

РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

УДК 539.3.

© Н.С. ДЕМИДОВА, М.В. ДВОРНИКОВ, А.С. НЕСЫНОВА, 2009

МЕМБРАННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ В МНОГОСЛОЙНОЙ КОНСТРУКЦИИ ТЕРМОРЕГУЛИРУЮЩЕЙ ОДЕЖДЫ ДЛЯ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ

Надежда Сергеевна ДЕМИДОВА родилась в городе Москве. Профессор МАИ. Доктор технических наук, профессор. Основные научные интересы — в области математического моделирования, численных методов, вычислительной термогидродинамики и теплофизики. Автор более 150 научных работ. E: mail: n.s.demidova@gmail.com

Nadezhda S. DEMIDOVA, D.Sci., was born in Moscow. She is a Professor at the MAI. Her major research interests are in mathematical modeling, numerical methods, computational thermo- and hydrodynamics, thermal physics. She has published over 150 technical papers. E: mail: n.s.demidova@gmail.com

Михаил Вячеславович ДВОРНИКОВ родился в 1950 г. в селе Кузедеево Новокузнецкого района Кемеровской области. Начальник отдела ГосНИИИ военной медицины Минобороны России. Профессор МАИ. Доктор медицинских наук, профессор. Основные научные интересы — в области авиационной, космической и экологической медицины, гигиены одежды, гипоксии, гипотермии, гипертермии, терморегуляции, безопасности жизнедеятельности. Автор более 150 научных работ. E: mail: dvormv@yandex.ru

Michael V. DVORNIKOV, M.D., D.Sci., was born in 1950, in the Kemerovo Region. He is the Head of a Department in the Aerospace Medicine Research and Test Center at the Military Medicine State Research Institute. His major research interests are in aerospace and environmental medicine, hyperthermia, hypothermia, hypoxia, thermal regulation, life activity safety. He has published more than 150 technical papers. E: mail: dvormv@yandex.ru

Анна Сергеевна НЕСЫНОВА родилась в городе Ейске. Аспирантка МАИ. Основные научные интересы — в области теплофизики, теплофизических свойств специальной одежды, моделирования теплофизических процессов. Автор более 6 научных работ. E: mail: asn84@yandex.ru

Anna S. NESINOVA was born in Yeisk. She is a Postgraduate Student at the MAI. Her research interests are in mathematical modeling, numerical methods, computational thermo- and hydrodynamics. She has published 6 technical papers. E: mail: asn84@yandex.ru

«Умная одежда», имитируя функции человеческой кожи, волосистой покров животных, реализует динамику теплообмена, потоотделения, становится активным механизмом взаимодействия человека с внешней средой в диапазоне экстремальных режимов. В статье осуществлена попытка формализации биологических процессов поверхностного теплообмена человека на примере трехслойной конструкции одежды с комплексом параметров пористости, влагопоглощения и проницаемости с учетом явлений смачиваемости, капиллярности, присущих мембранным технологиям. Представлены послойные математические модели, проведен параметрический анализ. Результаты расчета приводятся в критериальной форме. В число основных определяющих параметров математической модели входят число Марангони, Вейссенберга, капиллярное число. Формулируются конструктивные рекомендации.

Smart clothing imitating human skin functions and animal hair coat realizes heat exchange dynamics and perspiration. It becomes therefore an active mechanism of human interaction with external environment for a range of extreme modes. An attempt is carried out to formalize biological processes of human surface heat transfer, which is exemplified for a case of three-layer design clothes with a set of parameters of porosity, permeability and moisture absorption, taking into account the phenomena of wettability and capillarity, which are inherent in the membrane technology. The layerwise mathematical model was presented, in which the parametric analysis was carried out. The results are shown in the criterial form. The main parameters that determine the mathematical model are Marangoni number, Weissenberg number, capillary number. The structural recommendations are formulated.

Ключевые слова: одежда, теплообмен, потоотделение, влагопоглощение, смачиваемость, мембранные технологии, математическая модель.

Key words: clothing, heat exchange, perspiration, moisture absorption, wettability, membrane technologies, mathematical model.

