

УДК 687.17

**КОМПЛЕКСНЫЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ
РЯДА ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПАКЕТОВ
ТЕПЛОЗАЩИТНОЙ ОДЕЖДЫ**

**COMPLEX METHOD OF THE RESEARCH
OF A NUMBER HEATPHYSICAL PROPERTIES
OF HEAT-SHIELDING CLOTHES PACKAGES**

А.В. АБРАМОВ, М.В. РОДИЧЕВА, О.Д. ПАНОВ
A.V. ABRAMOV, M.V. RODICHEVA, O.D. PANOV

(Приокский государственный университет,
ООО "Славянка")
(Prioksky State University,
JSC "Slavyanka")

E-mail: Ant-lin88@mail.ru, rodicheva.unpk@gmail.com, slavyanka1991@mail.ru

Авторами предложена математическая модель процессов теплообмена в пакете высокотехнологичных материалов, экспериментально исследована динамика коэффициентов теплопроводности и теплоотдачи некоторых видов высокотехнологичных материалов. Проведена экспериментальная проверка математической модели.

Authors offered mathematical model of processes of heatmass exchange in a package of hi-tech fabrics, dynamics of coefficients of heat conductivity and an external thermolysis of some samples of hi-tech fabrics is experimentally investigated. An experimental inspection of the numerical decisions received on the example of a four-layer package is carried out.

Ключевые слова: высокотехнологичные ткани, теплофизические свойства, теплофизические коэффициенты, математические модели процессов теплообмена.

Keywords: hi-tech fabrics, heatphysical properties, heatphysical coefficients, mathematical models of processes of a heatmass transfer.

В настоящее время на рынке текстильной продукции появились новые высокотехнологичные материалы с инновационной структурой и оригинальными свойствами. В их числе: трикотажные полотна, способные аккумулировать и выделять тепло, полотна, обеспечивающие направленный транспорт влаги, мембранные ткани с односторонней проницаемостью и т.д. Пакеты теплозащитной одежды на их основе обеспечивают эффективную защиту человека от переохлаждения в широком диапазоне пониженных температур при изменении уровня факторов окружающей среды и физических нагрузок. Долгое время высокая стоимость и недостаточная эксплуатационная надежность препятствовали массовому использованию таких материалов при проектировании теплозащитной одежды.

Сегодня появляются более дешевые и надежные образцы высокотехнологичных материалов, в том числе отечественного производства. Это позволит реализовать принцип импортозамещения в сфере текстильной промышленности и производства одежды.

Тем не менее такие материалы недостаточно широко внедрены в производство теплозащитной одежды, что связано с проблемой учета оригинальных эффектов при оценке теплофизических свойств пакетов высокотехнологичных материалов. Например, в пакете для пониженных температур, нижний слой трикотажа, прилегающий к телу, аккумулирует тепло, для чего в нити интегрированы микрокапсулы. При повышенной физической активности человека они расплавляются, поглощая избыточное тепло, при снижении энергозатрат – затвердевают, выделяя накопленное тепло. Второй слой выполняет функцию влагоотведения, изготавливается из трикотажного полотна, обладающего высокой пористостью. В покое воздух в порах повышает теплоизоляцию пакета, а при движении циркулирует, охлаждая тело человека. Верхний слой выполняется из мембранной ткани и способствует выводу влаги в окружающую среду, препятствуя проникновению в его структуру холодного воздуха и влаги извне [2].

В таких пакетах реализуются сложные физические эффекты, которые не всегда могут быть исследованы в рамках традиционных методов. Например, известно, что в понятии "тепловое сопротивление" не рассматриваются процессы теплообмена, связанные с излучением и фазовыми превращениями влаги на поверхности тела человека и в слоях пакета одежды. Поэтому использование нормативных значений суммарного теплового сопротивления при комплектовании пакета накладывает существенные ограничения на рассматриваемые условия теплообмена в системе человек – одежда – окружающая среда. Исследование теплообмена методами математического моделирования позволяет более полно учесть физические процессы в структуре и на поверхности пакета материалов и особенности окружающей среды.

При реализации этого подхода для каждого вида материала определяются экспериментальные значения коэффициентов теплопроводности (λ , Вт/(м·К)) и теплоотдачи (α , Вт/(м²·К)). Далее, с учетом полученных результатов, строится математическая модель и разрабатывается расчетная геометрия пакета материалов. Поиск численных решений связан с определением распределения полей температур и плотностей тепловых потоков в структуре и на поверхности пакета, которые являются количественными характеристиками процесса теплообмена. Результаты решений проверяются экспериментально [3].

Характеристики высокотехнологичных материалов для формирования пакетов теплозащитной одежды представлены в табл. 1.

