



3. Моделирование тепловых процессов в системе «человек – окружающая среда»

Терморегуляция организма человека осуществляется эфферентным механизмом системы термостабилизации четырьмя способами (механизмами): биохимическим, физическим, гемодинамическим и поведенческим. *Химическая терморегуляция*: происходит за счет изменения интенсивности окислительных процессов, обуславливающих образование тепла внутри организма. *Физическая терморегуляция*: основывается на изменении интенсивности теплообмена с внешней средой (процессы теплоотдачи и излучения, включение и выключение механизма потоотделения, изменение характеристик дыхательной деятельности). *Гемодинамическая терморегуляция*: производится за счет изменения интенсивности кровообращения, заключается в регулировании количества тепла, переносимого кровью между «ядром» и «оболочкой». *Поведенческая терморегуляция*: инстинктивные или целенаправленные поведенческие реакции, направленные на приспособление к условиям среды.

В настоящей главе представлена методика расчета системы термостабилизации человека, включающая в себя описание пассивного и активного звеньев. К пассивному относятся исполнительные механизмы системы терморегуляции: химический (внутренние тепловыделения), гемодинамический (конвективный перенос тепла с током крови) и физический (конвективный и радиационный теплообмен). К активному звену относятся процессы, происходящие в центральной нервной системе, которые возникают вследствие воздействия температурного стресса на организм и управляют исполнительными механизмами системы термостабилизации с целью компенсировать негативное воздействие. В работе влияние центральной нервной системы моделируется не напрямую, а через качественные и количественные оценки реакций исполнительных механизмов на охлаждение.

3.1. Моделирование тепловых процессов в системе термостабилизации

С точки зрения теплофизики система термостабилизации человека представляет собой систему многослойных элементов с переменными теплофизическими свойствами, наличием внутренних источников тепла и конвективного переноса тепла вдоль слоев и между элементами. Описанные выше механизмы и особенности работы системы термостабилизации человека в классической теории теплообмена находятся на стыке двух направлений: нестационарной теплопроводности многослойных элементов с наличием и отсутствием внутренних источников тепла и теории конвективного теплообмена. Предлагаемые в этих направлениях методы

моделирования и расчетов имеют сложные аналитические решения для тел простой формы с изотропными теплофизическими свойствами. Приближенные методы имеют более широкие возможности, но пренебрегают первым режимом (начальной стадией) охлаждения. Применение данных методик не позволяет адекватно описать совокупность теплогидравлических процессов в системе термостабилизации человека. В настоящей главе предложена методика расчета, которая учитывает вышеперечисленные процессы, проходящие в системе термостабилизации человека, переменность теплофизических свойств и геометрию отдельных элементов, а также начальную стадию охлаждения.

Описание расчетного элемента

В качестве расчетного элемента выбирается участок длиной dl (рис. 3.1.), представляющий собой трехслойную цилиндрическую стенку, в каждом слое которой наблюдается разное сочетание теплообменных процессов.

Внешний слой малой толщины $\delta_{СТР} = r_{\text{кап_СТР}} - r_{\text{ткани}}$ («оболочка») является слоем активной теплоизоляции и участвует в процессе теплоотдачи с окружающей средой за счет радиационной $q_{\text{рад}}$ и конвективной $q_{\text{конв}}$ составляющих. По длине слоя происходит конвективный перенос тепла теплоносителем $q_{\text{кр}}^{СТР}$. Внутренние тепловыделения отсутствуют.

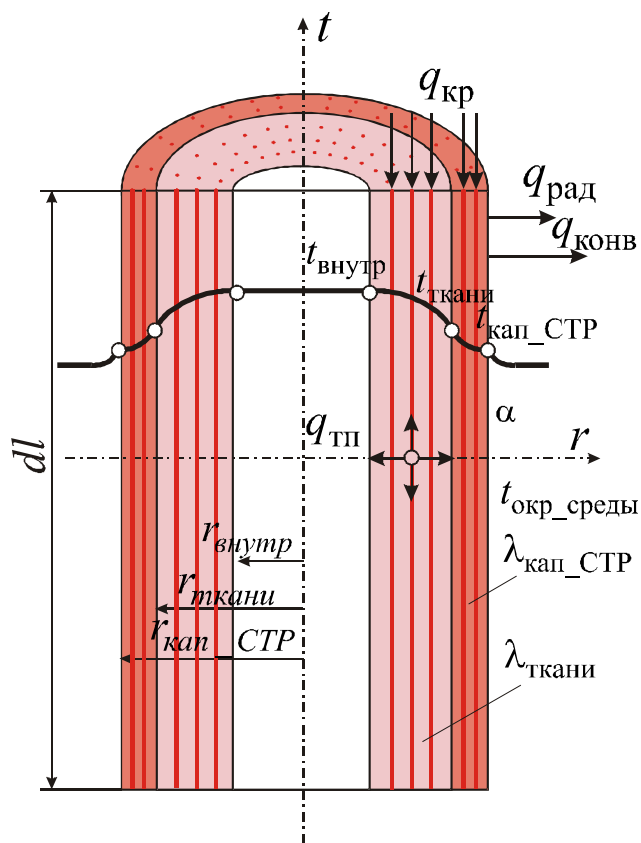




Рис. 3.1. Расчетный элемент системы термостабилизации: расчетный элемент системы термостабилизации: $q_{кр}$ – конвективный тепловой поток с током крови; $q_{тп}$ – внутренние источники тепла; $q_{рад}$ – радиационный тепловой поток; $t_{внутр}$ – температура внутренней поверхности; $t_{ткани}$ – температура внутреннего слоя (ткани); $t_{кап_СТР}$ – температура слоя теплоизоляции (подкожные капилляры СТС); $t_{окр_среды}$ – температура окружающей среды; $\lambda_{кап_СТР}$ – эквивалентный коэффициент теплопроводности слоя теплоизоляции; $\lambda_{ткани}$ – эквивалентный коэффициент теплопроводности внутреннего слоя; α – коэффициент теплоотдачи

В среднем слое «ядра» толщиной $\delta_{ткани} = r_{ткани} - r_{внутр}$ по длине слоя происходит конвективный перенос тепла теплоносителем $q_{кр}^{ткани}$ и присутствуют объемные внутренние источники тепла $q_{ин}$. Теплоотдача «ядра» в окружающую среду зависит от состояния и параметров слоя теплоизоляции.

Внутренний слой «ядра» радиусом $r_{внутр}$ не имеет теплообмена с окружающей средой. В простейшем случае – кость – служит тепловой емкостью. В более сложном – внутренние органы – имеет внутренние источники тепла $q_{мет}$ и конвективный перенос тепла $q_{кр}^{внутр}$.



Дифференциальные уравнения теплообмена

Тепловые процессы называются нестационарными, если протекают в условиях, когда температурное поле меняется во времени, т.е. является функцией времени. Если тело внесено в среду с более низкой температурой: сразу же между средой и телом возникает процесс теплообмена, и тело начинает остывать. Сначала остывают поверхностные слои, но постепенно процесс охлаждения распространяется и вглубь тела. По истечении некоторого времени (теоретически бесконечно большого) температура всех частей тела выравнивается и становится равной температуре окружающей среды, т.е. наступает тепловое равновесие. При нагреве жидких или газообразных тел в общем случае неизбежно возникает конвекция, которая способствует выравниванию температуры. В этих случаях можно говорить об изменении во времени средней температуры жидкости [58, 88].

Так как теплоотдача в общем случае определяется не только тепловыми, но и гидродинамическими явлениями, то совокупность этих явлений описывается системой дифференциальных уравнений, в которую входят уравнение теплопроводности, уравнение движения, уравнение сплошности и условия однозначности.

Общее уравнение теплопроводности. Решить задачу нестационарной теплопроводности – это значит найти зависимости изменения температуры и количества переданной теплоты во времени для любой точки тела. Такие зависимости могут быть получены путем решения дифференциального уравнения теплопроводности с наличием внутренних источников теплоты (3.1).

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{q_v}{c_p \rho}. \quad (3.1)$$

Условия однозначности задаются в виде физических параметров: коэффициент температуропроводности a ($a = \lambda/c_p \rho$), коэффициент теплопроводности λ , теплоемкость c_p , плотность ρ ; форма и геометрические размеры объектов l_i, r_{ij} ; температуры тела в начальный момент времени $\tau=0$

$$T = T_0 = f(x, y, z).$$

Мощность внутренних источников тепла:

$$q_v = q_v(\tau, x, y, z).$$

Граничные условия могут быть заданы в виде граничных условий третьего рода:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial n} \right) \Big|_{\Gamma} = -\frac{\alpha}{\lambda} (T \Big|_{\Gamma} - T_{\text{окр.ср}}). \quad (3.2)$$

Дифференциальное уравнение теплопроводности (3.1) совместно с граничными условиями (3.2) дает законченную математическую формулировку рассматриваемой задачи. Решение ее заключается в отыскании функции

$$T = f(x, y, z, \tau, \alpha, a, \lambda, T_0, T_{\text{окр.ср}}, l_i, r_{ij})$$



для расчетного элемента, которая удовлетворяла бы уравнению (3.1) и условиям (3.2).

Уравнения движения. В движущейся жидкости температурное поле зависит от распределения скоростей. Последнее в общем случае описывается дифференциальным уравнением движения несжимаемой вязкой жидкости – уравнением Навье-Стокса – вывод которого основан на втором законе Ньютона. Ниже представлено уравнение для проекции на ось X :

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial \omega_x}{\partial \tau} + \rho \left(\omega_x \frac{\partial \omega_x}{\partial x} + \omega_y \frac{\partial \omega_x}{\partial y} + \omega_z \frac{\partial \omega_x}{\partial z} \right) = \\ = \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 \omega_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \omega_x}{\partial z^2} \right) \end{aligned} \quad (3.3)$$

Аналогично записываются уравнения и для проекций на оси y и z .

Уравнение сплошности. Чтобы получить замкнутую систему уравнений теплообмена, необходимо к описанным выше уравнениям присоединить уравнение сплошности, которое выводится на основе сохранения массы.

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \frac{\partial(\rho \omega_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \omega_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \omega_z)}{\partial z} = 0 \quad (3.4)$$

Чтобы ограничить задачу и определить рассматриваемый процесс однозначно, к системе дифференциальных уравнений необходимо присоединить математическое описание всех частных особенностей, которые называются *условиями однозначности*. Когда условия однозначности для какого-либо конкретного случая заданы, то они вместе с системой дифференциальных уравнений составляют математическое описание данного процесса и дают возможность получить его полное описание.

К настоящему времени аналитические решения системы дифференциальных уравнений конвективного теплообмена получены лишь для ограниченного числа простейших задач при введении тех или иных упрощающих допущений. Такое положение объясняется большой сложностью уравнений, а также сложностью и многогранностью содержания самих процессов.

В настоящей работе предложена методика расчета теплообмена системы многослойных элементов с учетом конвективного переноса тепла с током теплоносителя на начальной стадии и в регулярном режиме охлаждения.

Система уравнений теплообмена для расчетного элемента

Система уравнений теплопроводности. Для решения настоящей задачи целесообразно перейти от декартовой к цилиндрической системе координат. Запишем в общем виде уравнение теплопроводности с наличием внутренних источников тепла:

$$c_j \rho_j \frac{\partial T_j}{\partial \tau} = \lambda_j \left(\frac{\partial^2 T_j}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_j}{\partial r} \right) + \lambda_j \frac{\partial^2 T_j}{\partial z^2} + q_v. \quad (3.5)$$

В предложенной методике расчета принимаются следующие допущения. Перенос теплоты теплопроводностью в радиальном направлении много больше, чем в осевом, поэтому членом $\lambda_j \frac{\partial^2 T_j}{\partial z^2}$ можно пренебречь.

Ввиду малых размеров капилляров теплообмен между теплоносителем и расчетными элементами (тканями) протекает до полного теплового равновесия. Исходя из этого, тепло, переносимое вдоль слоев расчетных элементов с током теплоносителя, можно рассматривать как объемные внутренние источники тепла переменной мощности, что существенно облегчает задачу и в тоже время адекватно описывает процесс. Исходя из принятых допущений в рамках предложенной методики, система нестационарных одномерных дифференциальных уравнений теплопроводности для исследуемой задачи имеет следующий вид.

