

**Построение математической модели тепловлагоденноса в системе
«человек – защитная одежда – внешняя среда»****С.А. Игнатьев**
В.И. Ольшанский*Витебский государственный технологический университет,
Республика Беларусь*

Аннотация. В последние годы наблюдается растущий спрос со стороны исследователей и промышленности на надежные модели, прогнозирующие термофизиологические реакции человека. В статье изложены сценарии воздействия окружающей среды на тепловой комфорт человека с учетом свойств специальной защитной одежды и функционирования системы терморегуляции человека. Дано понятие о тепловом комфорте и системе терморегуляции организма человека. Математическая модель должна учитывать сложное протекание теплофизических процессов в системе «человек – одежда – окружающая среда». Тепловой поток между кожей человека и внутренней поверхностью защитной одежды выражается системой уравнений в частных производных. Система нелинейна в силу самой природы терморегуляции человека. В моделирование включены как тепловые, так и аэродинамические воздействия окружающей среды (температура, влажность воздуха и т. д.), тепловлагоденносопротивления одежды, а также тепловые потоки и потоки влаги к поверхности тела человека за счет функционирования внутренней терморегуляции. Особой проблемой является тот факт, что все эти процессы должны моделироваться взаимосвязанным образом. Таким образом, ставится задача перейти на основе математических моделей и компартментного подхода к количественной оценке процессов массоденноса и теплоты как отдельных частей, так и на основе тела человека в целом. Данная проблема разрешается в рассматриваемой работе. Методы конечных разностей используются для аппроксимации пространственных частных производных, что сводит задачу к решению системы нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений. Для решения задачи используется аппроксимация высокой точности во временном измерении. Модель используется для прогнозирования реакции одетого человека на различные изменения условий окружающей среды.

Ключевые слова: одежда специальная защитная, компартмент, терморегуляция, тепловой комфорт, температура, тепловлагоденносо.

Информация о статье: поступила 29 января 2024 года.

**Construction of a mathematical model of heat and moisture transfer in the system
"person – protective clothing – external environment"****Sergey A. Ignatyev**
Valery I. Alshanski*Vitebsk State Technological University,
Republic of Belarus*

Abstract. Recent years have seen a growing demand from both researchers and industry for reliable models that can predict human thermophysiological responses. This article outlines scenarios concerning the impact of the environment on human thermal comfort, taking into account the properties of special protective clothing and the functioning of the human thermoregulation system. It provides the overview of the concept of thermal comfort and the thermoregulation system of the human body. The mathematical model should consider the complex behavior of thermophysical processes within the "person – clothing – environment" system. The heat flow between human skin and the inner surface of protective clothing is represented by a system of partial differential equations. The system is nonlinear due to the nature of human thermoregulation. The modeling encompasses both thermal and aerodynamic effects of the environment (such as temperature, air humidity, etc.), the thermal and moisture resistance of clothing, as well as heat and moisture flows to the surface of the human body resulting from internal thermoregulation. A particular challenge lies in the fact that all these processes must be modeled in an interconnected manner. Thus, the task is to move, based on mathematical models and a

compartmental approach, to a quantitative assessment of the processes of mass transfer and heat of both individual parts and the human body as a whole. This problem is resolved in the work under consideration. Finite difference methods are applied to approximate spatial partial derivatives, which simplifies the problem to solving a system of nonlinear ordinary differential equations. To solve the problem, a high-precision approximation in the time dimension is used. The model is applied to predict the reaction of a clothed person to various changes in environmental conditions.

Keywords: drying, temperature, moisture content, heat flux density, moisture evaporation rate, drying coefficient, heat transfer coefficient, thermal conductivity coefficient, bio number.

Article info: received January 29, 2024.

Введение

Одежда, являясь защитным барьером между телом человека и окружающей средой, должна создавать и поддерживать вокруг тела микроклимат, обеспечивающий комфортные условия жизнедеятельности организма, а также уменьшать неблагоприятное воздействие окружающей среды для сохранения работоспособности и здоровья человека при условиях эксплуатации конкретного рассматриваемого типа одежды [Колесников, 1965].