В результате исследований для каждого вида материалов экспериментально определена динамика коэффициентов теплопроводности. Коэффициенты теплоотдачи определены для образцов № 4...6, которые используются в качестве тканей верха. Исследования проведены при температурах окружающей среды -10...+20 °С [1]. Полученные результаты обобщены в виде графических зависимостей динамики коэффициента теплопроводности (рис. 1-а) и теплоотдачи (рис. 1-б) от температуры окружающей среды.

№ п/п	Вид материала	Волокнистый состав	Поверхностная плотность, г/м ²	Толщина, мм	Переплетение	Назначение в пакете
1	Трикотаж Outlast	полиэфирные	190	0,5	кулирная гладь	энергоаккумулирующий слой
2	Трикотаж Polartech Power Dry	полиэфирные	223	1,3	рисунчатое	лагоотводящий слой
3	Трикотаж Polartech Thermal Pro	полиэфирные	237	1,9	футерованное	утепляющий слой
4	Мембранная ткань Pertex Endurance	полиэфирные	80	0,15	полотняное	верхний слой
5	Мембранная ткань Songtex	полиамидные	120	0,2	полотняное	верхний слой
6	Ткань с гидрофобной пропиткой Softshell	полиамидные	128	0,3	полотняное	верхний слой

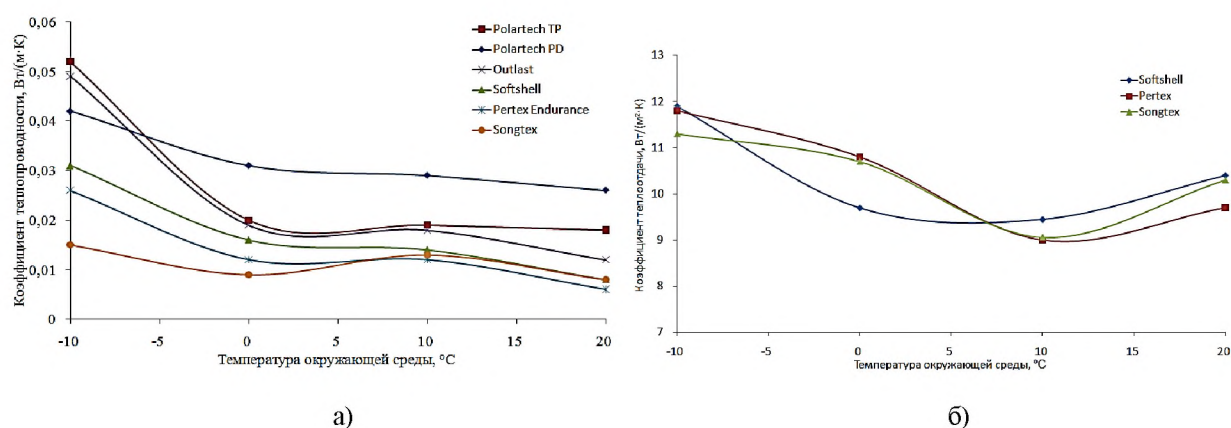


Рис. 1

Величина коэффициента теплопроводности исследованных материалов убывает в диапазонах $-10...0^{\circ}\text{C}$ и $+10...+20^{\circ}\text{C}$, а в диапазоне $0...+10^{\circ}\text{C}$ изменяется незначительно. Подобная динамика характерна для коэффициента теплопроводности воздуха, поскольку существенное значение оказывает воздушная прослойка, заключенная между поверхностью установки и исследуемым образцом.

Величина коэффициента теплопроводности образца № 1 ниже, чем образца № 2, несмотря на то, что его толщина меньше. Следовательно, повышение уровня теплозащитных свойств пакета в большей степени обеспечивается эффектом фазовых превращений при плавлении и затвердевании микрокапсул, чем свойствами неподвижного воздуха. Величина коэффициента теплопроводности ткани верха с гидрофобной пропиткой существенно выше

величин коэффициентов теплопроводности мембранных тканей. Эти различия объясняются точечным нанесением клея на мембрану, при котором в структуре материала возникают воздушные микропрослойки.

В диапазоне температур $-10...+10^{\circ}\text{C}$ с поверхности более тонких мембранных тканей (образцы № 4, 5) отдается больше тепла, чем с поверхности ткани с пропиткой (образец Softshell, рис. 1-б). В диапазоне $+10...+20^{\circ}\text{C}$ коэффициент теплоотдачи ткани Softshell выше, чем мембранных.

Обобщая полученные данные, установлено, что при формировании теплофизических свойств высокотехнологичных материалов в лучшей степени использованы теплоизоляционные свойства неподвижного воздуха. За счет этого удастся снизить суммарную толщину материалов в пакете для условий субнормальных температур с 4...5 мм до 2,4 мм.