Внешний слой (слой теплоизоляции)

Толщина слоя теплоизоляции $\delta_{СТР} \ll r_{\text{кап_СТР}}$, поэтому для расчета теплопроводности в слое можно использовать уравнение теплопроводности для плоской стенки.

$$0 < \tau < \tau_{\text{max}}, r_{\text{ткани}} < r < r_{\text{кап_СТР}}, 0 < z < l_i:$$

$$c_1 \rho_1 \frac{\partial T_1}{\partial \tau} = \lambda_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial r^2} + q_{\text{кр}}^{\text{СТР}}. \quad (3.6)$$

Средний слой «ядра»

$$0 < \tau < \tau_{\text{max}}, r_{\text{внутр}} < r < r_{\text{ткани}}, 0 < z < l_i:$$

$$c_2 \rho_2 \frac{\partial T_2}{\partial \tau} = \lambda_2 \left(\frac{\partial^2 T_2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_2}{\partial r} \right) + q_{\text{mn}} + q_{\text{кр}}^{\text{мышцы}}. \quad (3.7)$$

Внутренний слой «ядра»

$$0 < \tau < \tau_{\text{max}}, 0 < r < r_{\text{внутр}}, 0 < z < l_i:$$

$$c_3 \rho_3 \frac{\partial T_3}{\partial \tau} = \lambda_3 \left(\frac{\partial^2 T_3}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_3}{\partial r} \right) + q_{\text{мет}} + q_{\text{кр}}^{\text{внутр}}. \quad (3.8)$$

Граничные условия для системы (3.6) – (3.8) записываются в виде:

- 1) $r = 0, 0 < z < l: -\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial r} = \eta_{\text{мет}} q_{\text{мет}}; q_{\text{мет}}(1 - \eta_{\text{мет}}) = q_{\text{кр}}^{\text{внутр}};$
- 2) $r = r_{\text{внутр}}, 0 < z < l: -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} = -\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial r}, T_2 = T_3 = T_{\text{внутр}}; \quad (3.9)$



$$3) r = r_{\text{ткани}}, 0 < z < l: -\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} = -\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r}, T_1 = T_2 = T_{\text{ткани}};$$

$$4) r = r_{\text{кап_СТР}}, 0 < z < l: T_1 = T_{\text{кап_СТР}},$$

$$-\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} = \varepsilon_n c_o \left[\left(\frac{T_{\text{кап_СТР}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{окр_сп}}}{100} \right)^4 \right] +$$

$$+ \alpha (T_{\text{кап_СТР}} - T_{\text{окр_среды}}) + q_{\text{кр}}^{\text{СТР}}$$

5) коэффициент теплоотдачи:

для свободной конвекции

$$Nu_{\text{двс}} = C (Gr_{\text{двс}} Pr_{\text{жс}})^m (Pr_{\text{жс}} / Pr_c)^{0,25},$$

где $Nu = \frac{\alpha d}{\lambda}$, d – характерный размер, коэффициенты C и m зависят от соотношения $Gr_{\text{двс}} Pr_{\text{жс}}$;

для вынужденной конвекции

$$Nu_{\text{двс}} = C Re_{\text{двс}}^m Pr_{\text{жс}}^{0,38} (Pr_{\text{жс}} / Pr_c)^{0,25},$$

где коэффициенты C и m зависят от числа Рейнольдса.

Начальные условия для системы (3.6) – (3.8) при $\tau = 0$:

$$t_1 = t_2 = t_3 = 36,7 \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (3.10)$$

Система уравнений движения. В системе термостабилизации кровеносная система выполняет функцию распределения теплоносителя (крови) между расчетными элементами и слоями, в которых в зависимости от параметров внешней среды и режимов работы производится нагрев либо охлаждение теплоносителя. Вторая группа тепловых процессов в теплоносителе происходит в результате смешения теплоносителей разной температуры на выходе из расчетных элементов. Эти процессы отражают суть гемодинамического механизма системы термостабилизации. Таким образом, на процесс теплообмена существенное влияние оказывают гидравлические характеристики контура теплоносителя. Для их описания в настоящей работе разработана модель расчета совместной работы системы термостабилизации и кровеносной системы, подробно описанная во второй главе.

Расчет гидравлических характеристик позволяет учитывать начальную стадию охлаждения, характерной особенностью которой является распространение температурных возмущений в пространстве и захват новых слоев тела. С другой стороны, расчет расходов теплоносителя для каждого расчетного элемента и слоя позволяет учитывать количество тепла, которое передается от «ядра» к «оболочке» и, наоборот, в зависимости от температуры окружающей среды и мощности внутренних тепловыделений.

Количество тепла, которое переносит теплоноситель, напрямую зависит от его расхода на соответствующий расчетный элемент. Т.к. размеры капилляра очень малы, а их количество в каждом расчетном элементе очень большое, то зависимостью температурного поля от распределения скоростей можно пренебречь. Таким образом, систему дифференциальных уравнений

Навье-Стокса (3.3) можно заменить на систему уравнений Бернулли (2.10) – (2.17):

$$P_a = \xi(\text{var})_i \frac{\rho V_i^2}{2} + \zeta(\text{var})_i \frac{\rho W_i^2}{2} + k(\text{var})_{ij} G_{ij} + P_{ei} + \rho g h_i + \Delta P_{\text{уски}} + \Delta P_{\text{компи}}$$

и систему для расчета расходов теплоносителя на расчетные элементы (2.18) – (2.24) в каждый текущий момент времени:

$$k_{ij} G_{ij} + \xi_i \rho \frac{V_i^2}{2} + \zeta_i \frac{\rho W_i^2}{2} + \Delta P_i = 0.$$

Уравнения связи. Чтобы связать систему уравнений теплопроводности и систему расчета гидравлических характеристик, записаны уравнения связи, которые описывают внутренние источники тепла и количество тепла, переносимое с током теплоносителя (крови).

Внутренние источники тепла учитываются следующим образом.

Объемные тепловыделения среднего слоя:

$$q_{\text{тп}ij} = \frac{\rho_{ij}}{m_{ij}} \left(\frac{N}{\eta_{\text{тп}}} - N \right), \quad (3.11)$$

где i – номер расчетного элемента, j – номер расчетного слоя: 1 – слой теплоизоляции, 2 – средний слой «ядра», 3 – внутренний слой «ядра», ρ_{ij} – средняя плотность слоя, m_{ij} – масса слоя, N – внешняя механическая работа, $\eta_{\text{тп}}$ – термический КПД (характеризует, какую энергию нужно затратить, чтобы выполнить внешнюю работу $\eta_{\text{др}} \approx 0,3$).

Объемные тепловыделения внутреннего слоя:

$$q_{\text{мет}ij} = \frac{\rho_{ij}}{m_{ij}} (\eta G^{O_2} q_{k=1\dots3}), \quad (3.12)$$

где ρ_{ij} – средняя плотность слоя, m_{ij} – масса слоя, η – термический КПД преобразования энергии химической связи в тепловую энергию, G^{O_2} – потребляемая внутренними органами масса окислителя (кислорода), q_k – удельное количество тепла, выделяемое в окислительных процессах для $k = 1$ – углеводов, 2 – жиров, 3 – белков.

Конвективный перенос тепла теплоносителем:

$$q_{\text{кр}ij} = \frac{\rho_{ij}}{m_{ij}} G_{\text{кр}ij} C_{P_{\text{кр}}} (t_{\text{входа}ij} - t_{\text{выхода}ij}), \quad (3.13)$$

где $G_{\text{кр}ij}$ – объемный расход теплоносителя через расчетный элемент и слой, $C_{P_{\text{кр}}}$ – теплоемкость теплоносителя, $t_{\text{входа}ij}$, $t_{\text{выхода}ij}$ – температуры теплоносителя на входе и выходе из расчетного элемента и слоя.

Для поставленной задачи получение аналитического решения системы уравнений (3.6) – (3.8) затруднительно. Существует много различных приближенных методов расчета задач о теплопроводности, которые приводят к удовлетворительным для инженерной практики результатам. В настоящей работе применяется приближенный метод элементарных балансов А.П.

Ваничева [22]. Этот метод основан на допущении возможности замены непрерывного процесса скачкообразным как во времени, так и в пространстве. В итоге система уравнений для расчетного элемента система уравнений заменяется на конечно-разностную и принимает следующий вид.

$$\left\{ \begin{array}{l} c_{i3} \rho_{i3} \frac{\Delta T_{i3}}{\Delta \tau} = \pm q_{мет_{i3}} \pm q_{кр_i}^{внутр} \\ c_{i2} \rho_{i2} \frac{\Delta T_{i2}}{\Delta \tau} = \pm q_{тн_{i2}} \pm q_{кр_i}^{мышцы} \\ c_{i1} \rho_{i1} \frac{\Delta T_{i1}}{\Delta \tau} = \pm q_{рад_{i1}} \pm q_{конв_{i1}} \pm q_{кр_{i1}}^{СТР} \end{array} \right. \quad (3.14)$$

Расчетный элемент разбивается на ряд элементарных геометрических объемов, в пределах которых закон изменения температуры принят линейным. Расчетными точками являются места пересечения плоскостей разбивки. Для выбранного участка принимаются следующее допущение: в каждый текущий момент времени процесс теплообмена с окружающей средой является стационарным. Процесс распространения теплоты определяется значениями эффективного коэффициента теплопроводности, удельной теплоемкости и плотности. Плотность и удельная теплоемкость в пределах элемента изменяется незначительно и считается постоянной. Эффективный коэффициент теплопроводности принимается линейной функцией температуры.

Таким образом, математическое описание расчетного элемента модели системы термостабилизации представляет собой систему обыкновенных дифференциальных уравнений теплопроводности (3.14), с граничными (3.9) и начальными (3.10) условиями, систему уравнений для расчета гидравлических характеристик (2.10) – (2.24) и алгебраические уравнения связи (3.11) – (3.13).

3.2. Алгоритм расчета системы уравнений

Рассмотрим последовательность расчета на одном интервале времени Δt на примере расчетного элемента, представляющего собой двухслойную цилиндрическую стенку (рука). Тогда система уравнений (3.14) имеет следующий вид:

Рука ($i = 2$)
 $j = 1$ – слой подкожных капилляров СТС



$$c_{21}\rho_{21} \frac{\Delta T_{21}}{\Delta \tau} = \pm \frac{\rho_{21}}{m_{21}} (\alpha F_{21} (T_{\text{кап_СТР}} - T_{\text{окр_среда}}) \pm \pm \varepsilon_{\text{п}} c_o F_{21} \left[\left(\frac{T_{\text{кап_СТР}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{окр_среды}}}{100} \right)^4 \right] \pm G_{\text{кр}21} C_{P_{\text{кр}}} (T_{\text{входа}21} - T_{\text{выхода}21})) ;$$

(3.15)

$j = 2$ – слой мышц

$$c_{22}\rho_{22} \frac{\Delta T_{22}}{\Delta \tau} = \pm \frac{\rho_{22}}{m_{22}} \left(\left(\frac{N}{\eta_{mn}} - N \right) \pm G_{\text{кр}i22} C_{P_{\text{кр}}} (T_{\text{входа}22} - T_{\text{выхода}22}) \right).$$

Алгоритм решения состоит из трех шагов. На первом определяются тепловые потоки для всех расчетных слоев. На втором – значения среднемассовых температур слоев и температура теплоносителя на выходе из расчетного элемента. На третьем шаге теплового расчета по найденным тепловым потерям производится оценка температур на границах слоев расчетного элемента.

Расчет тепловых потоков для расчетных элементов

Тепловые потоки в слоях расчетного элемента делятся на три вида: тепловые потери с поверхности слоев (конвекция и радиация), внутренние источники тепла (телопродукция) и конвективный перенос тепла теплоносителем. Каждый из перечисленных видов соответствует одному из исполнительных механизмов системы термостабилизации человека.