Для человеческого организма, как открытой тепловой системы с внутренним источником тепла, оттоком или притоком тепла из окружающей среды, одежда является тепловым барьером между поверхностью кожи и окружающей средой. Тепловая энергия, производимая в организме при экзотермических химических реакциях преимущественно в скелетных мышцах и внутренних органах, является переменной и используется для поддержания внутренней температуры тела постоянной [Чичиндаев и Хромова, 2018]. Поскольку сохранение постоянства температуры тела является необходимым условием жизнедеятельности человека, необходимо, чтобы в тепловом балансе организма сохранялось равенство теплопродукции и теплоотдачи. Это обеспечивается механизмами внутренней терморегуляции как совокупности физиологических процессов, обусловленных деятельностью центральной нервной системы и направленных на поддержание температуры внутренних органов в узких определенных пределах независимо от значительных изменений условий окружающей среды и собственной теплопродукции и организма. В управлении теплоотдачей основная роль принадлежит периферическому кровотоку, от скорости которого в коже меняется интенсивность теплообмена от ее поверхности. Непрерывный теплообмен в системе «человек – одежда – окружающая среда» происхо-

дит посредством теплопроводности, конвекции и излучения.

Цель исследования

На основе построения модели теплообмена в системе «человек – защитная одежда – внешняя среда» сформировать физико-математическую модель теплового баланса человеческого тела.

Понятие о тепловом комфорте и системе терморегуляции организма человека

Под комфортом обычно понимается состояние психологической, физиологической гармонии между человеком и окружающей средой [Parsons, 2002]. Процессы, связанные с обеспечением комфорта человека, по своей природе являются физическими, теплофизиологическими, нейрофизиологическими и психологическими [Покровский и Коротко, 2003].

Тепловой комфорт связан с тепловым балансом организма человека – отношением между теплоотдачей (ТО) и теплопродукцией (ТП), при этом вклад различных органов организма в теплопродукцию является неравномерным. Поскольку человеческий организм непрерывно генерирует тепло (75–80 Вт в состоянии покоя или сна и 1000 Вт во время физической нагрузки), избыточное тепло необходимо отводить в окружающую среду тщательно контролируемым образом для поддержания температуры внутренних органов организма постоянной (около 37 °С с суточным изменением около ±0.5–0.8 °С [Марков, Тришин и Яковенко, 2021]).

Под тепловым (теплофизиологическим) комфортом можно понимать некоторое ощущение теплового состояния организма с индивидуальными физиологическими и анатомическими особенностями, который находится в определенном тепловом равновесии с условиями окружающей среды [Tang, He, Shao and Ji, 2016]. При этом возможное увеличение ТП вследствие, например, физической нагрузки должно компенсироваться увеличением ТО без напряжения процессов терморегуляции

и соответствовать физиологическим показателям, приведенным в таблице 1 (Parsons, 2002) и называемым условиями тепловой нейтральности.

Концептуальное уравнение теплового баланса как основа теплофизической модели системы «человек – одежда – окружающая среда»

Баланс теплопродукции и теплоотдачи не означает достижение некоторого устойчивого состояния с неизменностью и стационарностью температуры, а в силу присутствия активного управления тепловлагодереном наблюдается динамический баланс для поддержания постоянной температуры внутренних органов организма. Поэтому уравнение теплового баланса может быть представлено в различных видах (Parsons, 2002), но концептуально в них включаются три типа процессов – теплопродукция ($M - W$), теплоотдача ($K + C + R + E$) и накопление/дефицит тепла в организме S :

$$M - W = K + C + R + E + S \quad (1)$$

Скорость обмена веществ (метаболизм) M обеспечивает тело энергией, позволяющей выполнять механическую работу W за счет физической активности, а остальная часть высвобождается в виде тепла ($M - W$). Передача высвободившегося тепла в окружа-

ющую среду осуществляется проводимостью K , конвекцией C , излучением R и испарением E , интенсивность которых обычно зависит от условий окружающей среды. Таблица 2 демонстрирует одну из таких зависимостей от температуры окружающей среды на примере человека без одежды.

