

Академия наук Украины
Институт кибернетики имени В. М. Глушкова

На правах рукописи

ЛОЗИЙЧУК Наталья Георгиевна

УДК 519.876:51-76

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
СИСТЕМНОЙ САМООРГАНИЗАЦИИ
ТЕРМОРЕГУЛЯТОРНЫХ ФУНКЦИЙ
ОРГАНИЗМА ЧЕЛОВЕКА**

05.13.09 — управление в биологических и медицинских системах (включая применение вычислительной техники)

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Киев 1992



00816451 (P)

Работа выполнена в Институте кибернетики имени В. М. Глушкова АН Украины.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор ОНОПЧУК Ю. Н.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор НОВОСЕЛЬЦЕВ В. Н., доктор физико-математических наук ЯЦЕНКО Ю. П.

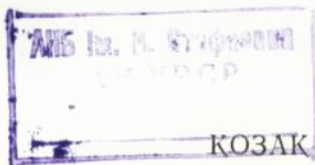
Ведущая организация: Институт физиологии им. А. А. Богомольца АН Украины.

Защита состоится «28» октябрь 1992 г. в 14⁰⁰ часов на заседании специализированного совета Д 016.45.05 при Институте кибернетики имени В. М. Глушкова АН Украины по адресу:
252028 Киев 28, проспект Науки, 41.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-техническом архиве института.

Автореферат разослан «24» сентябрь 1992 г.

Ученый секретарь
специализированного совета



КОЗАК Л. М.

Актуальность темы. Проблема раскрытия феномена температурного гомеостаза, познания природы механизмов, его обеспечивающих, является центральной проблемой современной физиологии терморегуляции (Иванов К.П., Кандрор И.С., Майстрах Е.В., Минут-Сорохтина О.П., Сленин А.Д., Слынько П.П., Султанов Ф.Ф., Трубицина Г.А. и др.). "Ни одна из имеющихся к настоящему времени схем и моделей системы терморегуляции не позволяет сказать, что является предметом регуляции или регулируемой величиной этой системы. Для точного ответа на этот вопрос уровень имеющихся знаний пока недостаточен" [Иванов К.П., 1984]. Чувствительность к изменению окружающей среды, сочетаемая со способностью системы поддерживать температуру тела в пределах $37 \pm 2^\circ\text{C}$, мобильный характер теплопроизводства, выполнение своей основной функции "за счет" других функциональных систем ввиду отсутствия собственных исполнительных органов - осознание этих, а также других свойств системы физиологического термостата требует дальнейшего изучения, использования разнообразных методов исследования.

С решением проблемы системной организации терморегуляторных функций организма связан целый ряд частных вопросов физиологии терморегуляции и теплообмена - проблемы адаптации организма к холоду и теплу, терморегуляции физнагрузки, термической чувствительности организма, энергетических аспектов термофизиологии и др.

Практическая значимость изучения вопросов, относящихся к физиологии терморегуляции становится очевидной в связи с активным освоением человеком новых видов деятельности (труд в промышленном производстве, работы в различных климатических условиях, исследования в космосе, подводные работы, спортивная деятельность), где по-новому может быть решен вопрос о ресурсах человеческого организма. Возникает необходимость в решении широкого круга гигиенических и технических проблем, связанных с разработкой мер индивидуальной и коллективной защиты от неблагоприятного влияния окружающей среды, комплексных систем жизнеобеспечения.

В математических моделях при формализации понятия "управление в системе температурного гомеостаза" наибольшее распространение получила точка зрения, согласно которой физиологическая система регулирования тепла рассматривается как аналог технических систем и, как следствие, для описания законов системного функционирования исполь-

зается принцип автоматического регулирования с обратной связью (Г)-макова И.И., Кандрор И.С. и Новосельцев В.Н., Коробко О.В., Grosbic K.J., Gagge A.P., Hammel H.T., Hardy J.D., Konz S., Stolwijk J.A.J., Wissler E.H. и др.). Модели с управлением в виде set-point способствовали решению ряда теоретических и практических задач в области термифизиологии. Но ответа на главный вопрос - почему в широком диапазоне возмущений различной природы системный регулятор обеспечивает относительное постоянство температур - математические модели с элементами set-point не позволяют получить.