Обозначения

$f_{1(2)}$ — площади участков составной поверхности f_1 (f_2);

Θ_1, Θ_2 — углы смачивания составной поверхности f_1 (f_2);

Θ_l — локальный краевой угол смачивания;

Θ_c — угол смачивания составной поверхности;

Θ_r — угол смачивания шероховатой поверхности;

D_k — дыхательный коэффициент;

Q_n — энергозатраты, Вт;

M_n — молекулярная масса полимера, г/моль;

M_{H_2O} — молекулярная масса воды, г/моль;

K — скорость кинетики, кг/(м²·с);

$H^{0(h)}$ — тепловой эффект в соответствующих областях, Дж/моль;

β — коэффициент массопереноса, м/с;

T — текущая температура, К;

C_p — теплоемкость твердой фазы, кДж/(кг·К);

φ — относительная влажность воздуха;

$Q_{об}$ — объемная скорость вентиляции, м³/с;

D — коэффициент диффузии, м²/с;

F — площадь поверхности, м²;

c_0 — начальная безразмерная концентрация сорбируемого компонента в газовой фазе;

c_k — текущая безразмерная концентрация паров воды в полимере;

$c_{исх}, c_{равн}$ — концентрация безразмерная исходная, концентрация равновесная;

J_i — плотность потока газа, 10⁻⁴ кг/(м²·с);

J_{H_2O} — поток водяных паров, кг/(м²·с);

λ — теплопроводность, Вт/(м·К);

$\lambda_{эф}$ — эффективная теплопроводность, Вт/(м·К);

λ_r — теплопроводность газа, Вт/(м·К);

λ_n — теплопроводность полимера, Вт/(м·К);

J_q — поток тепла, Вт/м²;

Q — удельная энергия, выделяемая внешним источником, кДж/кг;

$T^{0(h)}$ — температура окружающей среды, К;

$T_{изв}$ — коэффициент извилистости пор;

α_T — коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·град);

Pr (Pr_m) — критерий Прандтля тепловой (мас-сообменный);

We — число Вебера,

$$We = \frac{\sigma}{d_{кап} \rho_{ж} w^2} = \frac{\sigma}{r \cdot \rho_{H_2O} \cdot \left(J_{H_2O} / M_{H_2O} \right)^2};$$

σ — коэффициент поверхностного натяжения, Н/м;

μ^* — коэффициент формы;

ρ — плотность, кг/м³;

ρ_0 — кажущаяся плотность полимера, кг/м³;

$S_{уд}$ — удельная площадь поверхности, м²/м³;

G — модуль упругости при сдвиге, Н/м²;

$p_{нас}$ — давление насыщенных паров, Н/м²;

μ — динамическая вязкость среды, Н·с/м²;

ν — пористость по газовой фазе;

Π — пористость по внутрипоровой жидкости;

r (r_{min}) — радиус поры (минимальный), м;

$f(r)$ — функция распределения пор по размерам;

k_r — составляющая коэффициента массопроводности в газовой фазе, м²/с;

$k_{кап}$ — капиллярная составляющая массопроводности, м²/с;

ϵ_r — текущее значение пористости;

ϵ — общая пористость;

ζ — безразмерная координата.

Организм человека представляет собой термостатируемую систему с внутренним источником тепла, находящуюся в непрерывном взаимодействии с окружающей средой, и в комфортных температурных условиях тепловой баланс организма поддерживается за счет исключения теплоты следующим образом: излучения — 44%, конвекции — 1%, испарения — 22%, теплопроводности — 2%, дыхания — 31% [1].

Увеличение нагрузки на организм кардинально изменяет распределение тепловых потоков. Основной вклад в теплоотведение вносит потоотделение. Один литр пота у человека массой 75 кг может понизить температуру тела на 10 °С. При среднем количестве тепла 10450—12500 кДж, освобождаемом человеком в сутки, достаточно выделения и испа-

рения 5–6 л пота, чтобы обеспечить постоянство температуры тела [1].

В условиях экстремальной температуры окружающей среды определяют внешнюю тепловую нагрузку Q_L — суммарную величину теплового потока излучением, конвекцией и кондукцией. Внешняя тепловая нагрузка и теплопродукция человека в сумме составляют общую тепловую нагрузку. При физической работе в формулу теплового баланса вводят величину теплового эквивалента внешней физической работы Q_W [1, 2].

Энергозатраты зависят от физической нагрузки и дыхательного коэффициента: $Q_{\Pi} = f(D_K, E)$. Они могут быть определены по формуле

$$Q_{\Pi} = \frac{0,292((0,87 - 0,2D_K)D_K \cdot 10^{-4}) \cdot E}{1,708 \cdot 10^{-4} - \left(\frac{D_K - 0,707}{0,292}\right) \cdot 1,23 \cdot 10^{-5}}$$

$$E = 87 \div 1050 \text{ Вт.}$$

Энергозатраты, в зависимости от потребляемого кислорода, приведены в таблице.