Применение компартментного подхода для построения виртуальной модели тела человека с целью описания тепловых процессов в организме

Как физическое, так и математическое моделирование тепловых процессов в системе «человек-одежда-окружающая среда» связано не только с установлением понимания функциональности защитной одежды с точки зрения ее теплоизоляционных свойств, но и, как указано выше, с изучением реакции организма человека с учетом его анатомических, физиологических, теплофизических особенностей на изменение внешних эксплуатационных рассматриваемого типа одежды. При этом тело человека условно разбивается на N элементарных компонентов в виде простых геометрических фигур (сфера, цилиндр, пластина) называемых компартментами, тогда как тепловые процессы описываются через последовательность математических зависимостей, основанных на физических законах сохранения и специальных алгоритмах терморегуляции, устанавливаю-

Таблица 1 – Показатели теплового комфорта организма человека
Table 1 – Indicators of thermal comfort of the human body

Показатель	В состоянии покоя или при легкой физической нагрузке	При тяжелой физической нагрузке
Температура тела	36.7 °C (подмышечная), 37.1–37.2 °C (ректальная)	37.5–37.7 °C (ректальная)
Температура кожи	33.8 °C (лоб), 33.1 °C (кисти), 31.0 °C (голен и стопы), 32.5–33.5 °C (средневзвешенная)	30.2–31.4 °C (средневзвешенная в связи с охлаждением из-за испарения)
Влагопотери	До 50 г/ч (испарение диффузной влаги)	До 180 г/ч
Теплоотдача в окружающую среду за счет испарения	23–27 % от общих теплопотерь (1/3 – на испарение с поверхности верхних дыхательных путей, 2/3 – за счет испарения с поверхности кожи)	Не превышает 30 % от общих потерь
Показатели сердечно-сосудистой системы	ЧСС 72 удара в минуту, объем кровообращения 4.9–5.6 л/мин, частота дыхания 12–15 вдохов в мин. Объем дыхания составляет 6–7.5 л/мин	ЧСС 90–100 ударов в минуту

Таблица 2 – Вклад в теплоотдачу проводимости, конвекции, излучения и испарения (человек без одежды)
Table 2 – Contribution to heat transfer by conduction, convection, radiation and evaporation (person without clothes)

Процесс	Температура окружающей среды, °C		
	20	30	36
Испарение	13 %	27 %	100 %
Конвекция и теплопроводность	26 %	27 %	0 %
Излучение	61 %	46 %	0 %

щих связь между как самими компартментами, так и с окружающей средой. Каждый из компартментов представляется набором K слоев с L ячейками (долями), соответствующих, например, коже, мышечной, костной и другим тканям [Fiala, 2010] (рисунок 1).

Система кровообращения обычно выступает в качестве дополнительного компартмента особого типа.

Одежда с прослойками воздуха между кожей и ее внутренней поверхностью может рассматриваться либо как отдельный компартмент со своими слоями, либо учитываться через эффективные коэффициенты теплоотдачи и влагопереноса от кожи в окружающую среду.

Таким образом, компартментный подход позволяет перейти на основе математических моделей к количе-