Комплектация пакета материалов может быть обоснована методами математического моделирования, что позволяет существенно снизить объем экспериментальных исследований на этапе проектирования теплозащитной одежды. Рассмотрим пример построения модели процессов теплообмена в четырехслойном пакете, состоящем из: полотна Outlast (энергоаккумулирующий слой); полотна Polartech Power Dry (влагоотводящий слой); ткань Softshell (промежуточный слой); мембранная ткань Pertex Endurance (верхний слой).

Для математического описания процессов использованы уравнения теплопроводности (1), теплового излучения (2) и конвекции (3) [3]:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla(-\lambda \nabla T) = Q, \quad (1)$$

$$q_{\text{л}} = \sigma \varepsilon (T_{\text{пов}}^4 - T_{\text{окр}}^4), \quad (2)$$

$$\begin{cases} \nabla \eta (\nabla u + (\nabla u)^T + \rho(u \nabla u) + \nabla p) = F, \\ F = g \rho \left(\frac{q_k / \alpha_k - 2T_{\text{окр}}}{T_{\text{окр}}} \right), \\ \nabla(\rho u) = 0, \\ \nabla(-\lambda \nabla T + \rho C_p T u) = 0, \end{cases} \quad (3)$$

где ρ – плотность, кг/м³; C_p – теплоемкость, Дж/(кг·К); T – температура, К; t – время, с; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); Q – мощность вырабатываемого тепла, Вт; $q_{\text{л}}$ – плотность лучистого потока, Вт/м²; σ – постоянная Стефана-Больцмана ($5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К)); ε – степень черноты поверхности пакета; $T_{\text{пов}}$ – температура поверхности пакета, К; $T_{\text{окр}}$ – температура окружающей среды, К; u – скорость, м/с; F – движущая сила конвекции, Н; α_k – коэффициент конвективной теплоотдачи с поверхности пакета, Вт/(м²·К).

Пакет представлен в виде набора цилиндрических оболочек, внутренняя поверхность которого прилегает к телу человека, а внешняя контактирует с окружающей средой. С учетом характера распространения тепловых потоков расчетная геометрия пакета представлена в виде разреза многослойной оболочки (рис. 2-а), каждая область которого соответствует отдельному слою материала, участвующему в теплообмене.

На рис. 2 представлены результаты моделирования процессов теплообмена в четырехслойном пакете материалов: а) – расчетная схема модели; б) – распределение температуры в пакете материалов, полученное экспериментальным и численным методами.