Характер физической нагрузки	Общие энергозатраты, Вт	Средний дыхательный коэффициент, D_K
Покой	87...105	0,84
Легкая	105...175	0,84
Средняя	175...350	0,85
Тяжелая	350...525	0,87
Очень тяжелая	525...700	0,88
Чрезвычайно тяжелая	700...875	0,9
Изнурительная	875...1050	0,95

$$Q_{\Pi} = \frac{0,292M_{O_2}}{1,708 \cdot 10^{-4} - \left(\frac{D_K - 0,707}{0,292}\right) \cdot 1,23 \cdot 10^{-5}}$$

Здесь M_{O_2} — масса потребляемого кислорода,

$$M_{O_2} = (0,87 - 0,2D_K) \cdot D_K \cdot 10^{-4} \text{ кг/кДж;}$$

D_K — дыхательный коэффициент.

Масса выделившегося углекислого газа как функция дыхательного коэффициента имеет вид

$$M_{CO_2} = (1,2 - 0,275D_K) \cdot D_K \cdot 10^{-4} \text{ кг/кДж.}$$

Отношение общего уровня энергозатрат к уровню энергозатрат кожи составляет 0,08 [1].

Структура умной одежды

В экстремальных температурных условиях соотношение между различными способами теплоотдачи изменяется, и система естественной терморегуляции не справляется с тепловой нагрузкой [1–4].

Современные концепции экипировки человека в экстремальных условиях требуют внедрения в производство новых технологий [2–4].

Под «умной одеждой» понимают многослойную конструкцию одежды, при которой каждый ее слой отвечает за определенную функцию, например за отведение влаги от поверхности кожи человека, передача ее во внешнюю среду, поддержание температуры пододежного пространства на заданном уровне, защиту от воды, поступающей из внешней среды, защиту от других неблагоприятных условий среды.

Использование материалов с высокой влагопроницаемостью способствует отведению влаги при повышенном потовыделении.

Интенсификация процесса отведения влаги (потовыделений) позволяет ускорить процесс отведения тепла. Для этого целесообразно на границе с окружающей средой иметь материал с высокими показателями влагопроницаемости. Более всего на роль данного промежуточного слоя подходят синтетические полимерные материалы.

Пленочный слой, введенный в состав природных волокнообразующих полимеров, не пропускает воду вовнутрь, выводя влагу наружу, сохраняя тепло и комфортность — «дышащие» свойства. Преимущества такой многослойной конструкции, состоящей из природных и искусственных полимеров определяются стабильностью полимерных пленок, гидрофильно-липофильным балансом (ГЛБ) и соответствующими теплофизическими характеристиками.

Квазиравновесный метод исследования мембранного массопереноса на межфазных границах при поверхностной модификации полимерных мембран нуждается в совершенствовании [5,6], поскольку необходим учет влияния особенностей структуры полимерной мембраны с различной равновесной растворимостью и эффектом структурирования в капиллярах рабочей среды.

Пропускная способность по отношению к различным веществам обеспечивается теплофизическими характеристиками структурированных поверхностей волокнистых мембранных материалов [2, 3, 4], представленных параметрами (рис.1): f_1, f_2 — площади участков составной поверхности с углами смачивания Θ_1, Θ_2 ; Θ_l — локальный краевой угол; Θ — угол смачивания контактного вла-

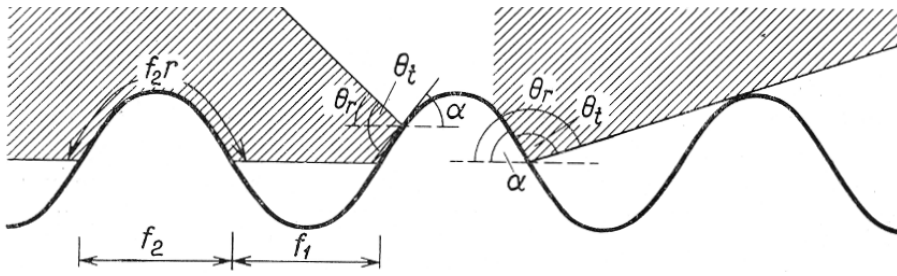


Рис. 1. Профиль смачиваемой сложной составной поверхности

поглощающего слоя; r — коэффициент шероховатости, представляющий отношение истинной площади поверхности к ее видимой проектируемой площади; α — угол, характеризующий шероховатость и образованный между касательной к поверхности и горизонталью.