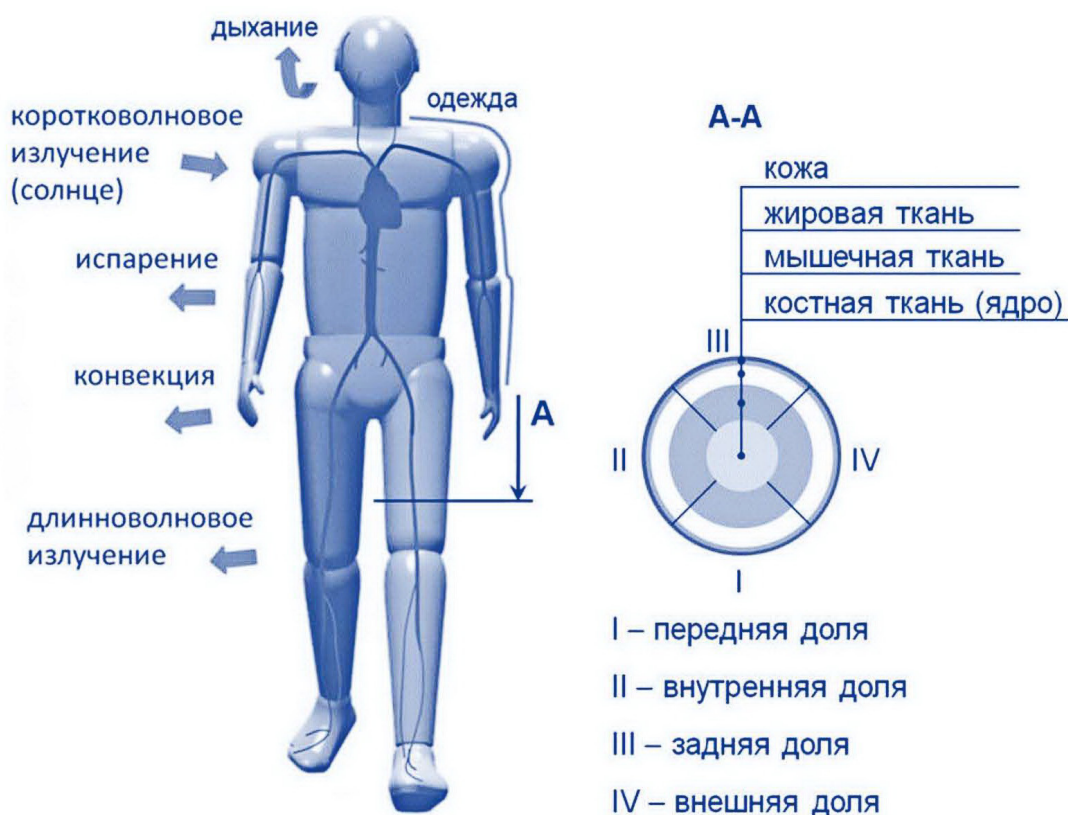


Рисунок 1 – Виртуальная модель тела человека
Figure 1 – Virtual model of the human body

ственной оценке процессов переноса как для отдельных частей, так и на их основе тела человека в целом. Для такого анализа, исходя из концептуального уравнения теплового баланса (1), следует определить конкретные пути теплопродукции и теплоотдачи с формулировкой уравнений, включающих члены, которые могут быть измерены или оценены.

Класс моделей теплового баланса на основе обыкновенного дифференциального уравнения

Для первого класса моделей при условном разделении организма для отдельной к-ткани п-компартамента уравнение (1) можно записать в обобщенном виде обыкновенного дифференциального уравнения (Fiala, 2010):

$$P_{kn} C_{kn} \frac{\partial T_{kn}}{\partial t} = Q_{kn}^M + Q_{kn}^K \pm Q_{kn}^B \pm Q_{kn}^C \pm Q_{kn}^R - Q_{kn}^E - Q_{kn}^{Sk} + Q_{kn}, \quad (2)$$

где $Q_{kn}^M = F(\rho_{O_2})$ – количество тепла, образуемое за счет метаболических процессов;

$Q_{kn}^K = S_{kn} \lambda_{kn} (T_{kn} - T_t)$ – количество тепла, рассеиваемое за счет теплопроводности соседних слоев тканей;

$Q_{kn}^B = \rho_B C_B \omega_B (T_B - T_{kn})$ – количество тепла, определяемое конвективным переносом тепла кровотоком;

$Q_{kn}^C = S_{kn} h_{kn} (T_{kn} - T_a)$ и $Q_{kn}^R = S_{kn} \sigma \varepsilon_{kn} (T_{kn}^4 - T_a^4)$ – конвективный и радиационный теплообмен с окружающей средой;

$Q_{kn}^E = f(V, n, d)$ и $Q_{kn}^{Sk} = h_{kn}^E S_{kn} (P_{kn} - P_a)$ – определяются испарением с верхних дыхательных путей и с поверхности кожи;

Q_{kn} – количество тепла, определяемое переносом за счет других факторов (работы, активности и т. д.)

Здесь ρ_{kn} и C_{kn} – плотность и удельная теплоемкость слоя ткани, ρ_B , C_B , ω_B , T_B – плотность, удельная теплоемкость, объемная скорость кровотока и температура крови, T_{kn} – температура слоя ткани; S_{kn} – эффективная площадь поверхности рассматриваемого объема тканей; T_t – температура соседних слоев тканей; λ_{kn} – локальный коэффициент теплопроводности, $F(\rho_{O_2})$ – количество метаболического тепла, зависящее от концентрации кислорода в тканях, T_a – температура окружающей среды, h_{kn} – локальный коэффициент конвективного теплообмена, σ – постоянная Больцмана, ε_{kn} – коэффициент излучения поверхности тканей (порядка 0.88...0.92), h_{kn}^E – коэффициент теплоотдачи испарением, P_{kn} и P_a – давление паров воды, насыщенных при температуре ткани и окружающей среды, соответственно, $f(V, n, d)$ – функция, зависящая от частоты дыхания n , вентилируемого объема легких V , разницы влагосодержания вдыхаемого и выдыхаемого

воздуха d .