Перспективным является синтез математических моделей системы терморегуляции, построенных по принципу динамического баланса теплотоков (Bligh J., Новосельцев В.Н., Уда и др.). Основу данной концепции управления составляет принцип соответствия между производством и утилизацией тепловой энергии. Преимущество данного подхода заключается в том, что использование данной гипотезы управления ведет к пониманию природы температурного гомеостаза.

Дальнейшему развитию принципа динамического баланса служит предлагаемый в настоящей диссертационной работе подход, рассматривающий функциональную организацию системы температурного гомеостаза организма по схеме оптимального управления теплообменными потоками. Физиологическая система регулирования тепла рассматривалась как самоорганизующаяся биосистема, т.е. оптимально функционирующая система, обладающая способностью при воздействии возмущающих факторов выйти в относительно равновесное состояние, при котором обеспечивается динамический баланс теплопроизводства и теплопотерь для каждого структурного элемента системы.

Цель работы - создание комплекса математических моделей, реализующих функциональную самоорганизацию системы терморегуляции организма человека по схеме оптимального управления теплообменом с учетом влияния процессов дыхания и кровообращения на формирование уровня температурного гомеостаза.

Для достижения цели в работе поставлены и решены следующие задачи:

- на основании существующих методов моделирования физиологической системы теплообмена разработать математическую модель процессов пассивного теплообмена организма человека, учитывая различие теплофизических свойств структурных элементов системы и влияние систем кровообращения и дыхания на формирование температурных режимов;

- провести качественный анализ динамической модели физиологических процессов пассивного теплообмена; создать программные средства для

имитации на ЭВМ процессов пассивного теплообмена организма человека; провести численный анализ динамики теплообменных явлений, исследовать адекватность стационарных режимов натурным экспериментом;

- сформулировать задачу оптимального управления (ЗОУ) теплообменными процессами в организме человека на основе принципа функциональной самоорганизации данной системы;
- разработать методы и алгоритмы решения ЗОУ теплообменом в зависимости от вида фазовых ограничений и областей допустимых управлений;
- разработать пакет программ для проведения вычислительных экспериментов на ЭВМ с целью исследования ответных реакций системы физиологического термостата на возмущающие воздействия различной природы;
- провести численный анализ модели управления теплообменом в организме человека, сравнить полученные результаты с данными физиологических опытов;
- на основании модельных экспериментов оценить характер совместного функционирования систем терморегуляции, кровообращения, дыхания.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Рассмотрение системы управления теплообменом как самоорганизующейся биосистемы позволило формализовать принципы функционирования физиологического термостата, исследовать поведение механизмов управления теплообменом при выполнении системой своей основной функции в различных условиях окружающей среды.

2. Проблема синтеза системного регулятора сформулирована в виде решения ЗОУ (в смысле минимизации тепло- и энергозатрат) теплообменными процессами. Описаны цель и критерии качества управления, область допустимых управлений. Разработаны алгоритм и программные средства для решения общей ЗОУ теплообменом.

3. С помощью созданного пакета программ, реализующих алгоритм решения ЗОУ теплообменом, исследовано развитие компенсаторных реакций системы температурного гомеостаза на воздействия внешних возмущений. Показано, что существует возможность прогнозировать стационарные состояния системы регулирования тепла при заданном уровне возмущающих факторов любой природы.

4. Предложено рассматривать компартмент модели в виде локального звена типа "ткань-кровь", совокупность которых, в свою очередь, объединена системой крови. Такое структурное представление объекта исследования позволяет анализировать закономерности капиллярного теплообмена. Созданы программные средства для проведения вычислительных экспериментов с моделью. Анализ результатов вычислительных

экспериментов свидетельствует об адекватном отражении в модели реальных физиологических явлений теплообмена.

5. Исследованы закономерности влияния систем дыхания и кровообращения на формирование уровней температурного гомеостаза методом математического моделирования.

Теоретическая ценность работы.

1. Разработанная математическая модель системы терморегуляции позволяет анализировать энергетические аспекты терморегуляторных функций организма.

2. Установлено, что процесс управления уровнем температурного гомеостаза осуществляется с учетом разрешения конфликтных ситуаций, возникающих между структурными элементами системы из-за отсутствия возможности одновременного обеспечения адекватного запросам тепла.

