

УДК 687; [677.057.617]

**ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА
ЭЛЕМЕНТА ТЕЛА ЧЕЛОВЕКА С ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДОЙ**

**SIMULATION OF THE HEAT TRANSFER ELEMENT
OF THE HUMAN BODY WITH THE ENVIRONMENT**

А.В. АБРАМОВ, Ю.С. ШУСТОВ, М.В. РОДИЧЕВА
A.V. ABRAMOV, YU.S. SHUSTOV, M.V. RODICHEVA

(Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс,
Московский государственный университет дизайна и технологии)
(State University – Education-Science-Production Complex,
Moscow State University of Design and Technology)
E-mail: rodicheva.unpk@gmail.com; ant-lin88@mail.ru; sys@staff.msta.ac.ru

Составлена и решена математическая модель для выбора режимов экспериментальных исследований теплообмена элемента тела человека с окружающей средой.

Compiled and solved a mathematical model for selecting modes of experimental studies element body in the system human – clothing– environment.

Ключевые слова: имитационная модель, теплообмен, биотехнический эмулятор.

Keywords: simulation model, heat exchange, biotechnical emulator.

Прогнозирование теплозащитных характеристик пакета одежды проводится на основе точных количественных значений теплового сопротивления отдельных слоев, а также динамики этой величины при изменении внешних условий. Такие данные доступны не для всех материалов, а оценка теплозащитных свойств производителями одежды затруднена в связи с отсутствием измерительных приборов, предусмотренных в системе отечественной сертификации. Поэтому задача разработки доступного метода для оценки уровня теп-

лозащитных свойств материалов и пакетов одежды является актуальной.

Подобный метод исследования может быть основан на принципах физического или имитационного моделирования – современные математические пакеты позволяют исследовать характер протекания процессов в различных геометрических моделях.

Ранее нами разработаны методы и приборы, которые позволяют исследовать свойства материалов и пакетов одежды [1]. В их числе биотехнической эмулятор про-

цессов теплообмена в системе "человек – одежда – среда", представляющий собой тепловую модель элемента тела человека (рис. 1 – модель элемента тела человека: а) – модель физической установки в разрезе; б) – расчетная модель; в) – сетка конечных элементов). Нами разработана имитационная модель процессов теплообмена в рабочем теле и на поверхности биотехнического эмулятора на примере двухмерного сегмента (рис. 1-б).

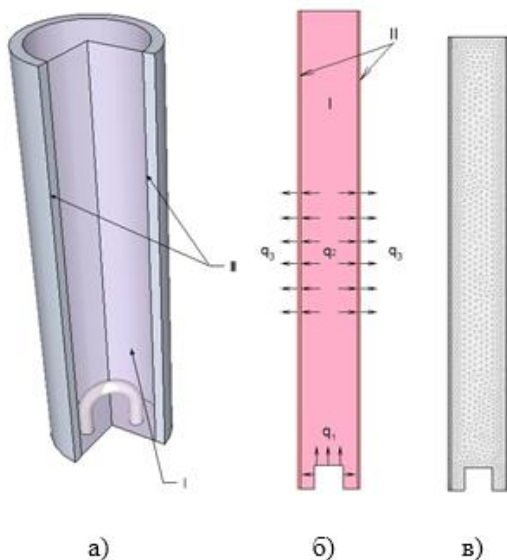


Рис. 1

При построении модели учтены физические принципы работы биотехнического эмулятора процессов теплообмена. Рабочее тело прибора представляет собой полый алюминиевый цилиндр с внутренним источником тепла, заполненный дистиллированной водой (рис. 1-а). Для наложения граничных условий на модель (рис. 1-б) предполагалось, что тепловая энергия подается в рабочий объем (область I) с плотностью потока q_1 , Вт/м², равномерно распределяется по нему за счет конвективных течений. К внутренней поверхности цилиндрической стенки тепловая энергия с плотностью потока q_2 , Вт/м², передается к внутренней поверхности (области II). От внутренней к внешней поверхности стенки теплота передается теплопроводностью, после чего рассеивается в окружающую среду за счет естественной конвекции и теплового излучения $q_3=q_k+q_{и}$, Вт/м². В

качестве начальных условий модели использованы известные величины температур рабочего объема и окружающей среды, плотности теплового потока на поверхности ТЭНа, q_1 , Вт/м² (рис. 1-б).