Угол смачивания шероховатой поверхности Θ_r связан с шероховатостью $r_{ш}$ и истинным углом смачивания $\Theta_{ист}$ следующим образом: $\cos \Theta_r = r_{ш} \cdot \cos \Theta_{ист}$. Для составной поверхности угол смачивания имеет вид

$$\cos \Theta_c = f_1 \cdot \cos \Theta_1 + f_2 \cdot \cos \Theta_2.$$

Зависимости эффективной теплопроводности $\lambda_{эф}$ для волокнистых структур представляются в виде:

$$\lambda_{эф} = \lambda_{п} \frac{\nu + 2 - 2(1 - \nu)(1 - \Pi)}{\nu - 2 + (1 - \Pi)(1 - \nu)};$$

$$\lambda_{эф} = A\lambda_A + B\lambda_B;$$

$$\lambda_A^I = \frac{\lambda_{п}\lambda_{Г}}{\lambda_{п}(1 - \Pi) + \lambda_{Г}\Pi} \equiv \frac{\lambda_{Г}}{1 - \Pi + \nu\Pi};$$

$$\lambda_B^II = \lambda_{п}(1 - \Pi) + \lambda_{Г}\Pi = \lambda_{п}(1 - \Pi + \nu\Pi);$$

$$A = 2/3; B = 1/3; \nu = \frac{\lambda_{Г}}{\lambda_{п}}.$$

Использование вышеприведенных механизмов основывается на правильном выборе материала. При этом следует учитывать комплекс возможных внешних теплофизических параметров среды и проводящих свойств слоев материала, влияющих на перенос вещества через мембраны.

Механизмами переноса вещества в мембране традиционно являются градиенты концентрации,

давления и температуры в предлагаемом слое. Перенос осуществляется диффузией и термодиффузией, силами поверхностного натяжения в капиллярной структуре полимера [5, 7].

Математическая модель процессов теплопереноса в многослойном снаряжении

Программное обеспечение позволяет анализировать поведение системы «человек—мембрана—внешняя среда» при различных соотношениях параметров.

Математическая модель процесса переноса в многослойном снаряжении, включает уравнения переноса массы (1), потока вещества (2), кинетику процесса (3), теплофизические характеристики (4), уравнения переноса тепла (5) и потока тепла (6), удельного тепловыделения (7), начальные (8) и граничные условия (9), и имеет вид:

$$\rho_i \frac{\partial c_i}{\partial t} = -\text{div} J_i \pm \rho_i \cdot K_i; \tag{1}$$

$$J_i = \left(-D_i^* \frac{M p_{нас}}{\rho_0 RT} \frac{\partial \varphi}{\partial c} - \frac{\sigma \cos \Theta (r^3 - r_{мин}^3) f(r)}{\mu^* r^2 \cdot 4 \cdot \mu_{H2O}} \right) \rho_0 \frac{\partial c}{\partial n} -$$

$$-D_r^* \frac{M p_{нас}}{\rho_0 RT} \frac{\partial \varphi}{\partial T} \rho_0 \frac{\partial T}{\partial n}; \tag{2}$$

$$K = \epsilon \rho \beta (c_{исх} - c_{равн}); \tag{3}$$

$$\left. \begin{aligned} C_p &= f(C_{pi}, M_{п}, \epsilon); \\ \lambda &= f(\lambda_i, \epsilon); \end{aligned} \right\} \tag{4}$$

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = -\text{div} J_q \pm K \cdot S_{уд} \cdot Q; \tag{5}$$

$$J_q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} - \rho \cdot C_p \frac{1}{c} D \frac{\partial c}{\partial n} \cdot \frac{\partial T}{\partial n} + \frac{Q_{об}}{(F \cdot 60)} C_p T; \tag{6}$$

$$Q = f(c, T, Q_{п}). \tag{7}$$

Начальные условия:

$$\begin{aligned} t = 0; \quad c_i = c_i^0; \quad T_i = T^0; \\ J_i = J_i^0 = 0; \quad J_q = J_q^0. \end{aligned} \quad (8)$$

Граничные условия:

$$\begin{aligned} t = 0; \quad \zeta = 0; \\ J_{n1,2} = k_a c_i - k_d c_i; \\ J_q = \alpha^{0(h)}(T - T^{0(h)}) + Q^{0(h)} K^{0(h)}. \end{aligned} \quad (9)$$

Здесь $k_a(k_d)$ — константа скорости адсорбции (десорбции); $J_{n1,2}$ — массовый поток на границе раздела фаз; J_q — тепловой поток на границе раздела фаз (0, h); $Q^{0(h)}$ — тепловой эффект превращений $K^{0(h)}$.

Соотношение массовых долей материала и сорбированной влаги на первом этапе позволяет проводить расчет теплофизических характеристик по твердой полимерной фазе.

Программное обеспечение методом конечного элемента решает задачи:

- 1) определения текущих полей концентраций, потоков в твердом материале;
- 2) определения текущих полей температур, тепловых потоков в полимере;
- 3) выявления сингулярной точки, определяющей изменение механизма массопереноса с капиллярного механизма на диффузионный — стефановский, кнудсеновский, поверхностной диффузии [4—7].