3. Выделение локального звена "ткань-кровь" в качестве компартамента математической модели физиологических явлений теплообмена позволило создать комплекс моделей для изучения процессов пассивного и активного теплообмена, имеющих место на разных структурных уровнях в организме человека.

4. Показано, что разработанная имитационная модель теплообменных и терморегуляторных явлений при искусственной гипертермии является моделью двухуровневого управления, в которой внешнее управление выбирается с учетом особенностей механизмов самоорганизации системы.

Практическая ценность работы. Пакеты программ, реализующих математические модели физиологических явлений теплообмена и терморегуляции в организме человека позволяют:

- имитировать течение пассивных и активных теплообменных процессов как в условиях теплового комфорта, так и при возмущающих воздействиях окружающей среды; вычислять значения объемной скорости локальных и системного кровотоков, теплопроизводства, теплотеря и теплосодержания структурных элементов системы, а также температур всех рассматриваемых в модели тканевых и кровеносных участков;

- прогнозировать и количественно оценивать регуляторные реакции, динамику температурных режимов организма (при переходных процессах и в стационарных состояниях); прогнозировать численные значения уровней температурного гомеостаза при заданных возмущающих воздействиях;

- осуществлять индивидуализацию модельных разработок при наличии массива данных об анатомо-физиологических особенностях конкретного человека;

- оценивать влияние неблагоприятных факторов окружающей среды на

изменение характера терморегуляторных функций организма.

Осуществлена модификация модели саморганизации системы температурного гомеостаза для описания закономерностей ее функционирования в условиях искусственной гипертермии. Программная реализация описанной имитационной модели позволит прогнозировать развитие физиологических процессов теплообмена и терморегуляции непрерывно на протяжении всего сеанса пиротермии, будет способствовать оптимизации лечебной процедуры.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Комплекс математических моделей физиологических процессов пассивного и активного теплообмена, реализующий функциональную организацию процессов управления по схеме оптимального (в смысле минимума тепловых и энергетических затрат) управления тепловыми потоками, является эффективным инструментом для исследования поведения системы физиологического термостата.

2. Выраженность метаболических реакций организма является определяющим фактором для процесса формирования уровней температурного гомеостаза.

Методы исследования. При решении поставленных в работе задач использовались методы теории обыкновенных дифференциальных уравнений, теории оптимального управления, алгебры и нелинейного программирования, численные методы дифференциального и интегрального исчисления. Полученные в работе результаты реализованы на ЭСМ-6 в системе КРАБ на языке FORTRAN-4.

Апробация работы. Теоретические и практические результаты научных исследований докладывались и обсуждались на VII Украинской республиканской конференции по бионике (Житомир, 1985), XII съезде Украинского физиологического общества им.И.П.Павлова (Львов, 1986), Всесоюзном совещании "Кислородные режимы организма, работоспособность, утомление при напряженной мышечной деятельности" (Каунас, 1987), Втором Симпозиуме "Системно-антисистемная регуляция функций в норме и патологии" (Киев, 1987), Всесоюзной конференции "Математические проблемы экологии" (Чита, 1988), Всесоюзном совещании "Гипоксия нагрузки. Методы ее оценки, прогноза и коррекции" (Киев, 1990), на научных семинарах Института кибернетики им.В.М.Глушкова АН Украины.

Диссертационная работа выполнена в рамках программы ГКНТ СМ СССР 069.07 "Разработать и внедрить в практику методы и Средства диагностики и коррекции нарушений внутренней среды организма челове-

ка", НИР "Развитие теории многозначных отображений и ее применение к задачам оптимизации, анализ конфликтных ситуаций и моделирования биологических объектов" (номер государственной регистрации 01.8.60045698), НИР "Разработать и исследовать математические модели функционально-организованных систем и управления ими применительно к объектам биологической и технической природы" (номер государственной регистрации - 01.9.00054292).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано десять печатных работ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 214 наименований (из них - III отечественных и 103 зарубежных).

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приводится обоснование актуальности темы диссертационной работы, сформулированы цели и основные задачи работы, излагаются научные, теоретические и практические результаты исследований.

В первой главе дается краткий обзор основных направлений в области математического моделирования терморегуляторных функций организма человека.