Другой класс моделей строится на применении дифференциального уравнения в частных производных с соответствующими граничными условиями (Yang, Ni and Weng, 2017). В одномерном приближении его можно представить как:

$$\rho_{kn} C_{kn} \frac{\partial T_{kn}}{\partial t} = \frac{1}{r^\omega} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^\omega \lambda_{kn} \frac{\partial T_{kn}}{\partial r} \right) + Q_{kn}^B + Q_{kn}^M, \quad (3)$$

где $\omega = 1$ для цилиндра, 2 – для сферы, $r = 1$ – радиус.

Единый подход к решению уравнений теплового баланса различного класса моделей

Как следует из анализа, приведенного выше, основными элементами математической модели теплового баланса являются уравнения теплового баланса (2) и (3). Для первого класса моделей (уравнение (2)) могут использоваться методы решения систем обыкновенных дифференциальных уравнений (Соколова, Кузнецов и Надёжная, 2016).

Как следует из идеи многокомпарментного подхода, каждый элемент тела человека представляет собой многослойный цилиндр или сферу. При этом обычно предполагается, что интенсивность теплообмена по осевой и угловой переменной мала по сравнению с теплообменом в радиальном направлении (Сулин, Рябова, Рубцов и Никитин, 2016). Поэтому рассмотрим уравнение (3) в виде уравнения теплопроводности с учетом зависимости только от радиальной переменной (Wissler, 1998). В силу осевой (сферической) симметрии граничное условие на оси (в центре сферы) представляет собой равенство нулю радиального потока, в тоже время для внешней поверхности цилиндра (сферы) справедливо граничное условие Ньютона (Zhao, Lian and Lai, 2021). Тогда постановка задачи в общем виде выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=0} &= 0 \\ \rho C_p(r) \frac{\partial T}{\partial t} &= \frac{1}{r^\omega} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^\omega \lambda(r) \frac{\partial T}{\partial r} \right) + Q(t, r, T), \quad (4) \\ -\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R} &= q_c + q_R + q_E = q(t, r, T) \Big|_{r=R}. \end{aligned}$$

Каждый слой рассматриваемого цилиндра (сферы) имеет собственные теплофизические характеристики, поэтому будем рассматривать уравнение теплопроводности как неоднородное уравнение с переменными коэффициентами. Решать данное уравнение будем с привлечением теории разностных схем (Чичиндаев, Дья-

ченко и Хромова, 2016]. С этой целью будем строить консервативную разностную схему с помощью интегро-интерполяционного метода [Самарский и Гулин, 1989]. Под консервативной понимается схема, для которой выполняются следующие условия:

а) дифференциальная задача есть математическая интерпретация закона сохранения (в нашем случае рассматриваемое уравнение теплопроводности есть интерпретация закона сохранения энергии, выраженной через тепловую энтальпию $h = \rho C_p T$);

б) соответствующий закон сохранения должен выполняться и для дискретизованного уравнения (на сеточном уровне).

Как правило, при записи законов сохранения рассматриваемым уравнениям в частных производных соответствует их дивергентная форма.

Для уравнения теплопроводности в сплошных средах (в нашем случае именно так) роль такого закона сохранения играет условие непрерывности теплового потока.

Запишем уравнение через тепловой поток:

$$U = -\lambda(r) \frac{\partial T}{\partial r}.$$

Тогда уравнение в дивергентной форме будет:

$$\frac{\partial r^\omega h}{\partial t} + \frac{\partial r^\omega U}{\partial r} = r^\omega Q(t, r, T).$$

Аппроксимацию уравнения произведем по прямоугольнику $\Delta t \Delta r_i$ с узловыми точками (n относится к слою по времени, i – слою по радиусу). Точка i соответствует центру слоя ткани, $i - 0.5$ относится к границе со слоем ближе к оси (центру) цилиндра (сферы), когда как $i + 0.5$ к границе с верхним слоем. Таким образом стоит задача записи баланса тепловых потоков для ячейки. Изменение температуры за промежуток времени ($\Delta t = t^{n+1} - t^n$) в центре ячейки (точка i) происходит за счет входящего теплового потока ($i - 0.5$) через нижнюю границу и выходящего через верхнюю границу ($i + 0.5$), а также объемного тепловыделения Q в ячейке размером Δr_i .