Задание диапазонов мощности внутренних источников тепла $q_{\text{внутр}}$, в частности величины тепловыделений в среднем слое $q_{\text{тп}}$ и внутреннем слое $q_{\text{мет}}$ моделирует *химический* механизм работы СТС. *Физический* механизм моделируется путем расчета процессов теплоотдачи и излучения с поверхности расчетных элементов и тепломассообмена в легких. Начальную стадию охлаждения и процесс конвективного переноса тепла с током теплоносителя $q_{\text{кр}}$ характеризует *гемодинамический* механизм. Расход теплоносителя на входе в расчетный элемент получен из гидравлического расчета.

Химический механизм

Внутренние источники тепла:

$$q_{\text{внутр}_{ij}} = \begin{cases} q_{\text{тп}_{ij}} = \frac{\rho_{ij}}{m_{ij}} \left(\frac{N}{\eta_{mn}} - N \right) - \text{теповыделения в среднем слое,} \\ q_{\text{мет}_{ij}} = \frac{\rho_{ij}}{m_{ij}} (\eta G^{O_2} q_{k=1\dots3}) - \text{теповыделения} \\ \text{внутреннего слоя.} \end{cases} \quad (3.16)$$

Физический механизм

Конвективный теплообмен:

$$Q_{\text{конв}_{ij}} = \alpha F_{ij} (t_{\text{кап_СТР}} - t_{\text{окр_среда}}). \quad (3.17)$$

Радиационный теплообмен:

$$Q_{\text{рад}_{ij}} = \varepsilon_n c_o F_{ij} \left[\left(\frac{T_{\text{кап_СТР}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{окр_среды}}}{100} \right)^4 \right]. \quad (3.18)$$

Гемодинамический механизм

Конвективный теплообмен с током теплоносителя:

$$q_{\text{кр}_{ij}} = \frac{\rho_{ij}}{m_{ij}} G_{\text{кр}_{ij}} C_{P_{\text{кр}}} (t_{\text{входа}_{ij}} - t_{\text{выхода}_{ij}}). \quad (3.19)$$

3.2.2. Расчет среднемассовых температур

Среднемассовые температуры слоев определяются исходя из системы уравнений (3.15) по следующему алгоритму. Для каждого слоя ($j = 1\dots2$)

расчетного элемента (в данном случае $i = 2$) рассчитывается уменьшение среднемассовой температуры ΔT_{2j} на интервале времени $\Delta \tau$:

$$\Delta T_{21}^L = \frac{Q_{\text{конв}21}^L + Q_{\text{рад}21}^L + Q_{\text{кр}21}^L}{c_{21} m_{21} / \Delta \tau + G_{\text{кр}21} c_{\text{кр}}}; \quad (3.20)$$

$$\Delta T_{22}^L = \frac{Q_{\text{конв}22}^L + Q_{\text{рад}22}^L + Q_{\text{кр}22}^L + Q_{\text{тн}22}^L}{c_{22} m_{22} / \Delta \tau + G_{\text{кр}22} c_{\text{кр}}},$$

где L – номер расчетного интервала времени.

Тогда среднемассовые температуры слоев определяются выражениями:

$$T_{21}^L = T_{21}^{L-1} + \Delta T_{21}^L; \quad T_{22}^L = T_{22}^{L-1} + \Delta T_{22}^L. \quad (3.21)$$

Исходя из предположения о равенстве среднемассовой температуры слоя и выходной температуры теплоносителя, протекающей вдоль слоя (теплообменник бесконечной площади) принимаем $T_{ij}^L = T_{\text{вых}ij}^L$.

Средняя температура теплоносителя на выходе расчетного элемента определяется из полученных значений среднемассовых температур и пропорционально расходам теплоносителя G_{ij} вдоль слоя:

$$T_{\text{вых}2}^L = \frac{(T_{\text{вых}21}^L G_{\text{кр}21} + T_{\text{вых}22}^L G_{\text{кр}22})}{G_{\text{кр}21} + G_{\text{кр}22}}. \quad (3.22)$$

Значение расхода G берется из гидравлического расчета. Выходные температуры на шаге L принимаются в качестве входных для следующего шага $L+1$ (следующий интервал времени). В начальный момент времени входная температура для всех тканей равна $36,7$ °С (нормальная температура тела).

Расчет температур на границах слоев расчетных элементов

На третьем шаге теплового расчета по известным тепловым потерям определяются температуры на границах слоев расчетных элементов. Расчет в каждый текущий момент времени осуществляется по известным аналитическим решениям для однородной пластины (слой теплоизоляции), цилиндрической стенки (средний слой «ядра») и шаровой стенки (слой теплоизоляции первого элемента (голова)), полученным для стационарных условий [58].

Теплопроводность цилиндрической стенки. Рассмотрим бесконечно длинную цилиндрическую стенку (трубу) с внутренним радиусом $r_{\text{внутр}}$, наружным $r_{\text{ткани}}$ и постоянным коэффициентом теплопроводности λ . Внутри этой стенки имеются равномерно распределенные источники теплоты q_v (рис. 3.2). В такой стенке температура будет изменяться только в направлении радиуса, и процесс теплопроводности будет описываться уравнением (3.5) для стационарных условий:

$$\frac{d^2 t}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dt}{dr} + \frac{q_v}{\lambda} = 0. \quad (3.23)$$

Интеграл этого уравнения представлен выражением:

$$t = -\frac{q_v r^2}{4\lambda} + C_1 \ln r + C_2. \quad (3.24)$$

Постоянные интегрирования C_1 и C_2 в последнем уравнении определяются из граничных условий.

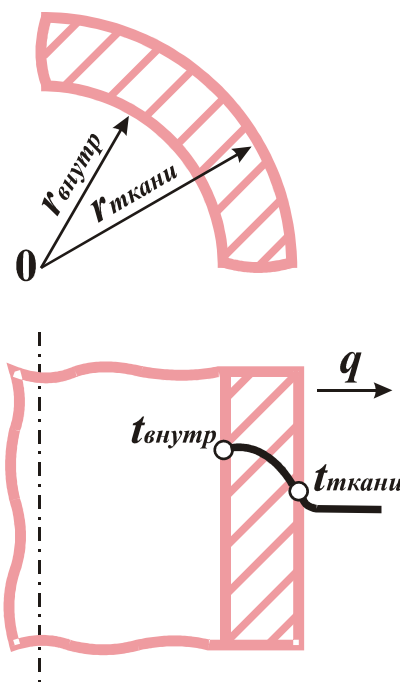


Рис. 3.2. Теплопроводность цилиндрической стенки при наличии внутренних источников теплоты с отводом теплоты через наружную поверхность

Т.к. теплота отводится только через наружную поверхность цилиндра и заданы граничные условия третьего рода (температура окружающей среды со стороны наружной поверхности $t_{окр_среды}$ и постоянный коэффициент теплоотдачи на внешней поверхности элемента), то граничные условия имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \text{при } r = r_{\text{внутр}} \quad q=0 \text{ или } \left(\frac{dt}{dr} \right)_{r=r_{\text{внутр}}} &= 0; \\ \text{при } r=r_{\text{ткани}} \quad \left(\frac{dt}{dr} \right)_{r=r_{\text{ткани}}} &= -\frac{\alpha}{\lambda} (t_{\text{внутр}} - t_{\text{окр_среды}}). \end{aligned} \quad (3.25)$$

В частном случае, при охлаждении в воде, зададим граничные условия первого рода ($\alpha \rightarrow \infty$), т.е. температура теплоотдающей поверхности будет равна температуре окружающей среды.

$$t_{\text{ткани}} = t_{\text{окр_среды}}. \quad (3.26)$$

Решая уравнение (3.23) с граничными условиями (3.25) и (3.26) находим падение температуры на стенке:

$$t_{\text{внутр}_i} - t_{\text{ткани}_i} = \frac{q_{v_i} r_{\text{внутр}_i}^2}{4\lambda_{\text{ткани}_i}} \left[\left(\frac{r_{\text{ткани}_i}}{r_{\text{внутр}_i}} \right)^2 - 2 \ln \frac{r_{\text{ткани}_i}}{r_{\text{внутр}_i}} - 1 \right]. \quad (3.27)$$



Рассмотрим случай, когда внутренние источники тепла в цилиндрической стенке отсутствуют и найдем распределение температур в цилиндрической стенке и тепловой поток через нее. В этом случае уравнение (3.23) примет вид:

$$\frac{d^2 t}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dt}{dr} = 0. \quad (3.28)$$

Граничные условия:

при $r = r_{\text{внутр}}$ $t = t_{\text{внутр}}$;

при $r = r_{\text{ткани}}$ $t = t_{\text{ткани}}$.

(3.29)

Решая уравнение (3.28) совместно с граничными условиями (3.29) получим следующее выражение:

$$t = C_1 \ln r - C_2. \quad (3.30)$$

Определив C_1 и C_2 из граничных условий и подставив их в уравнение (3.30) получим выражение для распределения температур:

$$t = t_{\text{внутр}} - (t_{\text{внутр}} - t_{\text{ткани}}) \frac{\ln \frac{r}{r_{\text{внутр}}}}{\ln \frac{r_{\text{ткани}}}{r_{\text{внутр}}}}. \quad (3.31)$$

Для нахождения количества теплоты, проходящего через цилиндрическую поверхность площадью F в единицу времени, можно воспользоваться законом Фурье:

$$Q = -\lambda \frac{dt}{dr} F.$$

Если в это выражение подставить значение градиента температуры, то получим:

$$Q = \frac{2\pi\lambda l (t_{\text{внутр}} - t_{\text{ткани}})}{\ln \frac{d_2}{d_1}}. \quad (3.32)$$

Запишем тепловой поток (3.32) через единицу наружной поверхности:

$$\frac{Q}{l} = q_l = \frac{\pi (t_{\text{внутр}} - t_{\text{ткани}})}{2\lambda \ln \frac{d_2}{d_1}}.$$

Тогда распределение температур выглядит следующим образом:

$$(t_{\text{внутр}} - t_{\text{ткани}}) = \frac{q_l}{2\pi\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1}. \quad (3.33)$$

Под тепловым потоком через единицу наружной поверхности q_l в настоящей задаче подразумевается сумма конвективной (3.15) и радиационной (3.16) составляющих теплового потока.

Для нахождения распределения температур в слое расчетного элемента СТС с учетом конвективной, радиационной составляющей и внутренними источниками тепла используется принцип аддитивности. Исходя из этого, фактическое распределение температур определяется суммой выражений (3.27) и (3.33) и выглядит следующим образом:

$$t_{\text{внутр}_i} - t_{\text{ткани}_i} = \frac{q_{v_i} r_{\text{внутр}_i}^2}{4\lambda_{\text{ткани}_i}} \left[\left(\frac{r_{\text{ткани}_i}}{r_{\text{внутр}_i}} \right)^2 - 2 \ln \frac{r_{\text{ткани}_i}}{r_{\text{внутр}_i}} - 1 \right] + \frac{q_i}{2\pi\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1} \quad (3.34)$$

Теплопроводность однородной шаровой стенки. Рассмотрим полый шар с внутренним радиусом $r_{\text{внутр}}$ и внешним $r_{\text{ткани}}$ (рис. 3.5). Стенка шара состоит из однородного материала, коэффициент теплопроводности λ которого постоянен. В такой стенке температура будет изменяться только в направлении радиуса, и процесс теплопроводности будет описываться уравнением теплопроводности в сферических координатах для стационарных условий:

$$\frac{d^2 t}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{dt}{dr} = 0. \quad (3.35)$$