Представлен обзор математических моделей физиологических процессов пассивного теплообмена, в котором основное внимание уделено методологии построения моделей исследуемой системы. Проведена классификация математических моделей, отличающихся способами представления структуры объекта исследования, арсеналом используемых математических методов, целями модельных исследований. Отмечается многообразие научных и практических задач в области термифизиологии, решаемых методом математического моделирования.

Выполнен анализ современных концепций управления, положенных в основу создания математических моделей системы терморегуляции человека. Обсуждение преимуществ и недостатков двух основных направлений - концепций set-point и динамического баланса - позволило сделать вывод о перспективности второго направления в области осознания феномена температурного гомеостаза.

Сформулированы задачи диссертационной работы: разработка комплекса математических моделей физиологической системы терморегуляции, законы функционирования которой формализованы в виде 30V теплообме-

ном. Оптимальности функционирования системы понимается как обеспечение с минимальными энергетическими затратами для организма баланса между теплопроизводством и тепловыми потерями на разных структурных уровнях системы.

Вторая глава диссертации посвящена синтезу компартментальной модели физиологических процессов пассивного теплообмена.

В виду чрезвычайной сложности объекта исследования проведена аппроксимация его структуры (в виде набора концентрических цилиндрических объемов, каждый из которых отождествлен с определенной тканью организма человека и покрыт сеть цилиндрических капилляров). Тканевой цилиндрический объем и соответствующая ему капиллярная сеть составляют локальное звено "ткань-кровь", которое рассматривалось в качестве универсальной единицы математической модели.

Для изучения динамики температурных режимов разных тканей организма ввиду различия их теплофизических свойств в модели различаются n элементарных звеньев, объединенных единой системой крови. Циркулирующая кровь представлена в модели следующим образом: артериальная кровь (индекс А), покидая артериальное русло, распределяется по капиллярным объемам (индекс В), где происходит конвективный теплообмен между кровью и тканью. Затем формируется венозное русло (индекс V), где реализуется процесс смешивания тепловых потоков, переносимых кровью. В модели процесс преобразования смешанной венозной крови в артериальную отражен посредством представления прохождения крови по руслу легочных капилляров (индекс LG) и шунту (индекс SH).

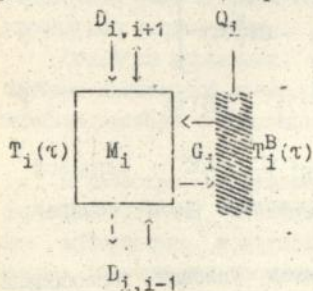


Рисунок. Элементарное звено "ткань-кровь" ($i = \overline{1, n}$)

В общей математической модели процессов пассивного теплообмена отражены физиологические процессы теплопроизводства, теплопередачи и теплообмена между структурными компонентами и с окружающей средой. Она представляет собой систему обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающих динамику температур элементарных звеньев типа "ткань-кровь" (см. рисунок), артериальной и венозной крови, крови легочных капилляров.

Обозначим через c^B, ρ^B - удельную теплоемкость и плотность крови; c_i, m_i, M_i - соответственно удельную теплоемкость, массу и скорость изменения теплопроизводства для i -го тканевого объема;

γ_i - коэффициент теплопроводности между объемами ткани и крови,
 S_i^B - площадь поверхности, на которой осуществляется теплообмен
 "ткань-кровь". $D_{i, i-1}(\tau)$ и $D_{i, i+1}(\tau)$ - тепловые потоки, описывающие
 теплопередачу между i -м и прилегающими $i-1$ -м и $i+1$ -м тканевыми
 объемами; Q_i - локальный кровоток.

Уравнение для изменения температуры артериальной крови можно
 представить в виде:

$$c_B \rho_B V_A^B \frac{dT_A^B(\tau)}{d\tau} = c^E \rho^B (Q_{LC} T_{LC}^B(\tau) + Q_{SH} T_V^B(\tau) - Q T_A^B(\tau)), \quad (1)$$

