в микроклиматической камере ГУ НИИ Медицина труда РАМН в соответствии с ГОСТ Р 12.4.185–99 «Система стандартов безопасности труда. Средства индивидуальной защиты от пониженных температур». Теплоизоляция (тепловое сопротивление) пакета материалов обуви определялась по методу А1, то есть с участием человека-испытателя, а не на тепловом манекене.

Для численной реализации построенных математических моделей теплообмена была написана программа в математической оболочке Maple 9.5. Программа позволяет получить распределения температуры внутри обувного пакета и, в частности, зависимость температуры внутриобувного пространства от времени. В качестве примера теоретического расчета изменения температуры внутриобувного пространства как функции времени при воздействии на обувь низких температур также рассматривались мужские зимние ботинки, как наиболее часто используемый вид обуви для работы в климатических зонах с пониженной температурой. Материалы, из которых составлены пакеты, и их теплофизические характеристики приведены ниже.

Очевидно, что температура слоев пакетов различна: температура материалов тем выше, чем ближе к стопе в пакете они расположены. Формулы (1 — 3) позволяют вычислить температуру внутри любого слоя пакета обуви в любой момент времени.

Для пакета материалов в виде плоской пластины расчёт распределения температуры осуществляется по формуле 1

$$\begin{aligned} \theta_i(x_i, t) &= T_i(x_i, t) + T_c = \\ &= T_c + A_i x_i + B_i + \sum_{k=1}^{\infty} \bar{A}_{i,k} M_{i,k} \exp(-\mu_k^2 t) \sin\left(\frac{\mu_k x_i}{\sqrt{a_i}} + \varphi_{i,k}\right) \end{aligned} \quad (1)$$

Для пакетов цилиндрической ($\nu = 1$) и сферической ($\nu = 2$) формы расчёт распределения температуры осуществляется по формулам 2 и 3:

$$T_i(r, t) = A_i \ln r + B_i + \sum_{k=1}^{\infty} \left(A_{i,k} J_{\nu} \left(\frac{\mu_k r}{\sqrt{a_i}} \right) + B_{i,k} Y_{\nu} \left(\frac{\mu_k r}{\sqrt{a_i}} \right) \right) \exp(-\mu_k^2 t) \quad (2)$$

$$T_i(r, t) = A_i + \frac{B_i}{r} + \frac{1}{r} \sum_{k=1}^{\infty} M_{i,k} \exp(-\mu_k^2 t) \sin\left(\frac{\mu_k r}{\sqrt{a_i}} + \varphi_{i,k}\right) \quad (3)$$

Температура окружающей среды предполагается равной -15 и -5 °С, начальная температура внутриобувного пространства равна +22 °С. Плотность теплового потока стопы берется равной 64 Вт/м, что соответствует энергозатратам человека при легкой физической

нагрузке. Коэффициент теплоотдачи предполагается равным $7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ } ^\circ\text{C})$, (согласно данным Р.Ф. Афанасьевой при скорости ветра $0 - 0,5 \text{ м}/\text{с}$).

В качестве примера расчета распределения температуры нами был выбран пакет материалов, составляющий низ зимнего мужского ботинка, 1 — носок хлопчатобумажный (внутренняя обувь); 2 — вкладная стелька из искусственного или натурального меха; 3 — картон; 4 — основная стелька и подложка (чепрак); 5 — пористая резина.

Толщина, коэффициенты теплопроводности и температуропроводности выбранных материалов приведены в таблице 1.

Таблица 1 — Толщина материалов, их коэффициенты теплопроводности и температуропроводности

№ слоя	Толщина, мм	Коэффициент теплопроводности, $\text{Вт}/(\text{м} \text{ } ^\circ\text{C})$	Коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{ч}$
1	2	0,05	0,0002
2	3	0,04	0,0003
3	2,5	0,083	0,00014
4	8	0,125	0,00042
5	20	0,09	0,00065

На рисунке 1 приведены графики распределения температуры внутри пакета материалов от времени при температуре воздуха, равной $-10 \text{ } ^\circ\text{C}$, и плотности теплового потока с поверхности ходовой части стопы, равной $64 \text{ Вт}/\text{м}^2$