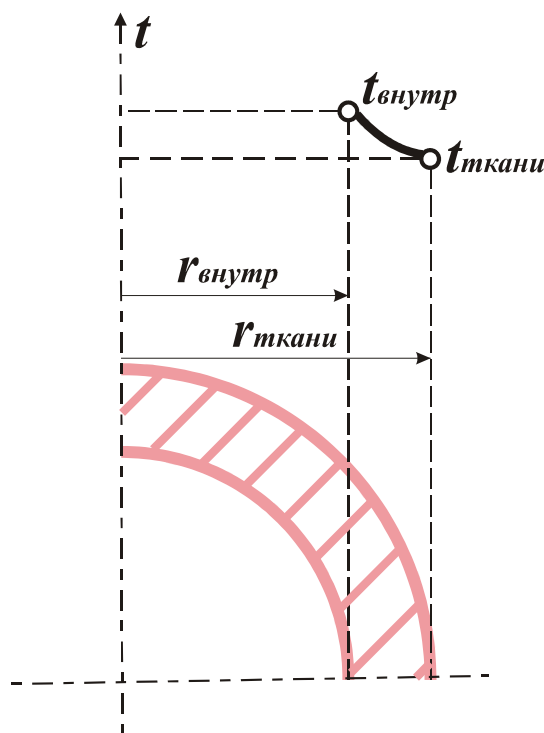


Рис. 3.3. Теплопроводность однородной шаровой стенки

Зададим равномерно распределенные температуры поверхностей $t_{\text{внутр}}$ и $t_{\text{ткани}}$. Тогда граничные условия имеют вид:

$$\begin{aligned} \text{при } r = r_{\text{внутр}} \quad t &= t_{\text{внутр}}; \\ \text{при } r = r_{\text{ткани}} \quad t &= t_{\text{ткани}}. \end{aligned} \quad (3.36)$$

После второго интегрирования получаем:

$$t = C_2 - \frac{C_1}{r}. \quad (3.37)$$

Определяя постоянные интегрирования из граничных условий и подставляя значения C_1 и C_2 в уравнение (3.37) получаем выражение для температурного поля в шаровой стенке:

$$t = t_{\text{внутр}} - \frac{t_{\text{внутр}} - t_{\text{ткани}}}{\left(\frac{1}{r_{\text{внутр}}} - \frac{1}{r_{\text{ткани}}}\right)} \left(\frac{1}{r_{\text{внутр}}} - \frac{1}{r}\right). \quad (3.38)$$

Для нахождения количества теплоты, проходящего через шаровую поверхность площадью F в единицу времени, можно воспользоваться законом Фурье:

$$Q = -\lambda \frac{dt}{dr} F = -\lambda \cdot 4\pi r^2 \frac{dt}{dr}.$$

Если в это выражение подставить значение градиента температуры dt/dr , то получим:

$$Q = \frac{4\pi\lambda(t_{\text{внутр}} - t_{\text{ткани}})}{\left(\frac{1}{r_{\text{внутр}}} - \frac{1}{r_{\text{ткани}}}\right)} = 4\pi\lambda \frac{r_{\text{внутр}} r_{\text{ткани}}}{\delta} \Delta t. \quad (3.39)$$

Таким образом, падение температуры на стенке определяется по формуле:

$$t_{\text{внутр}} - t_{\text{ткани}} = \frac{Q_{\text{сумм}} \delta_{\text{ткани}}}{4\pi\lambda_{\text{ткани}} r_{\text{внутр}} r_{\text{ткани}}}. \quad (3.40)$$

Теплопроводность плоской стенки. Рассмотрим случай, когда при передаче теплоты через однородную и изотропную стенку на одной ее поверхности заданы граничные условия второго рода в виде $q_L = \text{const}$ ($x = 0$); на другой поверхности заданы коэффициент теплоотдачи α и температура окружающей среды $t_{\text{окр_среды}}$, т.е. граничные условия третьего рода (рис. 3.4). Внутренние источники в стенке отсутствуют ($q_v = 0$).

Дифференциальное уравнение теплопроводности для рассматриваемого случая запишется в виде:

$$\frac{d^2 t}{dx^2} = 0. \quad (3.41)$$

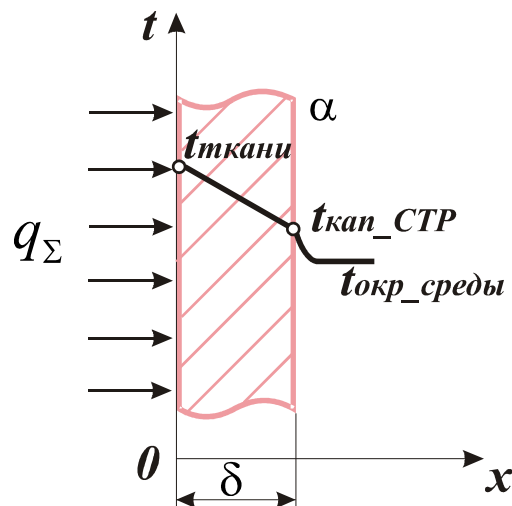


Рис. 3.4. Передача теплоты через плоскую стенку (смешанные граничные условия).

Задача сводится к нахождению распределения температуры в стенке и температур на ее поверхности. В силу стационарности теплового режима можно записать следующие уравнения:

$$q_L = (t_{\text{ткани}} - t_{\text{кап_СТР}}) \frac{\lambda}{\delta}; \quad (3.42)$$

$$q_L = \alpha(t_{\text{кап_СТР}} - t_{\text{окр_среды}}).$$

Из уравнения (3.42) следует, что при заданном значении q_L :

$$\begin{aligned} t_{\text{кап_СТР}} &= t_{\text{окр_среды}} + q_L \frac{1}{\alpha}; \\ t_{\text{ткани}} &= t_{\text{окр_среды}} + q_L \left(\frac{1}{\alpha} + \frac{\delta}{\lambda} \right); \\ t_{\text{ткани}} - t_{\text{кап_СТР}} &= q_L \frac{\delta}{\lambda}. \end{aligned} \quad (3.43)$$

С другой стороны, предлагаемая методика расчета СТС предполагает наличие в слое теплоизоляции внутренних источников тепла. Для такой задачи перепад температур рассчитывается по следующей формуле:

$$t_{\text{ткани}} - t_{\text{кап_СТР}} = \frac{q_v}{2\lambda} \delta^2. \quad (3.44)$$

Исходя из принципа аддитивности, фактическое распределение температур определяется суммой выражений (3.43) и (3.44) и выглядит следующим образом:

$$t_{\text{ткани}} - t_{\text{кап_СТР}} = q_L \frac{\delta}{\lambda} + q_v \frac{\delta^2}{2\lambda}. \quad (3.45)$$

3.3. Методика расчета тепловых процессов в системе «человек – окружающая среда»

Согласно предложенной схеме совместной работы системы термостабилизации и кровеносной системы (рис. 2.2) моделирование тепловых процессов в системе «человек – окружающая среда» состоит из двух этапов: гидравлического и теплового. *Гидравлический расчет* предназначен для определения расходов теплоносителя на расчетные элементы и слои в зависимости от внешних физических факторов, геометрических и гидравлических характеристик контура теплоносителя. *Тепловой расчет* служит для определения тепловых потерь расчетных элементов при охлаждении, с учетом внутренних тепловыделений и конвективного переноса тепла теплоносителем.

Расчетная схема системы термостабилизации и исходные данные



Исходя из предложенной схемы совместной работы СТС и КС и методики расчета тепловых процессов в расчетном элементе, разработана общая схема моделирования системы термостабилизации (рис. 3.5). Она представляет собой систему, состоящую из восьми расчетных элементов разной геометрической формы с различным количеством слоев. Расчетные элементы условно делятся на три вида.

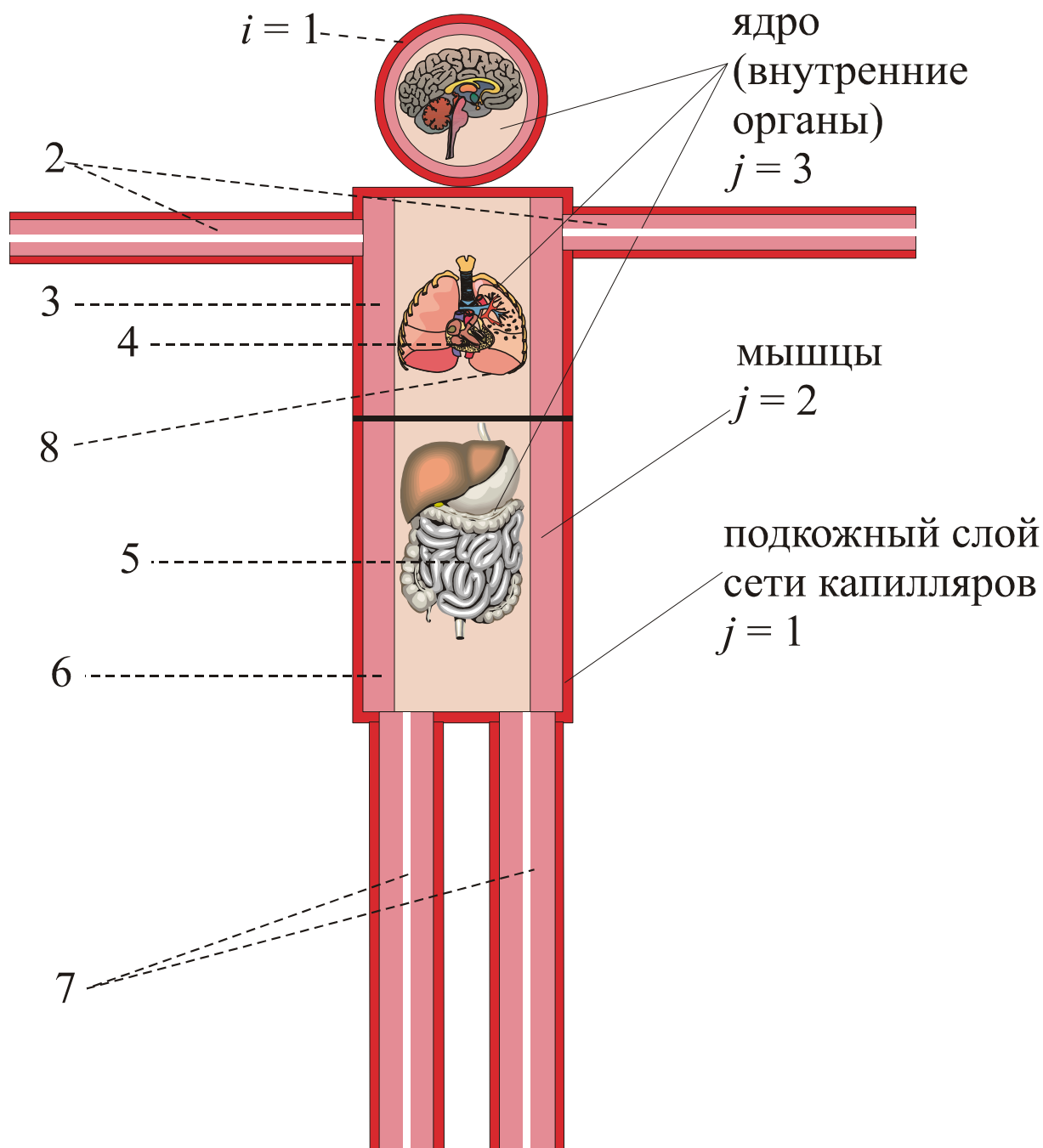
Первый вид – трехслойный цилиндр (расчетные элементы № 3, 4, 8 и № 5, 6). Фактически это верхняя и нижняя части туловища. Состоит из внутреннего слоя «ядра» (внутренние органы, легкие, сердце), среднего слоя «ядра» (мышечной ткани) и слоя теплоизоляции (подкожных капилляров СТС).

Второй вид – двухслойный цилиндр (расчетные элементы № 2 и № 7). В отличие от трехслойного цилиндра не имеют внутреннего слоя «ядра». Вместо внутреннего слоя – тепловая емкость (кость), которая характеризуется постоянными теплофизическими свойствами, отсутствием конвективного переноса тепла по длине слоя теплоносителем, а так же внутренних источников тепла ($q_{кр} = 0$, $q_{мет} = 0$).

Третий вид – трехслойная шаровая стенка (расчетный элемент № 1). Отличается от первого вида формой (шаровая стенка). Средний слой «ядра» малой толщины в расчетах не учитывается.

Условная тепло-гидравлическая схема (рис. 3.6) учитывает пространственное расположение и вид расчетных элементов, а так же схему деления и ответвлений гидравлической системы.