Для i -го элементарного звена динамика температурных параметров для
 тканевого и кровеносного объемов описывается системой:

$$c_i m_i \frac{dT_i(\tau)}{d\tau} = M_i - G_i(\tau) - D_{i, i-1}(\tau) + D_{i, i+1}(\tau), \quad (2)$$

$$c^B \rho^B V_i^B \frac{dT_i^B(\tau)}{d\tau} = c^B \rho^B Q_i [T_A^B(\tau) - T_i^B(\tau)] + G_i(\tau), \quad (3)$$

$$G_i(\tau) = \gamma_i S_i^B [T_i(\tau) - T_i^B(\tau)]. \quad (4)$$

Уравнения для венозной крови и крови легочных капилляров имеют вид:

$$c^B \rho^B V_V^B \frac{dT_V^B(\tau)}{d\tau} = c^B \rho^B \left[\sum_{i=1}^n Q_i T_i^E(\tau) - Q T_V^B(\tau) \right], \quad (5)$$

$$c^B \rho^B V_{LC}^B \frac{dT_{LC}^B(\tau)}{d\tau} = c^B \rho^B Q_{LC} [T_V^B(\tau) - T_{LC}^B(\tau)] - RES(\tau), \quad (6)$$

где Q - системный кровоток: $Q = \sum_{i=1}^n Q_i = Q_{SH} + Q_{LC}$, RES - тепловой
 поток, представляющий тепловые потери в окружающую среду респираторным
 путем.

Уравнение для температуры кожи с учетом условий теплообмена
 между организмом и внешней средой имеет вид:

$$c_n m_n \frac{dT_n(\tau)}{d\tau} = M_n - G_n(\tau) - D_{n, n-1}(\tau) - CONV(\tau) - RAD(\tau) - EV(\tau), \quad (7)$$

($CONV$, RAD , EV - тепловые потоки, формирующие теплообмен
 излучением, конвекцией, испарением с поверхности кожи).

Система (I)-(7) дополняется начальными условиями

$$T_i(\tau^0) = T_i^0; \quad T_i^B(\tau) = T_i^{B0}; \quad (i = \overline{1, n}); \quad T_j^B(\tau^0) = T_j^{B0}, \quad j = (A, V, LC) \quad (8)$$

Проведен качественный анализ разработанной модели пассивного теплообмена. Сформулированы и доказаны утверждения о свойствах решения системы (I)-(8): о существовании и единственности решения, о неотрицательности решений при неотрицательных начальных данных, о единственности стационарного решения. Исследованы вопросы устойчивости системы и чувствительности стационарного решения системы.

Для проведения модельных исследований создан программный модуль, имитирующий развитие процессов пассивного теплообмена при различных условиях окружающей среды и теплоизоляции человека. Экспериментальные исследования с моделью на ЭВМ и анализ динамики температурных режимов и тепловых потоков организма позволяют говорить об адекватном отражении в модели реальных явлений физиологического теплообмена.

Третья глава посвящена математическому моделированию функциональной самоорганизации системы температурного гомеостаза.

Согласно постулируемой концепции управления, процесс формирования уровней температурного гомеостаза рассматривался как оптимальный (в смысле тепло- и энергосэ debates) процесс управления теплообменом. Принципы функциональной самоорганизации системы физиологического термостата были сформулированы в виде решения задачи оптимального управления теплообменом.

Объектом управления являлась динамическая, детерминированная система пассивного теплообмена (I)-(8), на поведение которой с момента времени τ^0 оказывало влияние управляющее воздействие $u(\tau)$, $\tau \in [\tau^0, \bar{\tau}]$.

В качестве возмущающих сигналов рассматривались: температура окружающей среды, влажность воздуха, скорость движения ветра (внешние возмущающие воздействия) и изменение термогенеза в скелетных мышцах (внутренние возмущающие воздействия).

В имитационной модели в качестве вектора управления $u = (u_1, \dots, u_r)$ выступали эффекторные физиологические реакции:

- испарение с поверхности кожи E_V , как основное действие организма, защищающее его от перегрева;
- скорость теплопроизводства в скелетных мышцах (с учетом эффекта холодовой дрожи);
- показатели сосудистых реакций кровеносной системы - локальные кро-

вотоки Q_1 , ($1=\overline{1, n}$), перераспределение которых наблюдается при различных тепловых и хслодовых нагрузках;

- минутная вентиляция легких.