Смысл интегро-интерполяционного метода заключается в аппроксимации равенства интегралов с учетом баланса тепловых потоков:

$$\int_{t, r} \left(\frac{\partial r^\omega h(r)}{\partial t} + \frac{\partial r^\omega U}{\partial r} \right) dt dr = \int_{t, r} r^\omega Q(t, r, T) dt dr.$$

В дискретизованном виде равенство тепловых балансов обеспечивается равенством:

$$\rho_i C_i \frac{\partial T_i}{\partial t} + \frac{1}{r_i^\omega \Delta r_i} (r_{i+0.5}^\omega U_{i+0.5} - r_{i-0.5}^\omega U_{i-0.5}) = Q_i(t_n, r_i, T_i).$$

Фактически здесь учтена форма реальной ячейки цилиндра (сферы) через относительный объем $r_i^\omega \Delta r_i$.

Здесь осредненные за интервал времени тепловые потоки, прошедшие через границы ячейки:

$$r_{i+0.5}^\omega U_{i+0.5} = -\frac{1}{2} K_{i+0.5} ((T_{i+1}^n - T_i^n) + (T_{i+1}^{n+1} - T_i^{n+1})),$$

$$r_{i-0.5}^\omega U_{i-0.5} = -\frac{1}{2} K_{i-0.5} ((T_i^n - T_{i-1}^n) + (T_i^{n+1} - T_{i-1}^{n+1})).$$

Расстояние между центрами соседних ячеек:

$$r_{i-0.5} = r_i - 0.5 \Delta r_i, \quad r_{i+0.5} = r_i + 0.5 \Delta r_i,$$

где r_i расстояние от оси цилиндра (центра сферы) до центра ячейки.

Значения плотности и теплоемкости, а также объемного тепловыделения рассчитываются для центра ячейки, в то время как расчет потоков через границы ячеек требует задания неким образом коэффициентов теплопроводности на границах. Зададим его через суммарное тепловое сопротивление половинок соседних ячеек как:

а) для цилиндра:

$$r_{i+0.5} = \frac{\lambda_i \lambda_{i+1} [L=1, i]}{\lambda_i \ln \left(\frac{r_{i+1}}{r_{i+0.5}} \right) + \lambda_{i+1} \ln \left(\frac{r_{i+0.5}}{r_i} \right)},$$

$$r_{i-0.5} = \frac{\lambda_i \lambda_{i-1} [L=1, i]}{\lambda_{i-1} \ln \left(\frac{r_i}{r_{i-0.5}} \right) + \lambda_i \ln \left(\frac{r_{i-0.5}}{r_{i-1}} \right)},$$

б) для сферы:

$$K_{i+0.5} = \frac{\lambda_i \lambda_{i+1}}{\lambda_{i+1} \left(\frac{1}{r_i} - \frac{1}{r_{i+0.5}} \right) + \lambda_i \left(\frac{1}{r_{i+0.5}} - \frac{1}{r_{i+1}} \right)},$$

$$K_{i-0.5} = \frac{\lambda_i \lambda_{i-1}}{\lambda_{i-1} \left(\frac{1}{r_{i-1}} - \frac{1}{r_{i-0.5}} \right) + \lambda_i \left(\frac{1}{r_{i-0.5}} - \frac{1}{r_i} \right)}.$$

Учитывая определения, уравнение в конечных разностях будет выглядеть:

$$\rho_i C_i \frac{\partial T_i}{\partial t} = \frac{0.5}{r_i^\omega \Delta r_i} [K_{i+0.5} T_{i+1}^{n+1} - (K_{i+0.5} + K_{i-0.5}) T_i^{n+1} + K_{i-0.5} T_{i-1}^{n+1}] + \frac{0.5}{r_i^\omega \Delta r_i} [K_{i+0.5} T_{i+1}^n - (K_{i+0.5} + K_{i-0.5}) T_i^n + K_{i-0.5} T_{i-1}^n] + Q_i^n(t_n, r_i, T_i). \quad [5]$$

Применение интегро-интерполяционного метода (Самарский и Гулин, 1989) к граничным условиям системы (4) позволяет получить для граничных ячеек аппроксимации, по виду аналогичные соотношению (5). Таким образом, при сравнении вида уравнений (2) и (5) предполагается, что для их решения могут быть использованы идентичные методы решения систем обыкновенных дифференциальных уравнений.