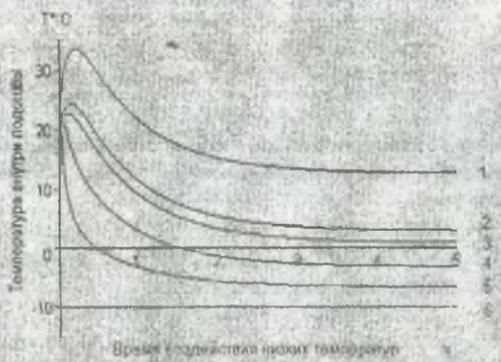


Рисунок 1 — Распределение температуры внутри материалов низа от времени воздействия низких температур ($-10 \text{ } ^\circ\text{C}$)

1 — температура между первым и вторым слоями; 2 — температура между вторым и третьим слоями; 3 — температура между третьим и четвертым слоями; 4 — температура между четвертым и пятым слоями; 5 — температура срединного горизонтального сечения пятого слоя; 6 — температура воздуха.

Из рисунка видно, что температура пористой резины в среднем составляет $-5 \text{ } ^\circ\text{C}$, поэтому можно рассчитать поправку коэффициента теплопроводности, пересчитав его по формуле (4):

$$\lambda_m = \lambda_0 (1 + b \cdot T) = 0,09 (1 + 0,06 \cdot 25) = 0,1035 \text{ Вт}/(\text{м} \text{ } ^\circ\text{C}). \quad (4)$$

Аналогичным образом можно корректировать основные показатели теплофизических характеристик остальных материалов, образующих обувные пакеты, чтобы иметь более

достоверные результаты температуры внутриобувного пространства для формирования комфортности стопы носчика при нахождении его в различных климатических зонах.

УДК 685.34.017.87+004.9

О ВОЗМОЖНОСТЯХ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПО ФОРМИРОВАНИЮ КОМФОРТНЫХ УСЛОВИЙ СТОПЕ НОСЧИКА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НА НЕЕ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР

*Т.М. Осина, доцент, И.Д. Михайлова, к.т.н., доцент, А.Н. Лунина, магистр
ФГБОУ ВПО «Южно-Российский государственный университет экономики и сервиса»,
г. Шахты, Российская Федерация*

Основными факторами, влияющими на температуру внутриобувного пространства при построении математической модели, являются температура окружающей среды, теплообразование стопы, теплофизические свойства материалов, составляющих обувные пакеты, форма этих пакетов и теплоотдача с внешней поверхности обуви в окружающую среду. В основу концепции математической модели положено представление обуви как совокупность многослойных пакетов материалов различной формы и состава. Для ее разработки с помощью программы 3D Studio MAX 5 был построен геометрический образ модели (на примере мужского ботинка).

Математическая модель нестационарного процесса теплообмена представляет собой решение трех краевых задач для системы дифференциальных уравнений теплопроводности соответственно для плоской пластины, цилиндрического и сферического сегментов. Решение красовой задачи находится методом Фурье в виде сходящегося функционального ряда. Используя теплофизические характеристики материалов, составляющих обувной пакет, температурные условия окружающей среды и тепловой поток стопы, по полученным формулам можно рассчитать температуру в любой части обуви для соответствующего момента времени.

В частности, можно получить температуру внутриобувного пространства как функцию времени, которая является критерием температурной комфортности стопы при эксплуатации обуви в условиях низких температур.

Для численной реализации построенных математических моделей теплообмена были написаны программы в математической оболочке Maple 9.5. В качестве примера теоретического расчета изменения температуры внутриобувного пространства как функции времени при воздействии на обувь низких температур рассматривались мужские ботинки. Материалы, из которых составлены пакеты, и их теплофизические характеристики приведены в таблице. Температура окружающей среды предполагается равной $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$, начальная температура внутриобувного пространства равна $+22\text{ }^{\circ}\text{C}$. Плотность теплового потока стопы берется равной 64 Вт/м^2 , что соответствует энергозатратам человека при легкой физической нагрузке. Коэффициент теплоотдачи предполагается равным $7\text{ Вт/(м}^2\text{ }^{\circ}\text{C)}$. Результаты вычислений представлены на рисунке 1. Из рисунка 1 видно, что наибольшая потеря тепла происходит в носочной части стопы. В связи с этим при проектировании зимней обуви, чтобы продлить время комфортного пребывания, необходимо подбирать соответствующие материалы, формирующие пакет в носочной части. Обувь, изготовленная с использованием выбранных пакетов, характеристика которых и теплофизические характеристики материалов, сформировавшие эти пакеты, приведенные в таблице 1, обеспечивают длительное комфортное пребывание стопы только при температуре окружающей среды $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ и оказались непригодными для длительной носки при температуре $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ и ниже.