Геометрическими условиями однозначности для расчета являются геометрические размеры, масса и площади поверхности элементов и слоев, а также расход теплоносителя через них. **Физические условия** – это теплофизические свойства отдельных элементов и слоев и параметры окружающей среды (табл. П.2.1, табл. П.2.3 ... П.2.8, рис. П.2.1).



i - номер расчетного элемента:

1 - голова, 2 - руки, 3 - мышцы грудной клетки, 4 - сердце,
5 - внутренние органы, 6 - мышцы нижней части туловища,
7 - ноги, 8 - легкие

Рис. 3.5. Расчетная схема системы термостабилизации человека

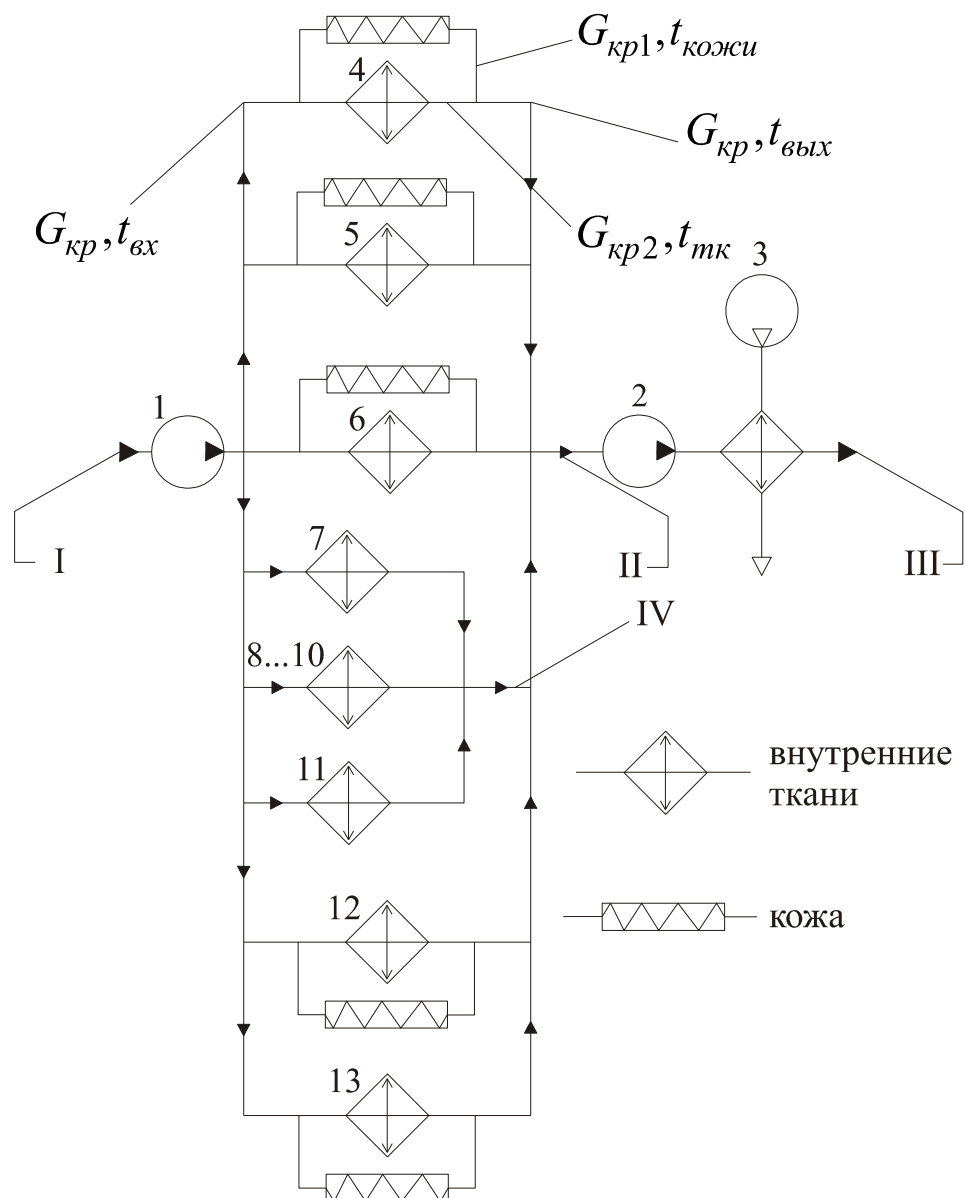


Рис. 3.6. Условная тепло-гидравлическая схема системы термостабилизации человека: *I* – вход теплоносителя в первый контур; *II* – выход теплоносителя из первого контура; *III* – выход из второго контура; *IV* – выход теплоносителя из внутреннего слоя ядра; 1, 2 – насос (сердце); расчетные элементы: 3 – легкие; 4 – голова; 5 – руки; 6 – мышцы грудной клетки; 7 – мышцы миокарда; 8...10 – органы пищеварения; 11 – почки; 12 – мышцы нижней половины туловища; 13 – ноги

Система уравнений теплопроводности

Система уравнений теплопроводности для расчета СТС составлена для двух контуров (большого и малого кругов кровообращения (рис. 2.2)) и включает в себя восемь подсистем, записанных для каждого расчетного элемента (рис. 3.1) аналогично системе обыкновенных дифференциальных уравнений (3.14) в зависимости от количества расчетных слоев (рис. 3.5).

Система уравнений (3.46) решается по следующему алгоритму. В начальный момент времени задается исходное распределение температур, и далее рассчитываются текущие значения температур в заданном диапазоне времени (рис. 3.7). При этом расчетное время охлаждения разбивается на интервалы $\Delta t = 1 \dots 4$ с. На каждом интервале последовательно определяются тепловые потоки для каждого расчетного слоя и элемента в целом. Далее для элементов БКК определяется изменение среднемассовой температуры слоев ΔT на интервале времени Δt , а также средняя температура всего расчетного элемента. На основании этого определяется средняя температура теплоносителя на выходе из БКК. Далее по аналогичному алгоритму выполняется расчет МКК. Выходные значения среднемассовых температур принимаются в качестве входных для расчета на следующем интервале времени Δt .

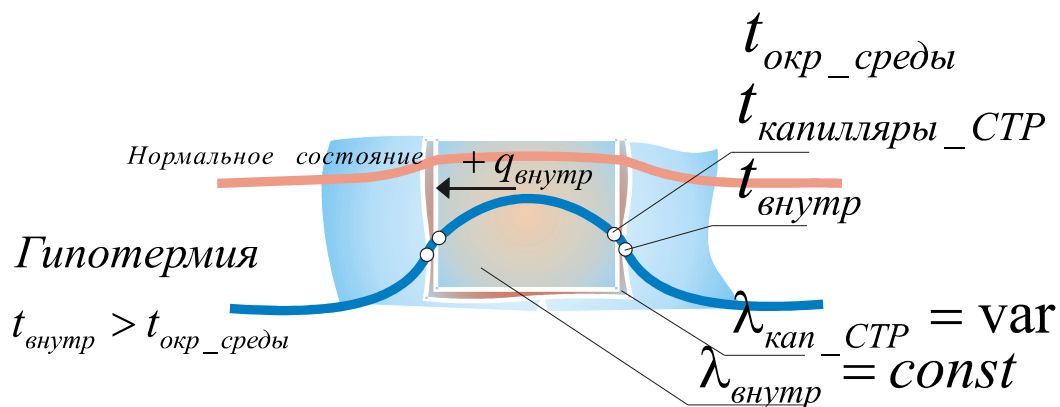


Рис. 3.7. Распределения температур расчетного элемента во времени при гипотермии

БОЛЬШОЙ КРУГ КРОВООБРАЩЕНИЯ (БКК)

Голова ($i = 1$)

$$c_{11}\rho_{11} \frac{\Delta T_{11}}{\Delta \tau} = \pm q_{\text{кон}_{11}} \pm q_{\text{рад}_{11}} \pm q_{\text{кр}_{11}} - \text{подкожный слой капилляров } (j = 1)$$

$$c_{12}\rho_{12} \frac{\Delta T_{12}}{\Delta \tau} = \pm q_{\text{mn}_{12}} \pm q_{\text{кр}_{12}} - \text{мышцы } (j = 2)$$

$$c_{13}\rho_{13} \frac{\Delta T_{13}}{\Delta \tau} = q_{\text{кр}_{13}} - \text{ядро (головной мозг)} (j = 3)$$

Руки ($i = 2$)

$$c_{21}\rho_{21} \frac{\Delta T_{21}}{\Delta \tau} = \pm q_{\text{кон}_{21}} \pm q_{\text{рад}_{21}} \pm q_{\text{кр}_{21}} - (j = 1)$$

$$c_{22}\rho_{22} \frac{\Delta T_{22}}{\Delta \tau} = \pm q_{\text{mn}_{22}} \pm q_{\text{кр}_{22}} - (j = 2)$$

Грудная клетка ($i = 3$)

$$c_{31}\rho_{31} \frac{\Delta T_{31}}{\Delta \tau} = \pm q_{\text{кон}_{31}} \pm q_{\text{рад}_{31}} \pm q_{\text{кр}_{31}} - (j = 1)$$

$$c_{32}\rho_{32} \frac{\Delta T_{32}}{\Delta \tau} = \pm q_{\text{mn}_{32}} \pm q_{\text{кр}_{32}} - (j = 2)$$

Внутренние органы ($i = 5$)

$$c_{53}\rho_{53} \frac{\Delta T_{53}}{\Delta \tau} = \pm q_{\text{мет}_{53}} \pm q_{\text{кр}_{53}} - \text{ядро (внутренние органы)} (j = 3) \quad (3.46)$$

Низ туловища ($i = 6$)

$$c_{61}\rho_{61} \frac{\Delta T_{61}}{\Delta \tau} = \pm q_{\text{кон}_{61}} \pm q_{\text{рад}_{61}} \pm q_{\text{кр}_{61}} - (j = 1)$$

$$c_{62}\rho_{62} \frac{\Delta T_{62}}{\Delta \tau} = \pm q_{\text{mn}_{62}} \pm q_{\text{кр}_{62}} - (j = 2)$$

Ноги ($i = 7$)

$$c_{71}\rho_{71} \frac{\Delta T_{71}}{\Delta \tau} = \pm q_{\text{кон}_{71}} \pm q_{\text{рад}_{71}} \pm q_{\text{кр}_{71}} - (j = 1)$$

$$c_{72}\rho_{72} \frac{\Delta T_{72}}{\Delta \tau} = \pm q_{\text{mn}_{72}} \pm q_{\text{кр}_{72}} - (j = 2)$$

Сердце ($i = 4$) - средняя температура БКК + МКК

$$c_{42}\rho_{42} \frac{\Delta T_{42}}{\Delta \tau} = \pm q_{\text{mn}_{42}} \pm q_{\text{кр}_{42}} - (j = 2)$$

МАЛЫЙ КРУГ КРОВООБРАЩЕНИЯ (МКК)

Легкие ($i = 8$)

$$c_{83}\rho_{83} \frac{\Delta T_{83}}{\Delta \tau} = \pm q_{\text{кон}_{83}} \pm q_{\text{кр}_{83}} - \text{ядро (легкие)} (j = 3)$$

Блок-схема программы расчета

Блок-схема программы расчета состоит из пяти шагов (рис 3.8).

Первый шаг – ввод исходных данных: задание граничных условий, определение параметров расчетных элементов (геометрических размеров,



весовых и массовых долей, которые являются морфологическими особенностями организма, связанными с полом и возрастом).

Второй шаг – задание цикла по времени. Исходя из поставленной задачи, выбирается период времени охлаждения. Далее задаются расчетные интервалы времени $\Delta\tau$ от 1 до 10 и общее количество шагов (номеров расчетных интервалов) $L = 1000$.

Третий шаг – расчет большого круга кровообращения. Согласно описанному выше алгоритму осуществляется последовательный расчет: тепловых потерь и тепловых притоков для слоев и элементов; среднемассовых температур слоев и средней температуры теплоносителя на выходе из расчетных элементов; температур на границе слоев расчетных элементов. После этого определяется средняя температура теплоносителя на выходе БКК.

