

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

А.Ю. Баранов, Т.А. Малышева, А.Ю. Сидорова

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ
В НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ УСТАНОВКАХ
МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

Учебно-методическое пособие

 **УНИВЕРСИТЕТ ИТМО**

Санкт-Петербург

2015

УДК 536.483, 621.59

Баранов А.Ю., Малышева Т.А., Сидорова А.Ю. Исследование тепловых процессов в низкотемпературных установках медицинского назначения: Учеб.-метод. пособие. – СПб.: Университет ИТМО; ИХиБТ, 2015. – 34 с.

Представлена методика постановки численного эксперимента по моделированию нестационарной передачи теплоты в криотерапевтических системах. Изложен порядок формирования физической и математической моделей объекта исследований, алгоритм вычислений и обработки результатов эксперимента.

Предназначено для бакалавриата направления 14.03.01 Ядерная энергетика и теплофизика очной и заочной форм обучения.

Рецензент: доктор техн. наук, проф. В.А. Рыков

**Рекомендовано к печати редакционно-издательским советом
Института холода и биотехнологий**



Университет ИТМО – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 – 100». Цель Университета ИТМО – становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

© Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 2015

© Баранов А.Ю., Малышева Т.А., Сидорова А.Ю., 2015

ВВЕДЕНИЕ

Низкотемпературные установки медицинского назначения используются для решения медико-биологических задач в области физиотерапии, хирургии и длительного хранения биопрепаратов. Основу работы низкотемпературных установок медицинского назначения составляют криомедицинские технологии – методы дозированного переохлаждения биологических объектов. Эти технологии образуют три области применения криогенных температур в медицине: криотерапию, криохирургию и криоконсервацию. Цикл лабораторных работ направлен на освоение учащимися основных закономерностей, характеризующих процессы переноса теплоты в указанных областях, а также на ознакомление с методами математического моделирования тепловых процессов в системах, содержащих биологические объекты.

Лабораторный практикум состоит из трех лабораторных работ, посвященных отдельным разделам криогенной медицины. В данном учебном пособии рассматриваются две первые лабораторные работы. Курс построен с использованием метода восхождения от простого к сложному. Программные продукты, использованные в первой части цикла, подвергаются постепенной коррекции в соответствии с изменением физического характера моделируемых тепловых процессов. Такой подход не только сокращает время, затрачиваемое на построение программного обеспечения экспериментов, но и развивает у обучаемых системный подход к решению исследовательских задач.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1 ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ ОБОЛОЧКИ ТЕЛА ЖИДКИМ ИЛИ ГАЗООБРАЗНЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ

Конвективное охлаждение поверхности тела человека используется в физиотерапевтических отделениях для решения лечебных задач. По способу отвода теплоты можно выделить два варианта охлаждения: гипотермию и криотерапию [4].

Гипотермия используется для тренировки системы терморегуляции (закаливания) и для отвода избыточного количества теплоты при некоторых заболеваниях. С физической точки зрения гипотермия сводится к охлаждению тела посредством воды с температурой от 0 до 12 °С. Благодаря высокой эффективности теплопередачи отвод теплоты с поверхности объекта охлаждения значительно превосходит номинальную физиологическую теплопродукцию (100 Вт/м²). Снижение периферийной и средней температуры тела обеспечивает замедление обменных процессов.

Криотерапия основана на охлаждении поверхности тела криогенным газом. Температура газа выбирается в интервале 130–140 К, время охлаждения не превышает 180 с. Применение криотерапии обеспечивает лечение ряда тяжелых заболеваний [4].

Сходство процессов в криогенных системах и гипотермических устройствах и неполное представление о физических отличиях газовой и жидкостной конвекции являются причиной того, что четкой границы между ними не проводится.

Необходимо экспериментально установить различия процессов охлаждения в гипотермических и криотерапевтических системах.

Цель лабораторной работы

Целью работы является исследование нестационарной передачи теплоты в поверхностных слоях человеческого тела, определение изменения температуры покровных слоев, мгновенных и интегральных значений тепловых потоков, анализ амплитуды изменения температуры поверхности и внутренних слоев объекта.

Выбор методики исследований

Объектом конвективного охлаждения при гипотермии и криотерапии является поверхность человеческого тела, поэтому для исследований нельзя использовать физический эксперимент. Численный эксперимент по исследованию процесса охлаждения позволяет снять целый круг практических проблем. При этом объем информации о ходе и результатах процесса переноса теплоты многократно превосходит воз-

можные результаты физических экспериментов. Математический аппарат для проведения подобных экспериментов разработан на кафедре криогенной техники и прошел всестороннюю практическую апробацию.

ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОБЪЕКТА ОХЛАЖДЕНИЯ

Физическая модель объекта охлаждения – это упрощенный аналог, для построения которого использована система допущений. Учитывая специфику применения конвективного охлаждения поверхности тела, при разработке физической модели приняты ограничения.