Для протекающих процессов применены уравнения: пограничного слоя для воды (1) и воздуха (1') и (3); приближение Буссинеска (2) коэффициента конвективной теплоотдачи в критериальном виде (4); теплопроводности в цилиндрических координатах (5); Стефана-Больцмана (6).

$$\begin{cases} \rho_1 \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho(\mathbf{u}_1 \cdot \nabla \mathbf{u}_1) = -\nabla p_1 + \nabla \cdot \eta(\nabla \mathbf{u}_1 + (\nabla \mathbf{u}_1)^T) + \rho_1 \mathbf{g} \\ \frac{\partial \rho_1}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_1 \mathbf{u}_1) = 0 \\ \rho_1 C_1 \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{u}_1 \cdot \nabla T \right) = \nabla \cdot \mathbf{k} \nabla T \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \nabla \cdot \eta(\nabla \mathbf{u}_2 + (\nabla \mathbf{u}_2)^T) + \rho_\infty (\mathbf{u}_2 \cdot \nabla \mathbf{u}_2) + \nabla p_2 = \mathbf{F}, \\ \nabla \cdot (\rho_\infty \mathbf{u}_2) = 0, \\ \nabla \cdot (-\mathbf{k} \nabla T + \rho_\infty C_2 T \mathbf{u}_2) = 0 \end{cases} \quad (1')$$

$$\mathbf{F} = (\rho_\infty - \rho_0) \mathbf{g}, \quad (2)$$

$$\rho = \rho_0 \left(1 - \frac{T_0 - T_\infty}{T_\infty} \right), \quad (3)$$

$$Nu_m = c Ra_m^n, \quad (4)$$

$$\nabla(-\mathbf{k} \nabla T_{Al} + \rho_{Al} C_p T \mathbf{u}) = 0, \quad (5)$$

$$\mathbf{q} = \varepsilon \sigma (T_\infty^4 - T_p^4), \quad (6)$$

где ρ_1 , ρ_∞ , ρ_0 , ρ_{Al} – плотности: воды и воздуха в свободном объеме, воздуха в пограничном слое, алюминия кг/м³; \mathbf{u}_1 , \mathbf{u}_2 – вектор скорости потоков воды и воздуха, м/с; p_1 , p_2 – давление: воды, атмосферное, Па; η – динамическая вязкость воздуха; $\mathbf{g}=9,81$ – вектор гравитации, м/с²; \mathbf{k} – коэффициент теплопроводности воды, Вт/(м·К); C_1 , C_2 – теплоемкость воды и воздуха, Дж/(кг·К); Nu_m – критерий Нуссельта; Ra_m – критерий Релея; C_p , \mathbf{k} , σ – теплоемкость, теплопроводность и степень черноты алюминия, Дж/(кг·К), Вт/(м·К); \mathbf{u} – вектор

скорости, м/с; ε – постоянная Стефана-Больцмана $5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴); T_p , T_{Al} , T , T_0 , T_∞ – температуры: на поверхности тела, точке в цилиндрической стенке, в точке вязкой среды, воздуха на поверхности установки, в окружающей среде, К.

Эмулятор может работать в двух режимах:

- квазистационарном: моделирование процессов теплообмена в лаборатории, когда параметры окружающей среды остаются практически неизменными на протяжении всего эксперимента;

- нестационарном: размещение установки на открытом воздухе, когда параметры окружающей среды могут значительно изменяться за короткие промежутки времени.

На рис. 2 представлены результаты вычислительного эксперимента (а, б – стационарные решения для разности температур между рабочей поверхностью и окружающей средой Δt 20 и 30°C; в, г – нестационарные решения модели для различных промежутков времени).