Значение концентрации $c_{\text{син}}$ при тепломассопереносе в пористых рабочих средах, равное сингулярному значению в сингулярной точке $c = c_{\text{син}}$, соответствующей точке изменения механизма массопереноса с капиллярного механизма на диффузионный — стефановский, кнудсеновский, поверхностной диффузии, устанавливается соотношением [4—7]

$$c_{\text{син}} = \frac{\rho_{\text{H}_2\text{O}}}{\rho_0} \int_{r_{\text{мин}}}^r f(r) dr = \frac{\rho_{\text{H}_2\text{O}}}{\rho_0} \varepsilon_r.$$

Для области $c < c_{\text{син}}$

$$k(c)_T = k_\Gamma + k_{\text{кап}} = (k_{\text{син}} - k_{\text{кап, син}}) \frac{\left(\frac{\partial c}{\partial \varphi}\right)_{\text{син}}}{\left(\frac{\partial c}{\partial \varphi}\right)} + k_{\text{кап}};$$

$$k_\Gamma = D \frac{M \cdot p_{\text{нас}}}{\rho_0 \cdot R \cdot T} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial c}.$$

Здесь

$$k_{\text{кап, син}} = \frac{1}{\mu^*} \frac{\cos \Theta}{4} \cdot \left(\frac{\sigma}{\mu}\right)^n \frac{\int_{r_{\text{мин}}}^{r_{\text{син}}} r^2 f(r) dr}{r^2 f(r)};$$

$$k_{\text{кап}} = \frac{1}{\mu^*} \frac{\cos \Theta}{4} \cdot \left(\frac{\sigma}{\mu}\right)^n \frac{\int_{r_{\text{мин}}}^r r^2 f(r) dr}{r^2 f(r)}.$$

Для области $c > c_{\text{син}}$

$$k = k_{\text{син}} + k_{\text{кап}} = k_{\text{син}} + \frac{1}{\mu^*} \frac{\cos \Theta}{4} \left(\frac{\sigma}{\mu}\right)^n \frac{\int_{r_{\text{син}}}^r r^2 f(r) dr}{r^2 f(r)}.$$

Для области $c = c_{\text{син}}$ коэффициент

$$k_{\Gamma, \text{син}} = k_{\text{син}} - k_{\text{кап, син}}.$$

Анализ обобщенных критериев интегральных характеристик многослойных систем. Анализ модели капиллярно-пористого тела

По результатам эксперимента изотерм сорбции

задаем производные $\frac{\partial \varphi}{\partial c}, \frac{\partial \varphi}{\partial T}$ [5—7], которые варь-

ировались от 1,5 до 6. Приводится анализ в диапазонах потока тепла $J_q = 12 \div 400$ Дж/(м²·с) и потока газа $J_i = (0,5 \div 2) \cdot 10^{-4}$ кг/(м²·с).

В первом слое природного волокнообразующего полимера влага поглощается материалом с углом смачивания в диапазоне 0—90°.

Прохождение вещества через мембрану определяется его растворимостью в мембране, коэффициентом диффузии, а также мембранным коэффициентом, определяемым пористостью ε , коэффициентом извилистости пор $T_{\text{изв}}$, от которых зависят влагосодержание мембран и мембранная проницаемость.

Контактный (накожный) влагопоглощающий слой ($\zeta = 0 \div 0,1$) $\Theta = 90^\circ$ с радиусом пор $r = 10^{-6}$, с коэффициентом извилистости $T = 4$ пропитывается влагой (рис. 2), что сопровождается уменьшением химического потенциала воды μ_1 в поглощенном влаговыделении — поте — и локальным ростом температуры за счет сорбции и теплоты конденсации. По толщине мембраны сорбционный процесс замедляется.