Четвертый шаг – расчет малого круга кровообращения. Аналогично БКК производится расчет теплового баланса легких и определяется температура теплоносителя на выходе МКК.

Пятый шаг – расчет исследуемых теплофизических параметров и вывод результатов.

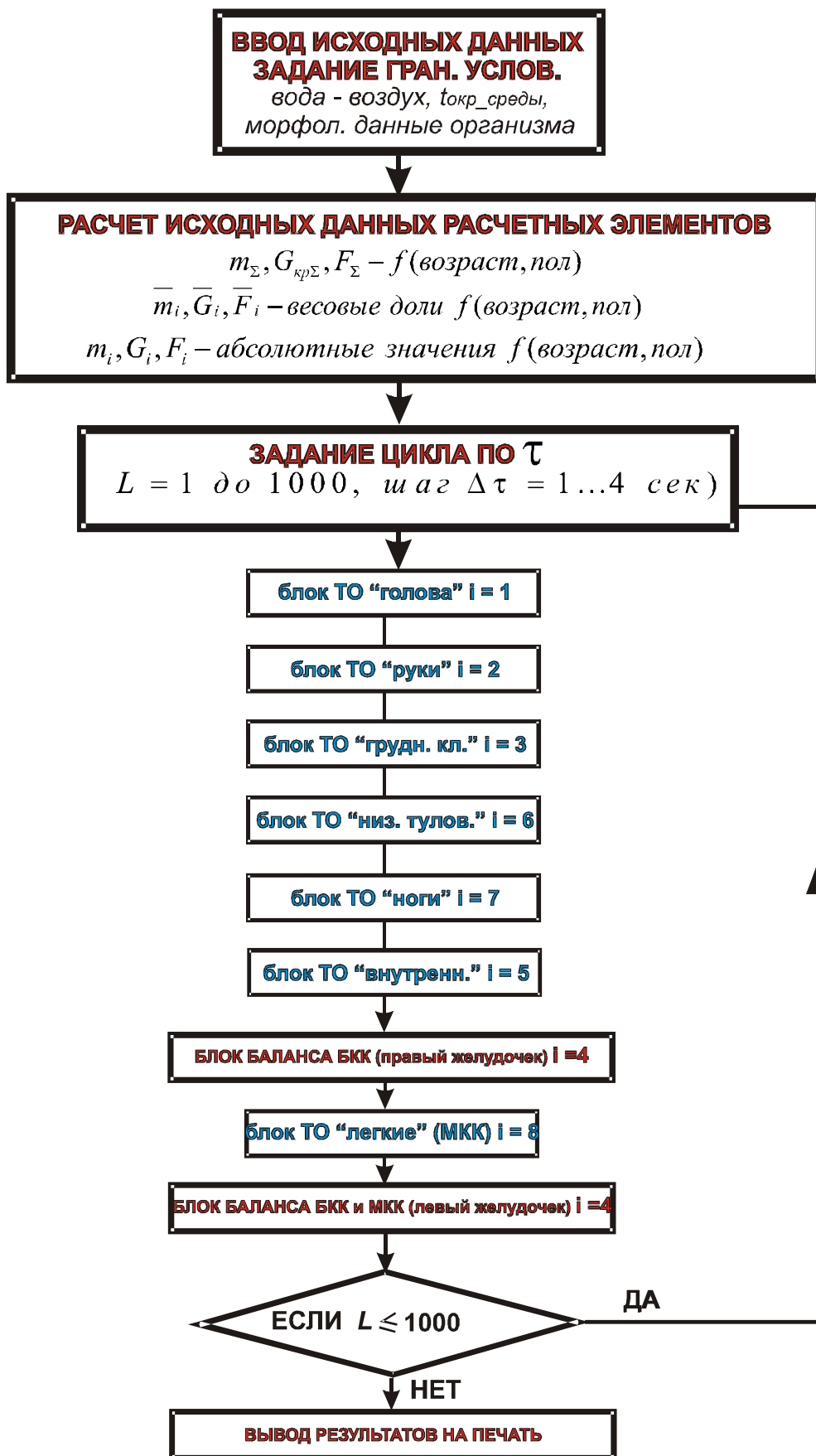


Рис. 3.8. Блок-схема программы расчета CTC

3.4. Характеристика полученных результатов

Суммарные тепловые потери тканей (Q_i , Вт). Представлены для задачи охлаждения мужчины 20 лет, помещенного в воду без защитного костюма (рис. 3.9). Температура воды $t_{\text{воды}} = 0 \text{ }^\circ\text{C}$. По оси X отложено расчетное время (2 часа), по оси Y – суммарные тепловые потери тканей. В результате расчета наблюдаются две фазы охлаждения. Первая фаза – это сброс температуры слоя теплоизоляции, за счет механизма конвективного переноса тепла теплоносителем (работы гемодинамического механизма). Происходит резкий отток теплоносителя из «оболочки» в «ядро». Вторая фаза – постепенное остывание «ядра».

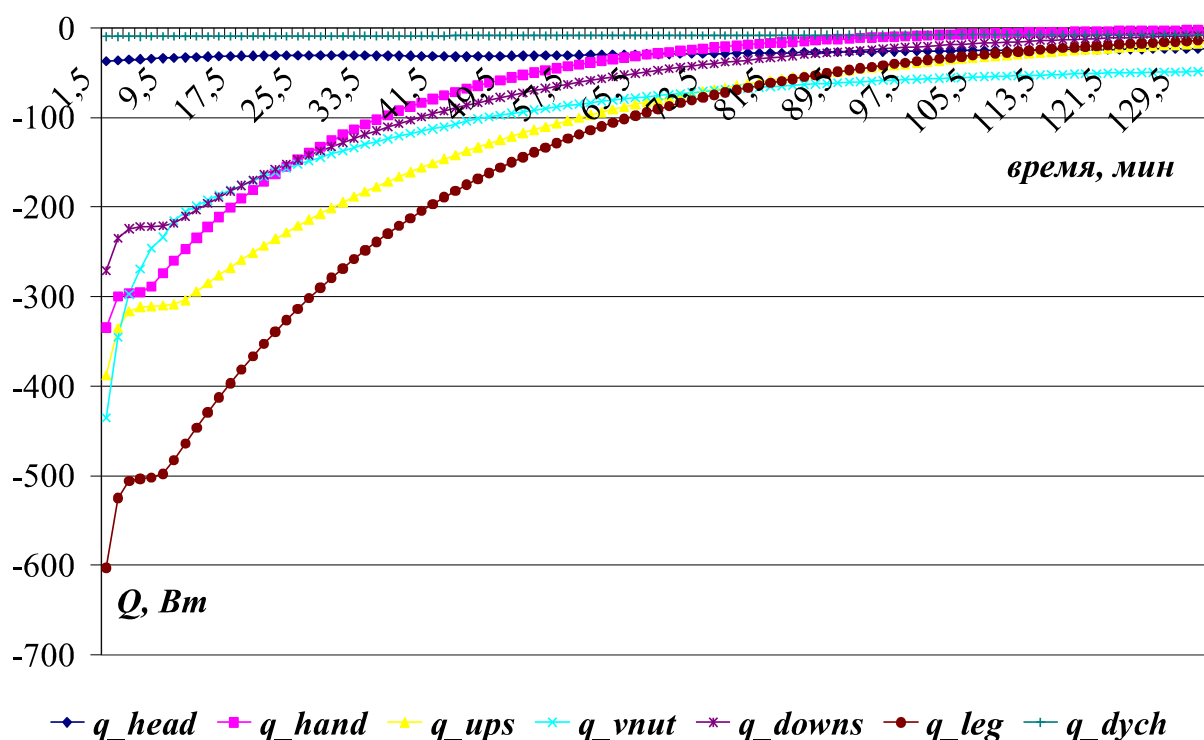


Рис. 3.9. Теплотери тканей (Q_i , Вт) при охлаждении в воде при температуре $t_{\text{воды}} = 0 \text{ }^\circ\text{C}$: 1 – голова (head), 2 – руки (hand), 3 – грудь (ups), 4 – внутренности (vnut), 5 – живот (down), 6 – ноги (leg), 7 – легкие (dysh).

Работа химического и физического механизма направлена на замедление процесса остывания «ядра». Установлено что, самый большой градиент изменения суммарного теплового потока, соответственно самое быстрое остывание, наблюдается при охлаждении среднего слоя «ядра» (руки, ноги, мышцы верхней и нижней части туловища). Наименьшие теплотери у внутреннего слоя «ядра» (внутренности, легкие).

Относительные значения тепловых потоков. Для иллюстрации вкладов теплотерь каждого элемента в общие теплотери а рассчитаны

относительные значения тепловых потоков тканей Q_i/Q_Σ % на интервале времени 1 час (рис. 3.10).

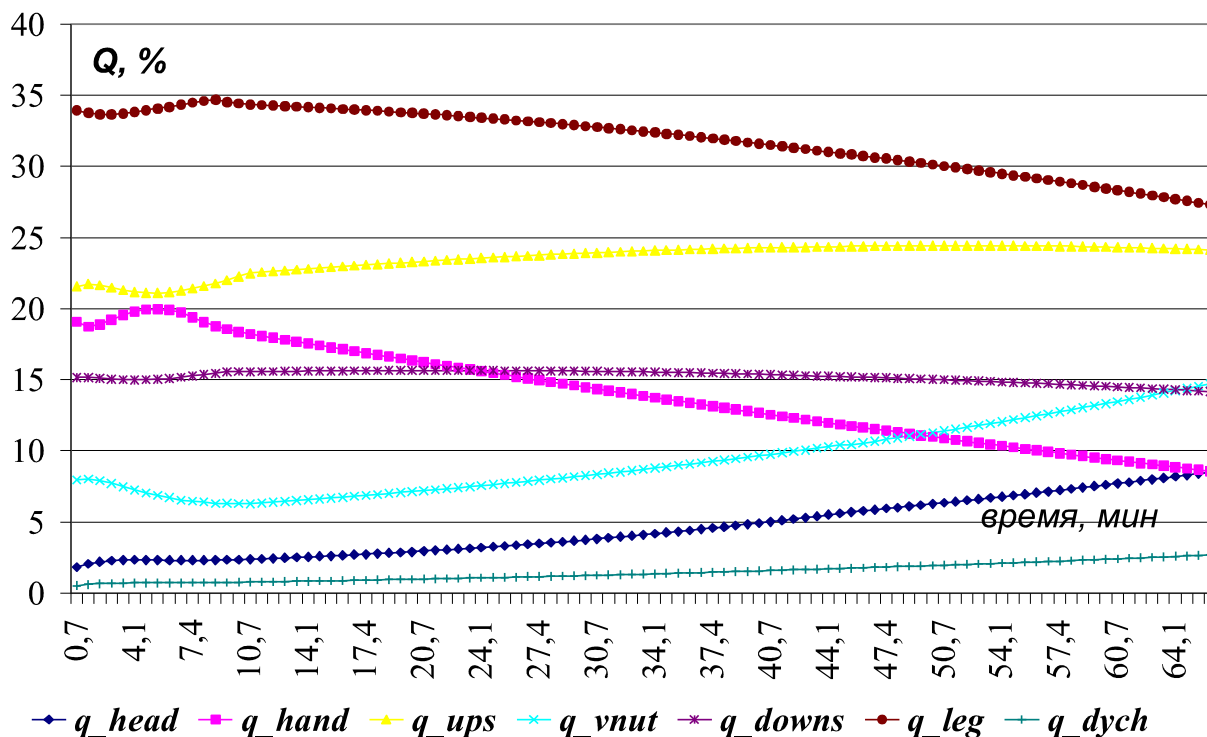


Рис. 3.10. Относительные значения теплотерь тканей (Q_i/Q_Σ , %) при охлаждении в воде при температуре $t_{\text{воды}} = 0^\circ\text{C}$: 1 – голова (head), 2 – руки (hand), 3 – грудь (ups), 4 – внутренности (vnut), 5 – живот (down), 6 – ноги (leg), 7 – легкие (dych)

В результате расчетов установлено, что для элементов среднего слоя наблюдается снижение вклада за счет их быстрого остывания, а доля вклада внутреннего «ядра» постепенно увеличивается, т.к. «ядро» сохраняет более высокую температуру, чем «оболочка». На начальной стадии заметен большой градиент изменения тепловых потоков. С физиологической точки зрения это соответствует резкому оттоку крови из «оболочки» с целью уменьшения теплоотдачи и сохранения температуры «ядра». С установлением регулярного охлаждения градиент уменьшается, и изменение происходит по экспоненциальному закону. С физиологической точки зрения этот процесс иллюстрирует постепенное остывание «ядра».