Заключение

Проведен анализ существующих подходов учета сложного протекания теплофизических процессов в системе «человек – защитная одежда – окружающая среда». Сложное протекания вызвано наличием как тепловых, так и аэродинамических воздействий окружающей среды (температура и влажность воздуха, скорость ветра, атмосферные осадки и т. д.), тепловлагосопrotivления одежды, а также тепловых потоков и потоков влаги к поверхности тела человека за счет функционирования внутренней терморегуляции. Проблема заключается в том, что эти процессы необходимо моделировать взаи-

мосвязанным образом.

В результате проведенной работы предложен метод построения модели тепловлагодпереноса в системе «человек – защитная одежда – окружающая среда», который базируется на многокомпарментном подходе. Данный подход позволяет учесть в модели метаболизм организма человека с одной стороны и тепломассоперенос в текстильных материалах с другой. При этом тело человека представляется набором $N \times K$ элементов со специальным компарментом, связанным с системой кровообращения, а также компарментом одежды со своими L слоями. Таким образом, физико-математическая модель теплового баланса может быть сформулирована с включением как минимум $N \times K + 1 + L$ уравнений теплопереноса и уравнения для переноса влаги. Модель позволяет производить моделирование тепло и влагопереноса в системе «человек – одежда – окружающая среда» с учетом внутреннего состояния тела человека и компармента защитной одежды.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- Колесников, П.А. (1965). *Теплозащитные свойства одежды*, Москва, Легкая индустрия, Российская Федерация.
- Марков, В.В., Тришин, В.Э. и Яковенко, М.В. (2021). Моделирование теплозащитных свойств одежды и физиологического состояния человека в одежде, *XXXIV Всероссийская научно-техническая конференция студентов, молодых ученых и специалистов*, С. 177–180.
- Покровский, В.М. и Коротыко Г.Ф. (2003). *Физиология человека*, Москва, Медицина, Российская Федерация.
- Самарский, А.А. и Гулин, А.В. (1989), *Численные методы*, Москва, Наука, Российская Федерация.
- Соколова, А.С., Кузнецов, А.А. и Надёжная, Н.Л. (2016). Метод оценки теплозащитных свойств материалов одежды и их пакетов, *Вестник Витебского государственного технологического университета*, № 2 (31), С. 24–31.
- Сулин, А.Б., Рябова, Т.В., Рубцов, А.К. и Никитин, А.А. (2016). *Индексы теплового комфорта*, Санкт-Петербург, Университет ИТМО, Российская Федерация.
- Чичиндаев, А.В. и Хромова, И.В. (2018). *Теплообмен в системе «человек – окружающая среда» в условиях низких температур*, Новосибирск, Изд-во НГТУ, Российская Федерация.
- Чичиндаев, А.В., Дьяченко, Ю.В. и Хромова, И.В. (2016). Влияние внутренних источников тепла на процессы теплообмена в системе «человек – тепловая защита – окружающая среда», *Доклады Академии Наук Высшей Школы Российской Федерации*, № 1 (30), С. 108–115.
- Fiala, D. (2010). Physiological modeling for technical clinical and research applications, *Journal of Frontiers in Bioscience-Scholar*, Vol. 2, № 3, pp. 939–968.
- Parsons, K. (2002). *Human Thermal Environments: The effects of hot, moderate, and cold environments on human health, comfort and performance*, London, CRC Press, 560 p.
- Tang, Y., He, Y., Shao, H. and Ji, C. (2016). Assessment of comfortable clothing thermal resistance using a multi-scale human thermoregulatory model, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, № 98, pp. 568–583.

Wissler, E.H. (1998). Pennes' 1948 paper revisited, *Journal of Applied Physiology*, Vol. 85, № 1, pp. 35–41.

Yang, J., Ni, S. and Weng, W. (2017). Modelling heat transfer and physiological responses of unclothed human body in hot environment by coupling CFD simulation with thermal model, *International Journal of Thermal Sciences*, № 120, pp. 437–445.

Zhao, Q., Lian, Z. and Lai, D. (2021). Thermal comfort models and their developments: A review, *Energy and built environment*, Vol. 2, № 1, pp. 21–33.