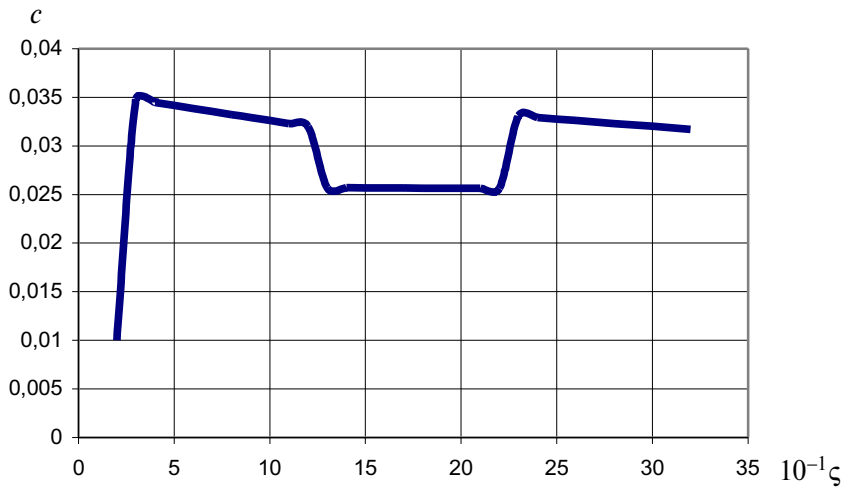


Рис. 2. Распределение концентрации водяных паров по толщине мембраны

При возрастании концентрации водяных паров уменьшается сорбция, ввиду того что удерживаемая концентрация является тормозящим фактором. Полимер охлаждается, передавая тепло следующим слоям. Второй слой ($\zeta = 0,1 \div 0,2$) испаряет влагу. В свою очередь, пространственные флуктуации выделяющегося тепла в области межфазной границы приводят к локальным температурным градиентам (рис. 3) и, соответственно, локальным изменениям физико-химических характеристик слоев рабочей среды, прилегающих к мембране, возникновению тангенциальных течений Марангони, изменению концентрации растворенных веществ, энергии сцепления с поверхностью мембраны.

Гидрофилизация поверхности микропор первых слоев с радиусом пор $r = 10^{-6}$ м способствует преимущественному переносу молекул воды.

Гидрофобизация поверхности второго слоя ($\zeta = 0,1 \div 0,2$) с углом смачивания $\Theta = 0^\circ$ воздей-

ствует на процесс испарения влаги и способствует отводу потока воды (рис. 2) вследствие снижения активации трансмембранного переноса. Повышенная концентрация воды в порах вызывает десорбцию пота.

Следующий теплоподдерживающий слой ($\zeta = 0,2 \div 0,3$) с радиусом пор $r = 10^{-5}$ м, $\Theta = 45 \div 90^\circ$ характеризуется проводимостью влаги наружу теплопроводностью $1,4 \cdot 10^{-3}$ Вт/(м²·К), теплоемкостью 1,05 Дж/(кг·К). Поверхностный слой с проводимостью влаги наружу и несмачиванием снаружи ($\Theta = 0$) обеспечивает необходимый градиент давления и уровень воздухопроницаемости порядка 170 г/(м²·ч) при высокой физической нагрузке.

Величины производных поверхностного натяжения от концентрации и температуры $\frac{d\sigma}{dc}$ и $\frac{d\sigma}{dT}$ зависят от физико-химической природы поверхности мембран.

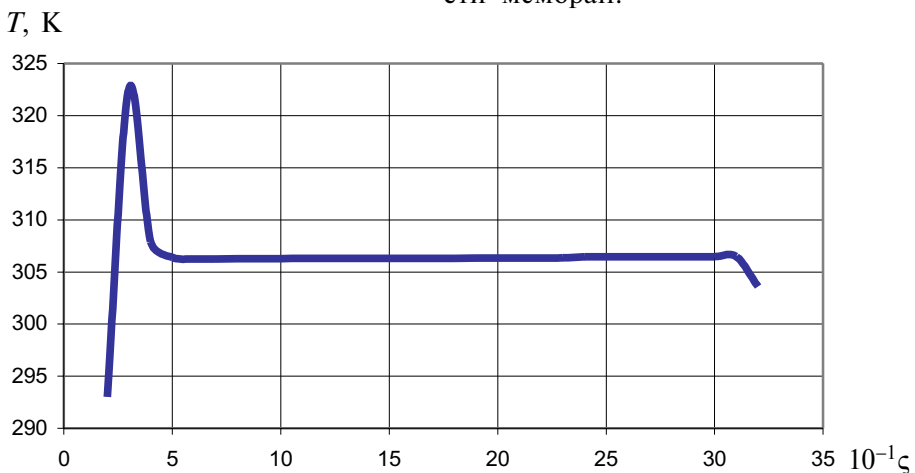


Рис. 3. Распределение поля температур по толщине мембраны

В частности, лиофилизация поверхности мембраны приводит к возникновению пристеночного скольжения за счет снижения эффективной вязкости, что наблюдается в мембранном слое, испаряющем воду. Изменяя микроструктуру мембраны, управляют ее влагоемкостью.

Внутрипоровая жидкость в полимере вследствие влияния капиллярных сил не является текучей. Она сохраняет свои свойства со значением эффективной проводимости. Поэтому для процессов тепломассопереноса в капиллярно-пористой структуре следует ввести число Вайссенберга R_W [9], представляющего отношение высокоэластических сил к силам вязкости. Оно отражает меру обратимости сдвига, который характеризует соотношение скользящего потока пара и удерживаемого силами упругости, т.е. оценивает меру обратимости деформации сдвига. Выражение числа Вайссенберга R_W через молекулярную массу материала $M_{\text{п}}$ и скорости, выраженные через поток паров воды, имеет вид

$$R_W = \frac{M_{\text{п}} \cdot J_{\text{H}_2\text{O}}}{20 \cdot M_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \rho \cdot R \cdot T}$$

Число Вайссенберга уменьшается с убыванием скольжения газовой фазы и молекулярной массы полимера (рис. 4).