Среднемассовые температуры среднего слоя расчетных элементов.
Представлено распределение температур при длительном охлаждении в воде и воздухе для мужчины 20 лет (рис. 3.11). Температура окружающей среды 0°C . По оси X отложено количество расчетных шагов (интервал времени 1 час), по оси Y – среднемассовая температура среднего слоя. Пунктирной линией показано пороговое значение температуры – 24°C .

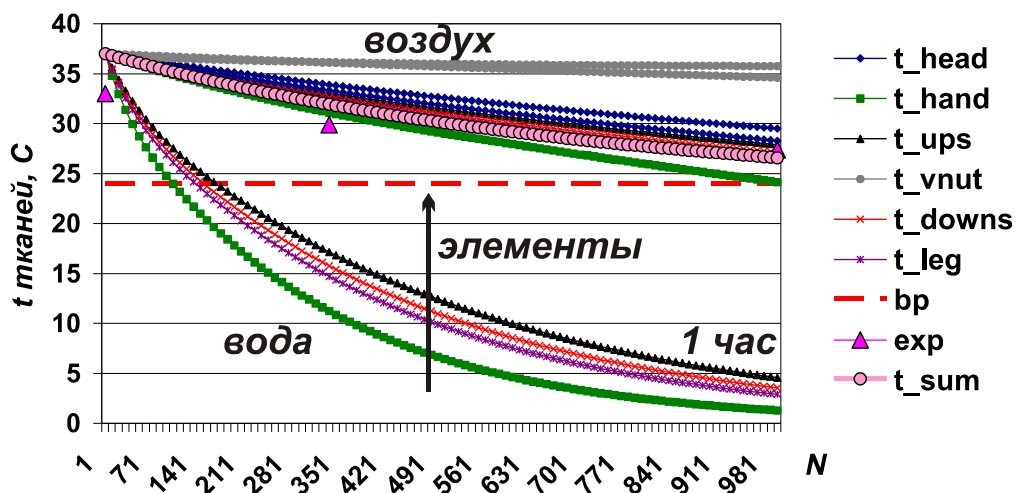


Рис. 3.11. Расчет температур различных тканей при охлаждении в воздушной и водной среде. 1 – голова (head), 2 – грудь (ups), 3 – живот (down), 4 – ноги (leg), 5 – руки (hand), 6 – суммарная для организма (SUMM).

Охлаждение в воде происходит гораздо быстрее, чем в воздухе. Общее охлаждение тканей до предельно допустимой температуры в воде без защитного костюма наступает в среднем за 12-15 минут, в воздухе же порогового значения температуры за час достигают только руки. Установлено, что разные ткани охлаждаются с разной скоростью, причем быстрее всего остывают руки, ноги и грудная клетка, что обусловлено различным соотношением массы и площади поверхности расчетных элементов.

Сравнение среднемассовых температур слоев одного расчетного элемента. Пример расчета среднемассовых температур слоев представлен на рис. 3.12.

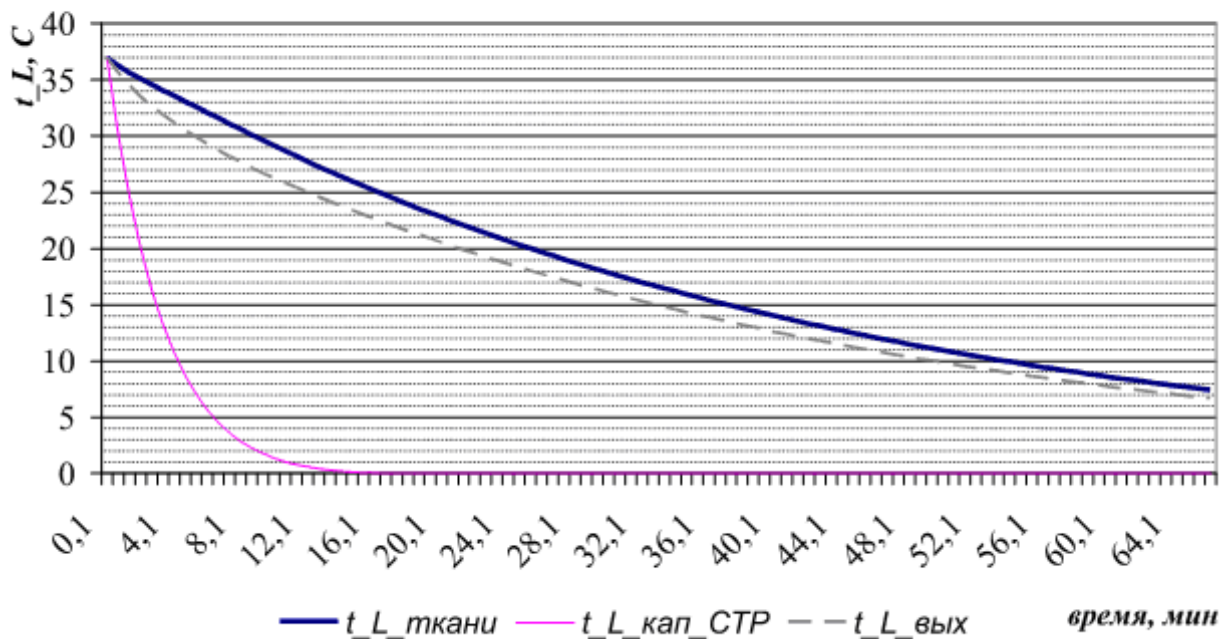


Рис. 3.12. Сравнение среднемассовых температур одного расчетного элемента: $t_{кап_СТР}^L$ – среднемассовая температура слоя теплоизоляции, $t_{ткани}^L$ – среднемассовая температура среднего слоя, $t_{вых}^L$ – средняя температура теплоносителя на выходе из расчетного элемента.

В первой фазе охлаждения происходит резкое снижение среднемассовой температуры слоя теплоизоляции $t_{кап_СТР}^L$ до температуры окружающей среды, связанное с малой массой слоя и высокой эффективностью охлаждения в воде. При этом в среднем слое наблюдается максимальный градиент охлаждения $t_{ткани}^L$ из-за большого перепада температур между слоем и окружающей средой. В регулярном режиме температура слоя теплоизоляции равна температуре воды, а скорость охлаждения среднего слоя существенно замедляется. В связи с тем, что масса среднего слоя существенно больше массы слоя теплоизоляции, характер изменения и значение средней температуры теплоносителя на выходе из расчетного элемента $t_{вых}^L$ близок к изменению температуры среднего слоя.

Оценка температур на границе слоев расчетного элемента. В начальной фазе температура наружной поверхности слоя $t_{кап_СТР}$ и внутренней поверхности $t_{ткани}$ слоя теплоизоляции резко снижаются практически до температуры окружающей среды (рис. 3.13), однако $t_{ткани}$ существенно выше $t_{кап_СТР}$. В регулярном режиме разница между ними уменьшается.

Температура внутренней поверхности среднего слоя $t_{внутр}$ в начальной фазе охлаждения остается неизменной, а в регулярном режиме постепенно уменьшается до температуры окружающей среды, так же как и

среднемассовая температура слоя. Полученные расчетные данные качественно и количественно согласуются с известными из литературы данными о двух режимах охлаждения.

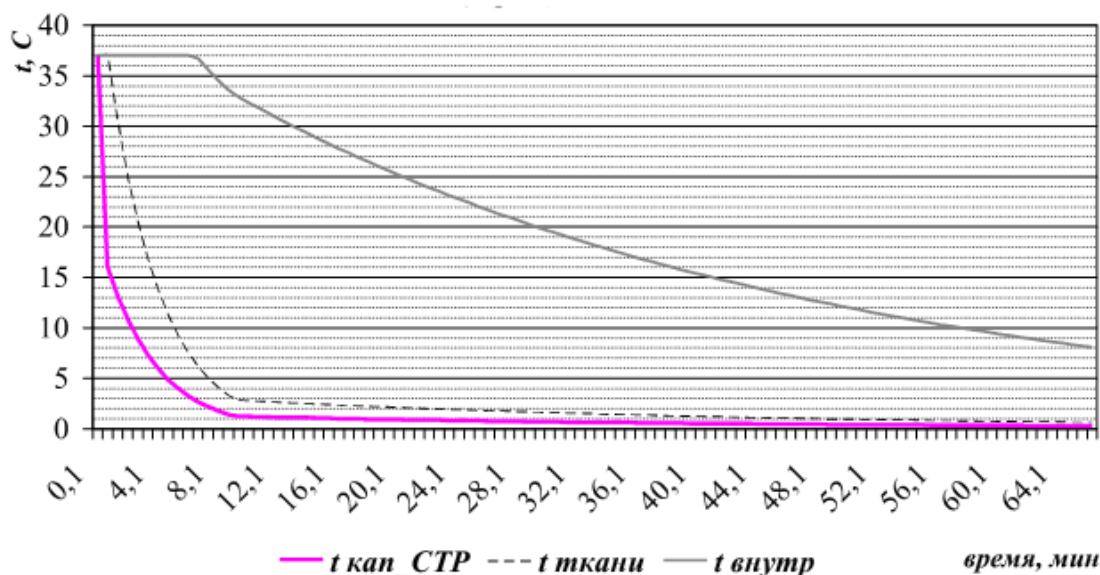


Рис. 3.13. Оценка температур на границе слоев расчетного элемента: $t_{\text{кап_СТР}}$ – температура наружной поверхности слоя теплоизоляции, $t_{\text{ткани}}$ – температура на границе внутренней поверхности слоя теплоизоляции и среднего слоя, $t_{\text{внутр}}$ – температура внутренней поверхности слоя мышц

3.5. Проверка достоверности методики расчета

В качестве проверки достоверности проводится сравнение расчетов с известными экспериментальными данными о времени охлаждения в воде и с известными из литературы модельными исследованиями работы системы терморегуляции человека в различных средах.

Сравнение с экспериментальными данными

В литературе имеется большое количество экспериментальных данных о времени нахождения людей в воде с различной температурой (табл. 3.1) [62].



Таблица 3.1

Экспериментальные данные о критическом времени нахождения в воде

t°,C	Время нахождения в воде, мин										
	Glaser	Liver- sidge	Mazzer	Coli n	Gever t	Lartin -que	Маз ин	Гренан -дер	Phillip s	Keatin g	Glaser
0	9						2	10			
5		20	25	27						12	30
10						30			35		
15				40	55						

При одинаковой температуре воды экспериментально зафиксированы определенные диапазоны времени нахождения человека в воде. Разброс значений связан с условиями экспериментов, а так же сильно зависит от индивидуальных особенностей организма (возраст, тип конституции, пол, психологические особенности личности). Кроме того, на время нахождения в воде существенное влияние оказывает теплоизоляция (одежда, гидрокостюм), величина теплопродукции внутренних органов и мышечная работа. Установлено, что увеличение температуры воды приводит к увеличению периода нахождения в воде, причем при температуре воды меньше 20 °С время нахождения в ней человека ограничено, а при температурах выше 20 °С – 24 °С находиться в воде можно длительное время без угрозы для жизни и здоровья.

В работе выполнен расчет времени нахождения человека в воде в диапазоне температур от 0 °С до 15 °С при значении мощности внутренних источников тепла (теплопродукции внутренних органов и мышц) от 0 Вт до 600 Вт (рис. 3.14).