Управляющее воздействие выбиралось из области допустимых управлений

$$u \in U^r = \left\{ (u_1, \dots, u_r) : a_1 = u_1 \leq b_1; \left| \frac{\partial u_1}{\partial t} \right| \leq c_1; (1=\overline{1, r}); a_1, b_1, c_1 > 0 \right\}, \quad (9)$$

вид которой определялся на основании априорной информации о свойствах системы регулирования тепла, полученной из экспериментальных физиологических исследований.

Предполагалось, что целью процесса управления является перевод по оптимальным траекториям возмущенной в результате изменения условий внешней или (и) внутренней среды в момент времени τ^0 динамической системы (I) - (7) из начального состояния $\{T_j^0, (j=\overline{1, 2n+3})\}$ в ε -трубку нового стационарного состояния $\{T_j^0 \pm \varepsilon, (j=\overline{1, 2n+3})\}$, отличающегося гомеостатическими свойствами (новый уровень температурного гомеостаза).

Качество процессов управления оценивалось способностью системы обеспечить минимум теплового дисбаланса в системе, сочетаемого с минимумом энергозатрат:

$$J = J_1 + J_2, \quad (10)$$

где
$$J_1 = \int_{\tau^0}^{\bar{\tau}} \sum_{i=1}^n \lambda_i \theta_i^2(\tau) d\tau, \quad (11)$$

$$J_2 = \int_{\tau^0}^{\bar{\tau}} \sum_{i=1}^n \omega_i (M_i(\tau) - M_i^N)^2 d\tau. \quad (12)$$

Функционал (II) характеризует нарушения теплового баланса во всех рассматриваемых тканях (12) - энергетические затраты организма. Здесь $\theta_i(\tau)$ - теплосодержание 1-й ткани в момент времени τ , λ_i - весовые коэффициенты, определяющие чувствительность к тепловому дискомфорту в 1-м локальном звене системы, M_i^N - скорость теплопроизводства 1-й ткани в норме, ω_i - коэффициент чувствительности к нарушению дисбаланса по энергозатратам для 1-й ткани.

Вектор управления u^* такой, что

$$u^* = \arg \min_{u \in U} J \quad (13)$$

является оптимальным управлением.

Для решения проблемы адекватности формальной модели (I) - (13) реальным явлениям физиологической терморегуляции потребовалось отразить в модели закономерности совместного функционирования систем кровообращения, внешнего дыхания и температурного гомеостаза. Предполагалось, что в изменяющихся условиях жизнедеятельности организма при выполнении терморегуляторных функций возникает конфликтные ситуации между структурными элементами системы из-за невозможности обеспечения одновременного адекватного запросам потребления кислорода (Онопчук Ю.Н., Марченко Д.И.) и тепла. Во избежание конфликтной ситуации, в первую очередь в звене "сердечная мышца - кровь", становится необходимым поиск компромиссного решения. Компромиссы обеспечивают физиологические механизмы, способствующие "экономному" перераспределению тканевых кровотоков в сосудистом русле, благодаря чему ткани ощущают дефицит в доставке кровью кислорода и тепла "в среднем". Данный тезис о "средней" доставке тканям кислорода и тепла позволил объяснить закономерности функционирования механизмов управления в системе физиологического термостата при действии на нее возмущений любой природы. Формально модель (I) - (13) дополнялась условиями: теплопроизводство сердечной и дыхательных мышц являются линейными функциями соответственно объемной скорости системного кровотока и минутной вентиляции легких. Связь систем дыхания и терморегуляции на энергетическом уровне прослеживалась через динамику теплопроизводства как функции потребления кислорода. Анализ функционала (12) позволил оценить энергетическую напряженность каждой ткани на пути достижения температурного гомеостаза систем.

При разработке алгоритма решения сформулированной ЗОУ теплообменом сформулированы требования, которым должен соответствовать алгоритм ее решения: универсальность реализации, нетребовательность к гладкости минимизируемой функции, небольшой объем вычислений и машинного времени.

Разработанный алгоритм решения ЗОУ теплообменом реализован в виде комплекса программ на ЭЕМ БЭСМ-6 в диалоговой системе КРАБ на алгоритмическом языке FORTRAN-4. Основная идея алгоритма решения

заклучалась в слодующем: а) исходный дифференциальный оператор для системы (I) - (7) заменялся конечно-разностным аналогом; б) вектор управления выбирался в классе кусочно-постоянных функций; в) решение задачи (I) - (13) сводилось к решению последовательности задач нелинейного программирования. На каждом интервале постоянства управления решалась одна задача нелинейного программирования, в результате чего получали значения вектора оптимального управления и минимизируемого функционала, определяли оптимальную траекторию динамической системы на данном интервале. Численные значения вектора оптимального управления и траекторий температур для данного интервала времени являлись исходными для решения последующей задачи нелинейного программирования.