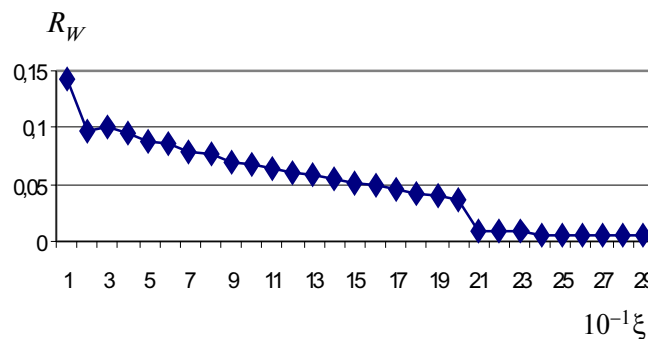


Рис. 4. Профиль числа Вайссенберга

В области высокого влагосодержания ($\zeta = 0 \div 0,1$) (см. рис. 2) отвод тепла в «умной одежде» (см. рис. 3) сопровождается испарением и характеризуется нелинейным полем температуры, что, в свою очередь, вызывает изменение равновесной концентрации и скорости массопереноса за счет концентрационных изменений и перекрестных эффектов — термодиффузии, термокапиллярного переноса, теплового скольжения газовой фазы. При сушке материала основной массоперенос определяется капиллярной составляющей, которая на начальных участках сопоставима с составляющей за счет эффекта Сорэ [7, 8, 9] в области возрастания

температуры. Она на порядок и выше превосходит составляющие — диффузионную и эффекта Сорэ.

Механизм растекания по полимерным обработанным поверхностям характеризуется уменьшением поверхностной энергии, показателей адгезии, сопровождающимся сдвиговыми процессами.

Присутствие каркаса фазы полимера (твердой) изменяет свойства внутрипоровой влаги в граничной σ -фазе, которая для воды составляет величину порядка $(0,05 \div 0,09) \cdot 10^{-6}$ м. Для цилиндрических капилляров радиусом $1 \cdot 10^{-6}$ м определяют долю капиллярных объемов в 17,2% [5—8].

В математической модели введены эффективные коэффициенты поверхностного натяжения и вязкости внутрипоровой влаги, отличающиеся от свойств объемной фазы, а также структурный коэффициент формы капиллярнопористого полимера.

Приведение к безразмерному виду уравнений переноса позволяет ввести критерии: капиллярное число Ca , критерий Марангони Ma [8]:

$$Ma = \frac{|\Delta\sigma| \cdot r}{\rho w^2}$$

Эффект Марангони оценивает перенос вещества из объема сконденсированного влаговыведения, стимулированный градиентом поверхностного натяжения (рис. 5).

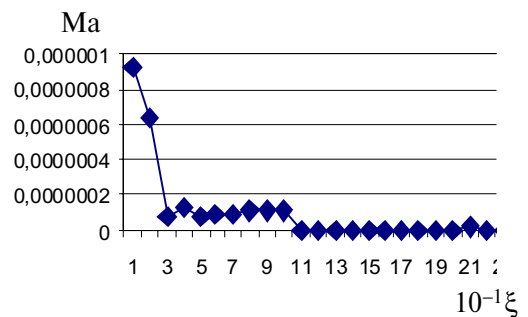


Рис. 5. Профиль числа Марангони

Линейная скорость движения определяется через поток, в нашем случае

$$w = \frac{J_{\text{H}_2\text{O}}}{M_{\text{H}_2\text{O}}}$$

Вследствие пульсирующих изменений объемного расхода рабочей среды в капиллярно-пористой структуре одежды процессы тепломассопереноса сопровождаются эластическими деформациями, определяемыми выражением для эластического

числа Рейнольдса: $Re_3 = \frac{J_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \mu}{M_{\text{H}_2\text{O}} \cdot G}$

При безнапорном движении парообразование во внутренних объемах сопровождается капиллярным давлением, определяющим в стационарном состоянии связь потока фильтрации рабочей среды и движущей силы с суммой гидравлических сопротивлений влажностной среды (пота) и пара.

При малых значениях капиллярного числа Ca

$$Ca = \frac{Ma}{Pr \cdot We} = \frac{(J_{H_2O} / M_{H_2O}) \cdot r}{\sigma / (r \cdot \rho_{H_2O} \cdot (J_{H_2O} / M_{H_2O})^2)}$$

(порядка $Ca \approx 10^{-5}$) практически несущественно влияние гидродинамики. Это значение можно считать порогом, с которого наблюдается механизм действия капиллярных сил (рис. 6).