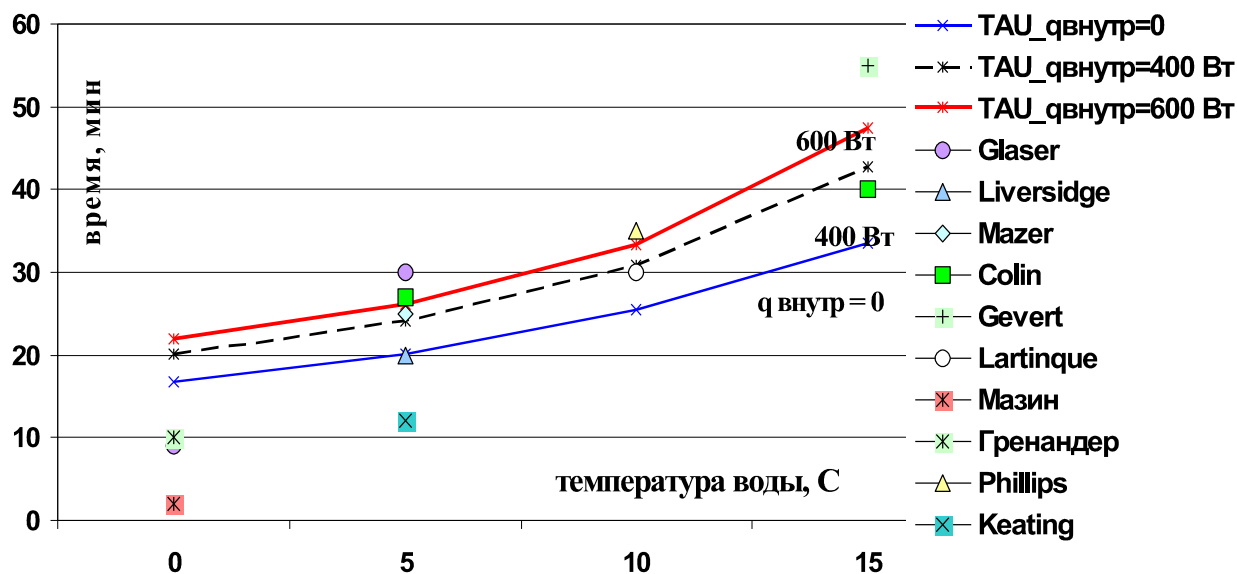


Рис. 3.14. Сравнение допустимого времени нахождения в воде различной температуры с известными экспериментальными данными

Сравнение расчетов с экспериментами показало, что при температурах выше $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ диапазоны времени нахождения в воде качественно и количественно хорошо согласуются в пределах $\pm 3 \dots 10\%$. При отсутствии теплопродукции время нахождения в воде минимальное. Рост теплопродукции увеличивает период нахождения в воде в среднем на $5 \dots 15$ минут. Единственное расхождение расчетов с экспериментами наблюдается для случая нахождения в ледяной воде (около $0\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Согласно расчетам, время нахождения в ледяной воде может составлять от 16 до 22 мин. За этот период происходит охлаждение организма до пороговой температуры «тепловой смерти» $24\text{ }^{\circ}\text{C}$. Однако эксперименты показывают, что реальное время нахождения составляет от 2 до 10 мин. Это расхождение объясняется тем, что в расчетах не учитывается психологическое состояние шока при попадании в ледяную воду. Смерть, как правило, происходит не от переохлаждения, а от утопления, вызываемого холодным (болевым) шоком и стрессовой реакцией, приводящей к судорогам, конвульсиям, неспособности контроля дыхания, адреналиновой недостаточности и другим физиологическим изменениям.

Сравнение с модельными исследованиями

Криотерапия (лечение холодом) – это лечебная и общеоздоровительная процедура, основанная на кратковременном контакте поверхности кожи с охлажденным до $-150 \dots -130\text{ }^{\circ}\text{C}$ газом. Во время процедуры криотерапии

пациента на короткое время (2-5 минут) погружают по плечи в криобассейн или криокабину (криосауну) в слой охлажденного газа – смесь паров жидкого азота и воздуха. В ходе процедуры охлаждается только тонкий поверхностный слой кожи, в котором расположены тепловые рецепторы, а организм не успевает переохладиться, пациент не испытывает дискомфорта [132].

В рамках проверки достоверности проводился численный расчет времени нахождения в криосауне при температуре $-130\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 3.15). По оси X отложено время, а по оси Y – температура кожи. Линиями показаны разные части тела. Критерием для определения времени нахождения в криосауне служит остывание кожного покрова до $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Расчетное время составило 3-4 минуты, что соответствует известным экспериментальным данным и принятым нормам посещения криосауны.

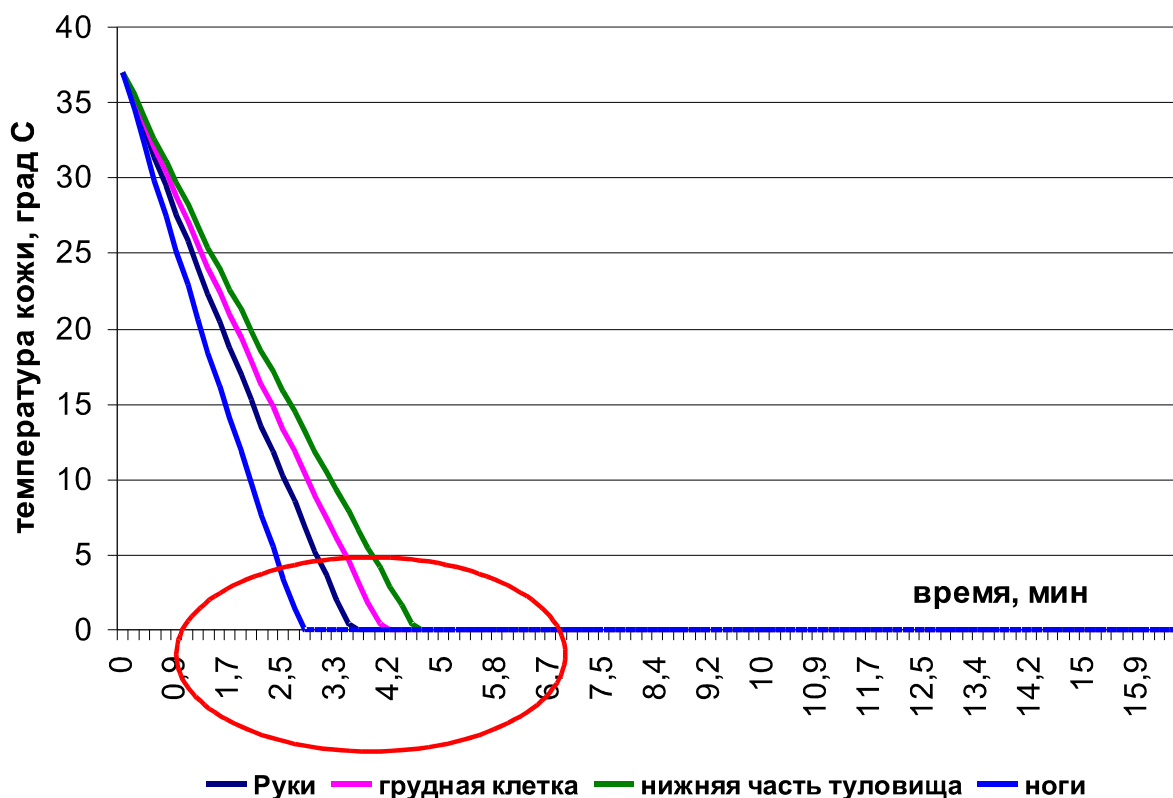


Рис. 3.15. Расчет времени нахождения в криосауне при температуре $-130\text{ }^{\circ}\text{C}$

Исследованием воздействия криотерапии на организм человека занимается государственный университет низкотемпературных и пищевых технологий. Разработанная Барановым А. Ю. модель объекта криогенного физиотерапевтического воздействия позволяет в частности проводить сравнение процедуры криотерапии в ледяной ванне и в криосауне.

В работе в качестве проверки достоверности выполнено сравнение результатов предложенной модели системы термостабилизации человека с

численным экспериментом на модели оболочки человеческого тела [132]. Криотерапия сравнивалась с купанием в воде с температурой $+12\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Температура газа составляла $-130\text{ }^{\circ}\text{C}$. Общая продолжительность процедуры составляет 7 мин (рис. 3.16). Результаты модельных исследований качественно согласуются друг с другом, однако количественно наблюдается некоторое расхождение в начальной стадии охлаждения. Модель автора представляет собой один многослойный цилиндр, а предложенная модель – систему многослойных цилиндров с разным диаметром. Поэтому количественные различия можно объяснить тем, что диаметры цилиндров в численных экспериментах различаются.

Сравнение охлаждения в различных средах

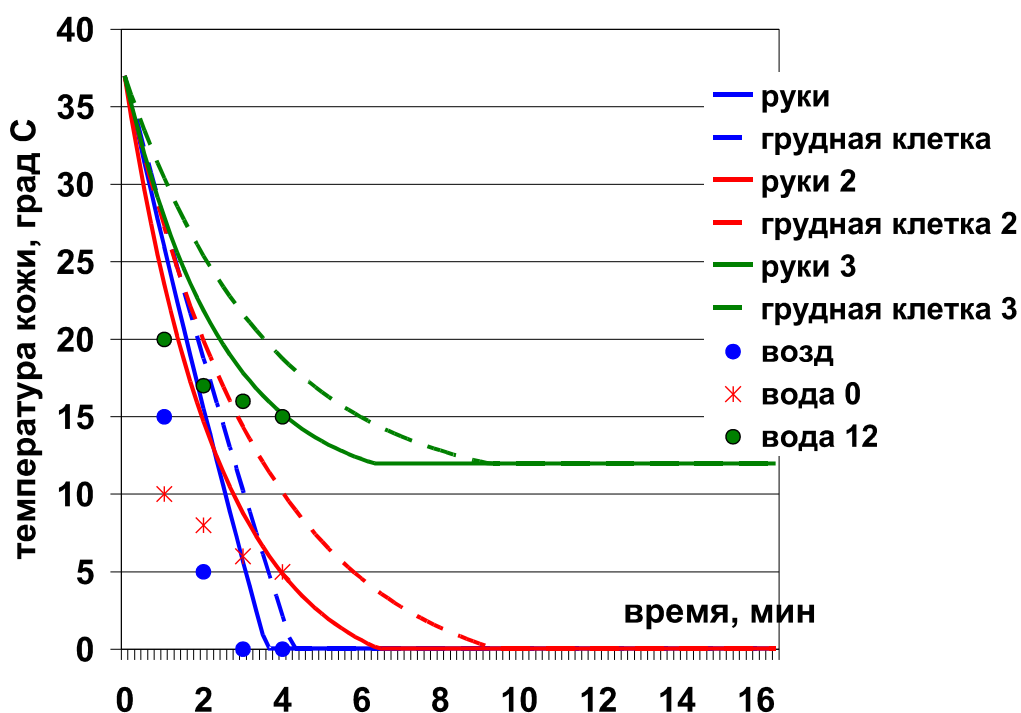


Рис. 3.16. Сравнение результатов предложенной модели системы термостабилизации человека (прямые и пунктирные линии) с численным экспериментом на модели оболочки человеческого тела Баранова А. Ю. (точки)

Выводы

1. Представлена характеристика полученных результатов: тепловых потоков, среднемассовых температур и температур на границах слоев расчетных элементов. Описаны два режима охлаждения: сброс температуры «оболочки» (начальная стадия) и остывание «ядра» (регулярный режим), что качественно и количественно согласуется с известными из теории теплообмена данными о процессе охлаждения.



2. В качестве проверки достоверности проведено сравнение расчетов с известными из литературы экспериментальными данными о времени охлаждения в воде, а так же с модельными исследованиями о влиянии различной температуры воздушной и водной среды на изменения во времени температур расчетных слоев. Получено качественное и количественное согласие в пределах $\pm 3 \dots 15 \%$, показаны чувствительность и возможности модели.

3. Предложенная методика расчета тепловых процессов теплообмена в системе «человек – окружающая среда» позволяет проводить модельные исследования с целью установления закономерностей процессов теплообмена при охлаждении системы в воздушной и водной среде в широком диапазоне режимных параметров.