Программное обеспечение имитационной модели включает программные модули, реализующие алгоритмы: решения системы дифференциальных уравнений, вычисления значений функционала качества управления, поиска управляющего вектора u^* , доставляющего минимум функционалу (10) методом покоординатного спуска.

Выполнена модификация математической модели системной самоорганизации терморегуляторных функций для анализа теплообменных и терморегуляторных явлений при искусственной гипертермии. Показано, что моделирование функций системы терморегуляции в условиях искусственной гипертермии можно отождествить с решением задачи двухуровневого управления. Пример данной задачи свидетельствовал о том, что процесс внешнего управления (выбор условий и режима теплообмена между поверхностью тела и окружающей средой) должен учитывать особенности внутренней самоорганизации системы. Было отмечено, что модификация модели для условий гипертермии способствует получению информации об изменении основных физиологических реакций теплообмена и температур, функционально сопряженных с системой терморегуляции других физиологических систем в данных условиях, позволяет ставить и решать вопрос о выработке стратегии лечебных мероприятий.

В четвертой главе приводятся результаты экспериментальных исследований физиологических механизмов регуляции температурного гомеостаза, выполненных с использованием комплекса математических моделей терморегуляторной системы.

С помощью разработанного программного обеспечения имитировалось поведение исследуемой системы в комфортных и экстремальных температурных условиях окружающей среды. Входными параметрами модели являлись: анатомические и физические константы, характеризующие ход те-

чения активных и пассивных процессов физиологического теплообмена, начальные значения температурных и управляющих параметров и константы, определяющие ход вычислительного процесса. *Выходные* - значения параметров управления (локальных и системных кровотоков, теплопотерь с поверхности кожи, теплопроизводства в скелетных мышцах); динамика температурных режимов и тепловых потоков; значения критерия качества процесса управления теплообменом. Были проведены три цикла вычислительных экспериментов с моделью - в условиях комфорта, при повышенной и пониженной температурах окружающей среды. Получено хорошее совпадение модельных и натуральных экспериментов. На основании анализа результатов вычислительных экспериментов установлено следующее.

1. В зоне комфортных для организма температур окружающей среды соблюдается оптимальное с точки зрения энергетических затрат равенство тепловых потоков образования и расхода тепла, что и обеспечивает изотермию организма.

2. При холодовой нагрузке со стороны окружающей среды уменьшение теплоотдачи с поверхности тела с помощью сосудистых реакций оболочки при одновременном обеспечении относительного постоянства температур ядра является наиболее выгодной компенсаторной реакцией организма. Уровни температурного гомеостаза организма в данных условиях определяются уровнем теплопроизводства организма и, в первую очередь, теплопроизводства в тканях скелетных мышц.

3. Определяющей терморегуляторной реакцией организма при повышенной температуре окружающей среды является потоиспарение с поверхности тела, уровень которого непосредственно зависит от процессов термogenesis в организме.

4. Учет и разрешение конфликтных ситуаций в ходе решения ЗОУ теплообменом позволило поручить адекватные натурным значения уровней температурного гомеостаза и параметров управления.

В заключении описываются основные результаты диссертационной работы и приводятся следующие выводы:

1. Предложенный в работе подход позволил создать принципиально новый комплекс математических моделей физиологической системы терморегуляции. Принципы функционирования системного регулятора стимулированы в виде решения задачи оптимального управления теплообменными процессами.

2. Разработанная математическая модель физиологических процессов пассивного теплообмена, элементарной единицей которой является локальное звено типа "ткань-кровь", а также ее программное

обеспечение позволяют анализировать теплообменные и терморегуляторные функции крови, исследовать закономерности капиллярного теплообмена, процессы образования, обмена и переноса тепловой энергии для всех включенных в рассмотрение групп тканей.

3. Описана математическая модель терморегуляторных функций организма человека, в которой функциональная самоорганизация системы физиологического термостата реализована по схеме оптимального (в смысле минимума тепловых и энергетических затрат) управления теплообменными потоками.