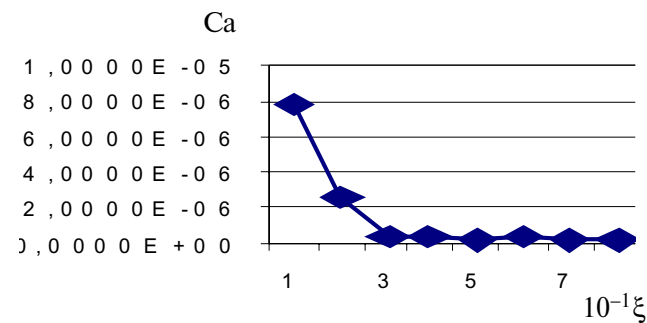


Рис. 6. Профиль капиллярного числа

Образованные структуры соединением отдельных элементов неполимерного компонента полимера в виде пузырьков газа, капель жидкости, твердых частиц и гетерогенного природного волокнообразующего полимера создают новые пути газопроницаемости с частичной или полной заменой диффузионной проницаемости другими механизмами — капиллярным механизмом и поверхностной диффузией, а также конвекцией, что обеспечивает при высокой физической нагрузке требуемый тепловой режим и уровень воздухопроницаемости порядка $170 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$.

Выводы

1. Конструирование «умной одежды» предполагает послыное целевое формирование структуры материала. Составляющие массопереноса в каждом конкретном случае адаптируются теплофизическими характеристиками, структурой полимера и составляющими его взаимодействия со средой подождежного пространства.

2. При подборе материала для «умной одежды» необходимо учитывать комплекс параметров: химический состав, структуру (размер пор r от 10^{-6} м во внутреннем слое до $0,5 \cdot 10^{-5} \div 1 \cdot 10^{-5}$ м во внешнем, коэффициент извилистости пор $1,5-10$), парамет-

ры поверхности материала (углы смачивания, теплоемкость, теплопроводность). Данные о влиянии этих параметров позволяют моделировать материалы для разных условий функционирования.

3. Установление механизма массопереноса, зависящего от сингулярной концентрации со значением порядка $c_{\text{син}} = 10^{-10}$, определяет области поглощения влаги материалом с углом смачивания в диапазоне 90° и радиусом пор порядка 10^{-6} м, $\Theta = 90^\circ$ с коэффициентом извилистости $T_{\text{изв}} = 4$.

4. Область гидрофобизации поверхности микропор способствует преимущественному переносу молекул воды с размером радиуса пор $r = 10^{-6}$, $\Theta = 0^\circ$ испарением влаги.

5. Теплоподдерживающий слой с радиусом пор $r = 10^{-5}$ м, углом смачивания $\Theta = 45 \div 90^\circ$ с проводимостью влаги наружу с теплопроводностью $1,4 \cdot 10^{-3} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, теплоемкостью $1,05 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ и плотностью $200 \text{ г}/\text{см}^3$ и толщиной $\delta = 10^{-5}$ м обеспечивает комфортные тепловлажностные условия. Внешний слой с проводимостью влаги наружу и несмачиванием снаружи ($\Theta = 0$) обеспечивает уровень воздухопроницаемости $\sim 170 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ при физической нагрузке $400 \text{ Вт}/\text{м}^2$.

Библиографический список

1. Глушко А.А. Космические системы жизнеобеспечения. — М.: Машиностроение, 1986.
2. Арамян А, Вартанов Р., Бекмешев В., Солодовников В., Махонин И., Афанасьев М. Биосовместимые наноматериалы //Аэрокосмический курьер. 2007. №2. С. 78-81.
3. Андреев Г., Белов Г., Агошков О., Путиев К., Ольховка О., Ахмеров Д. Нанотехнологии для авиационной техники // Аэрокосмический курьер. 2007. №2. С.76-77
4. Шумилина Г.А., Богатикова Р.И., Соловьева З.О., Кутина И.В. Грищенкова В.А.. Изучение возможности использования тканей из льняного волокна в составе белья и одежды в условиях космического полета // Тезисы международной конференции (24-27 сентября 2008 г.) «Системы жизнеобеспечения как средство освоения человеком дальнего космоса». М., 2008.
5. Чизмаджев Ю.А., Маркин В.С., Тарасевич М.Р., Чирков Ю.Г. Макрокинетика в пористых средах. — М.: Наука, 1971.
6. Хейфец Л.И., Неймарк А.В. Многофазные процессы в пористых средах. — М.: Химия, 1982.
7. Романков П.Г., Фролов В.Ф. Массообменные процессы химической технологии. — Л.: Химия, 1990
8. Свистовский Г. Гидродинамика межфазных поверхностей. — М.: Мир, 1984.

Московский авиационный институт
Статья поступила в редакцию 10.03.2009