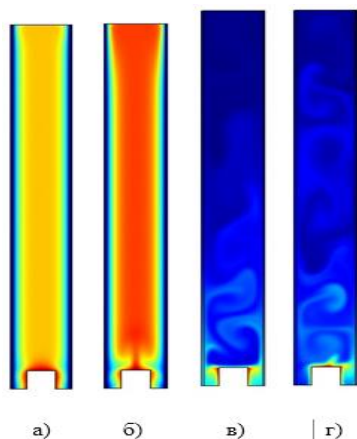


Рис. 2

При проверке адекватности модели проведены сравнительные экспериментальные и теоретические исследования. В процессе эксперимента измерялись величины температур в рабочем объеме установки и окружающей среде, плотность потока тепловой энергии на ТЭНе эмулятора. По этим результатам исследовалось распределение температурного поля в рабочем объеме. Исходя из условий эксперимента задавались начальные условия чис-

ленной модели и проводился поиск ее решения.

На рис. 3 представлены сравнительные результаты численных и экспериментальных исследований для одного из исследованных режимов при котором: в начале эксперимента температура рабочего объема и окружающей среды составляла 27,1°C. В процессе эксперимента в рабочий объем подводилась тепловая энергия с плотностью потока на ТЭНе 500 Вт/м².

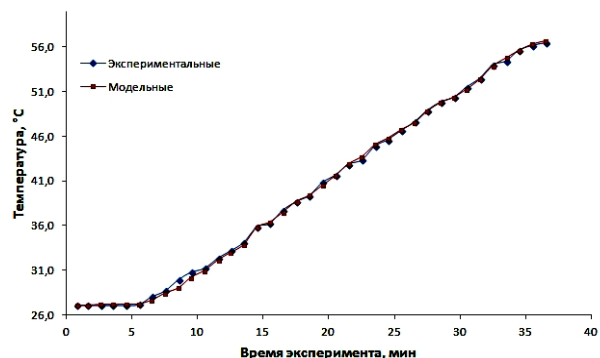


Рис. 3

Численное решение модели получено при тех же начальных условиях. Сравнительные результаты приведены на рис. 3. Как видно, расхождения между результатами не превышает 1,5%, что позволяет судить об адекватности составленной модели.

Ее дальнейшее развитие связано с введением в расчетную схему цилиндрических элементов, которые соответствуют отдельным слоям пакетов одежды. Для решения уравнений (1'), (5), (6) необходимо иметь значения соответствующих коэффициентов. Поэтому предполагается построение базы данных теплофизических коэффициентов по результатам экспериментальных исследований с использованием авторских методов.

В Ы В О Д Ы

Составлена имитационная модель теплообмена элемента тела человека с окружающей средой. Расхождение расчетных результатов распределения температурного поля в рабочем объеме установки с экс-

периментальными данными для рассмотренных случаев не превышает 1,5%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Патент Российской Федерации на изобретение № 2216725 от 26.10.2001 Устройство для определения интенсивности теплообмена в системе "человек-одежда-окружающая среда" / Иоэль Б.М., Уваров А.В., Уваров Г.А. – Оpubл. 20.11.2003.

2. *Bejan A., Kraus A.D.* Heat Transfer Handbook // Hoboken: WILEY – 2003.

REFERENCES

1. Patent Rossijskoj Federacii na izobretenie № 2216725 ot 26.10.2001 Ustrojstvo dlja opreelenija intensivnosti teploobmena v sisteme "chelovek-odezhda-okruzhajushhaja sreda" / Iojel' B.M., Uvarov A.V., Uvarov G.A. – Opubl. 20.11.2003.

2. *Bejan, A., Kraus A.D.* Heat Transfer Handbook // Hoboken: WILEY – 2003.

Рекомендована кафедрой технологии и конструирования швейных изделий Госуниверситета УНПК. Поступила 09.07.15.