4. Разработанное программное обеспечение математической модели системы температурного гомеостаза позволяет имитировать регуляторные реакции и поведение температурных режимов организма при переходных процессах и в стационарных состояниях, прогнозировать численные значения уровней температурного гомеостаза при заданном уровне возмущающих воздействий.

5. Показана возможность применения разработанной модели системы терморегуляции для решения прикладной задачи - имитации и прогноза функционирования данной системы при проведении лечебной процедуры искусственной гипертермии. Функциональная самоорганизация системы температурного гомеостаза в данных условиях рассматривается как решение задачи двухуровневого управления. Предложен алгоритм сформулированной задачи.

6. Анализ выполненных на ЭВМ экспериментальных исследований процессов пассивного и активного теплообмена позволил сделать следующие выводы:

- о наличии конфликтных ситуаций при совместном функционировании систем кровообращения и регулирования тепла;
- об определяющей роли системы тканевого дыхания в процессе обеспечения температурного гомеостаза организма.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Лозийчук Н.Г. Алгоритм управления теплообменом в организме // Исследования методов решения экстремальных задач. - Киев: Ин-т кибернетики им.В.М.Глушкова АН УССР, 1986. - С.59-64.
2. Оптимальне керування в системах дихання та теплообміну як ком-ромісний розв'язок конфліктних ситуацій / Ю.М.Онопчук, Н.Г.Лозійчук, Д.І.Марченко та ін.// Тез. допов. XII з'їзду Українського фізіологічного товариства ім.І.П Павлова. - Львів, 1986.- С.301.

3. Онопчук Ю.Н., Марченко Д.И., Лозийчук Н.Г. Об одной модели теплообмена, ее качественном и численном анализе // Кибернетика и вычисл.техника - 1987. - Вып.77. - С.56-59.
4. Управление функцией физиологических систем организма. Модели и их анализ / И.И.Корнюш, Н.Г.Лозийчук, Д.И.Марченко и др. // Кислородные режимы организма, работоспособность, утомление при напряженной мышечной деятельности: Тез. докл. совещ.- Каунас - Вильнюс, 1987. - С.51.
5. Математические модели качества регулирования основных функций физиологических систем / К.Б.Полинкевич, Д.И.марченко, Н.И.Молчанова, Н.Г.Лозийчук и др. // Системно-антисистемная регуляция функций в норме и патологии: Тез.докл. Второго симпозиума.- Киев., 1987.- С.35-36.
6. Лозийчук Н.Г. Самоорганизация теплового обмена организмом и ее математическая модель // Докл. АН УССР. Сер.А. Физ.- мат.науки.- 1988. - № 12. - С.58-61.
7. Лозийчук Н.Г. Исследование законов управления температурным гомеостазом человека на математической модели // Математические проблемы экологии. - Чита, 1988. - С.127-130.
8. Лозийчук Н.Г. Математическая модель управления уровнем температурного гомеостаза организма // Кибернетика и вычисл.техника.- 1989. - Вып.82. - С.77-80.
9. Бондаренко М.В., Лозийчук Н.Г. Изучение совместного функционирования систем терморегуляции и дыхания в условиях изменения давления окружающей среды //Функциональные резервы и адаптация: Материалы Всесоюз.науч.конф., Киев, 13-15 нояб. 1990 г. - Киев, 1990. - С.17-18.
10. Математические модели динамики газов в организме и их использование для прогнозирования и коррекции гипоксической гипоксии / Д.И.Марченко, Т.В.Дутчак, И.И.Корнюш, Т.А.Семчик, Н.Г.Лозийчук Н.Г.// Гипоксия нагрузки, математическое моделирование, прогнозирование и коррекция. - Киев, 1990. - С.45-49.



Подп. в печ. 01.09.92. Формат 60x84/16. Бум. кн. журн.

Офс. печ. Усл. печ. л. 0,93. Усл. кр.-отт. 1,05.

Уч. изд. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ 1206.

Редакционно-издательский отдел с полиграфическим участком
Института кибернетики имени В.М.Глушкова АН Украины
252207 Киев 207, проспект Академика Глушкова, 40

Бесплатно

Ab 25.898
Ab 25.898