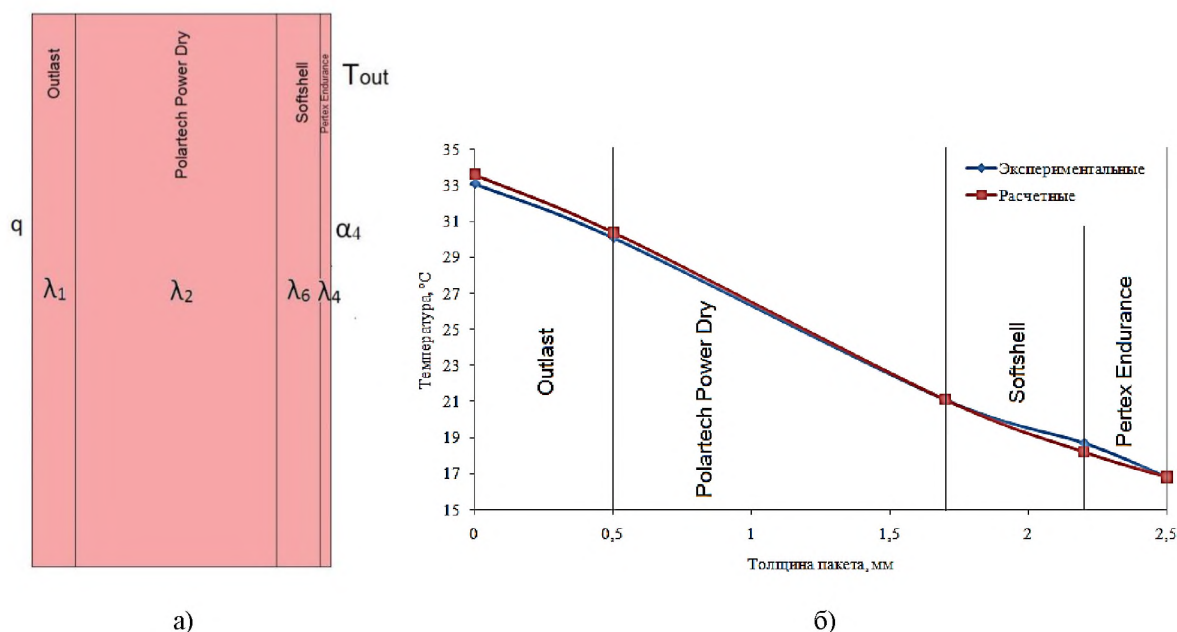


Рис. 2

В качестве физических условий при решении модели задаются: значения коэффициентов теплопроводности ($\lambda_1 \dots \lambda_4$, Вт/(м·К)), поверхностной плотности ($M_{S1} \dots M_{S4}$, г/м²), удельной теплоемкости ($C_{p1} \dots C_{p4}$, Дж/(кг·К)) для каждого слоя пакета. Начальным условием при поиске решения служит температура внутренней поверхности пакета (T_{in} , К). Поиск решения модели проводится при граничных условиях третьего рода: известная величина температуры окружающей среды (T_{out} , К) и коэффициент теплоотдачи ткани верха Pertex Endurance (α_4 , Вт/(м²·К)).

На рис. 2-б представлен результат решения в виде распределения температурного поля в пакете. Поиск решения проводился исходя из условия теплового комфорта на поверхности кожи $T_{in}=305$ К (+32 °С), а температура окружающей среды $T_{out}=263$ К (-10 °С). Коэффициенты теплопроводности слоев пакета $\lambda_1=0,049$ Вт/(м·К); $\lambda_2=0,042$ Вт/(м·К); $\lambda_3=0,035$ Вт/(м·К); $\lambda_4=0,026$ Вт/(м·К) и коэффициент теплоотдачи для ткани Pertex Endurance $\alpha_4=11,5$ Вт/(м²·К) выбирались по экспериментальным данным (рис. 1).

Для сравнения на рис. 2-б приведено экспериментально исследованное распределение температурного поля в пакете. Как видно, расхождение между теоретически прогнозируемой и экспериментально наблюдаемой температурами находится в пределах 0...0,6 °С. Эти различия являются допустимыми. Поэтому комплексный подход, включающий экспериментально определенные зависимости коэффициентов теплопроводности и теплоотдачи материалов от температуры окружающей среды и построенную на этих данных математическую модель, можно использовать для обоснования комплектации пакетов теплозащитной одежды из высокотехнологичных материалов.

ВЫВОДЫ

1. Авторами предложен комплексный метод для исследования теплофизических свойств пакетов теплозащитной одежды, сочетающий подходы математического моделирования и экспериментальных исследований.

2. Для его реализации исследована динамика коэффициентов теплопроводности и теплоотдачи некоторых видов высокотехнологичных материалов при изменении температуры окружающей среды, составлены математические модели процессов теплообмена в пакетах материалов различной комплектации. Предлагаемый метод моделирования рассмотрен на примере четырехслойного пакета для условий субнормальных температур. Численное решение модели, полученное при температуре окружающей среды $t_{окр} = -10$ °С, проверено экспериментально.

3. Практическая значимость полученных результатов исследований заключается в возможности их использования для научно обоснованной комплектации пакетов теплозащитной одежды из высокотехнологичных материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Родичева М.В., Абрамов А.В. Исследование комплексных процессов тепломассопереноса в структуре материалов современной теплозащитной одежды: раздел "Моделирование эксплуатационных процессов в технических системах" – М.: "Спектр", 2014. С.173...204.
2. US Patent № 20040132367 IC B31B 33/00 Multi – layer garment system / M. Rock owner: MMPI-IPCO LLC. – № 2004/0132367, fil. 15.09.2003; pub. 8.06.2004. – 13 p.
3. Xu D.H., Meibao B.G. Numerical solution of a dynamic model heat and moisture transfer in porous fabric under low temperature // International Journal of Heat and Mass Transfer. – № 61, 2013. P. 149...157.

REFERENCES

1. Rodicheva M.V., Abramov A.V. Issledovanie kompleksnyh processov teplomassoperenosa v strukture materialov sovremennoj teplozashhitnoj odezhdy: razdel "Modelirovanie jekspluatacionnyh processov v tehniceskikh sistemah" – M.: "Spektr", 2014. S.173...204.
2. US Patent № 20040132367 IC B31B 33/00 Multi – layer garment system / M. Rock owner: MMPI-IPCO LLC. – № 2004/0132367, fil. 15.09.2003; pub. 8.06.2004. – 13 p.
3. Xu D.H., Meibao B.G. Numerical solution of a dynamic model heat and moisture transfer in porous fabric under low temperature // International Journal of Heat and Mass Transfer. – № 61, 2013. P. 149...157.

Рекомендована кафедрой технологии и конструирования швейных изделий ПГУ. Поступила 02.03.16.