REFERENCES

Kolesnikov, P.A. (1965). *Thermal protective properties of clothing* [Теплозащитные свойства одежды], Moscow, Light industry, Russian Federation (in Russian).

Markov, V.V., Trishin, V. Je. and Jakovenko, M.V. (2021). Modeling the heat-protective properties of clothing and the physiological state of a person in clothing [Modelirovanie teplozashhitnyh svoystv odezhdy i fiziologicheskogo sostojanija cheloveka v odezhde], *XXXIV All-Russian Scientific and Technical Conference of Students, Young Scientists and Specialists*, pp. 177–180 (in Russian).

Pokrovskij, V.M. and Korot'ko G.F. (2003). *Fiziologija cheloveka* [Human physiology], Moscow, Medicine, Russian Federation (in Russian).

Samarskij, A.A. and Gulin, A.V. (1989). *Chislennye metody* [Numerical methods], Moscow, The science, Russian Federation (in Russian).

Sokolova, A.S., Kuznecov, A.A. and Nadjozhnaja, N.L. (2016). Method for assessing the heat-protective properties of clothing materials and their packages [Metod ocenki teplozashhitnyh svoystv materialov odezhdy i ih paketov], *Vestnik Vitebskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta = Vestnik of Vitebsk State Technological University*, № 2 (31), pp. 24–31 (in Russian).

Sulin, A.B., Rjabova, T.V., Rubcov, A.K. and Nikitin, A.A. (2016). *Indeksy teplovogo komforta* [Thermal comfort indices], Saint Petersburg, University of ITMO, Russian Federation (in Russian).

Chichindaev, A.V. and Hromova, I.V. (2018). *Heat exchange in the «man – environment» system at low temperatures* [Теплообмен в системе «человек – окружающая среда» в условиях низких температур], Novosibirsk, Publishing house of NSTU, Russian Federation (in Russian).

Chichindaev, A.V., D'jachenko, Ju.V. and Hromova, I.V. (2016). The influence of internal heat sources on heat exchange processes in the system «man – thermal protection – environment» [Vlijanie vnutrennih istochnikov tepla na processy teploobmena v sisteme «человек – тепловая защита – окружающая среда»], *Doklady Akademii Nauk Vysshej SHkoly Rossijskoj Federacii = Reports of the Academy of Sciences of the Higher School of the Russian Federation*, № 1 (30), pp. 108–115 (in Russian).

Fiala, D. (2010). Physiological modeling for technical clinical and research applications, *Journal of Frontiers in Bioscience-Scholar*, Vol. 2, № 3, pp. 939–968.

Parsons, K. (2002). *Human Thermal Environments: The effects of hot, moderate, and cold environments on human health, comfort and performance*, London, CRC Press, 560 p.

Tang, Y., He, Y., Shao, H. and Ji, C. (2016). Assessment of comfortable clothing thermal resistance using a multi-scale human thermoregulatory model, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, № 98, pp. 568–583.

Wissler, E.H. (1998). Pennes' 1948 paper revisited, *Journal of Applied Physiology*, Vol. 85, № 1, pp. 35–41.

Yang, J., Ni, S. and Weng, W. (2017). Modelling heat transfer and physiological responses of unclothed human body in hot environment by coupling CFD simulation with thermal model, *International Journal of Thermal Sciences*, № 120, pp. 437–445.

Zhao, Q., Lian, Z. and Lai, D. (2021). Thermal comfort models and their developments: A review, *Energy and built environment*, Vol. 2, № 1, pp. 21–33.

Информация об авторах

Information about the authors

Игнатъев Сергей Александрович

Аспирант кафедры «Теплоэнергетика», Витебский государственный технологический университет, Республика Беларусь. E-mail: Ignatyevsergey85@yandex.ru

Ольшанский Валерий Иосифович

Кандидат технических наук, профессор кафедры «Теплоэнергетика», Витебский государственный технологический университет, Республика Беларусь.

Sergey A. Ignatyev

Postgraduate Student of the Department "Thermal Power Engineering", Vitebsk State Technological University, Republic of Belarus. E-mail: Ignatyevsergey85@yandex.ru

Valery I. Alshanski

Candidate of Science (in Engineering), Professor of the Department "Thermal Power Engineering", Vitebsk State Technological University, Republic of Belarus.