Область распространения изменений температуры тела ограничена пределами оболочки тела. Оболочка человеческого тела состоит из слоев эпителия, жировой и мышечной тканей. Принято допущение о том, что теплотворная способность эпителия и мышечной ткани равномерно распределена по объему. Жировая ткань внутренних источников теплоты не имеет.

Объект охлаждения рассматривается как полуограниченное тело, пассивная граница которого отдалена от наружной поверхности [1].

Толщина оболочки составляет $\delta_0 = 15$ мм. Представление оболочки в виде полуограниченного тела иллюстрируется схемой, представленной на рис.1. Средняя толщина слоев: эпителий – $\delta_3 = 2$ мм, жировой слой – $\delta_ж = 10$ мм, мышечная ткань – $\delta_м > 3$ мм. Пассивная граница удалена от наружной поверхности на 50 мм. Теплофизические свойства слоев при нормальных условиях приведены в табл. 1 [7].

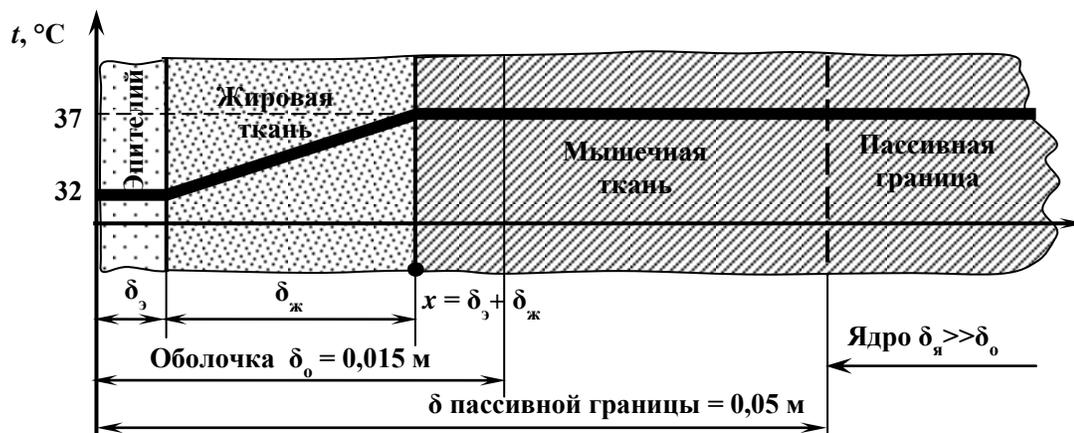


Рис. 1. Тепловая схема объекта охлаждения

Температура ядра постоянна: $t_{я} = 37 \text{ }^\circ\text{C}$. Температура наружной поверхности зависит от интенсивности конвективного отвода теплоты в окружающую среду, обычно $t_0 = 32 \text{ }^\circ\text{C}$. Начальное распределение температуры покровных слоев принято по данным, известным из литературы [7].

Таблица 1

Теплофизические свойства покровных тканей человека

| Орган или ткань | Плотность, кг/м ³ | Содержание воды, % | Теплоёмкость, Дж/кг·К | Теплопроводность, Вт/м·К | Тепловыделение, Вт/кг |
|-----------------|------------------------------|--------------------|-----------------------|--------------------------|-----------------------|
| Эпителий | 1093 | 53,5–72,5 | 3600 | 0,389 | 10,06 |
| Мышцы | 1041 | 68,5–80,3 | 458 | 0,439 | 6,99 |
| Жировая ткань | 916 | 15–20 | 250 | 0,200 | – |

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОБЪЕКТА ОХЛАЖДЕНИЯ

Для описания переноса теплоты через слои охлажденного объекта используем уравнение энергии в одномерном виде [1]:

$$\rho \frac{\partial h}{\partial \tau} = -\frac{\partial q_x}{\partial x} + q_v, \quad (1)$$

где h – энтальпия (теплосодержание) материала, образующего слой; q_x – тепловой поток вдоль координаты x ; q_v – теплота, выделяемая внутренними источниками в единице объема.

При замене производных (1) конечно-разностными приближениями получено [2,5]:

$$\rho \frac{(h'_i - h_i)}{\Delta \tau} = -\frac{q_{i+1} - q_i}{\Delta x} + q_v, \quad (2)$$

где h'_i – энтальпия в i -точке в момент времени $\tau + \Delta \tau$; q_i, q_{i+1} – соответственно подвод теплоты от узловых точек.

Решая уравнение (2) относительно h'_i , получаем:

$$h'_i = h_i + \frac{(q_i - q_{i+1} + q_v \Delta x) \Delta \tau}{\Delta x \rho} \quad (3)$$

Перенос теплоты вдоль оси X определяется законом Фурье:

$$q_i = -\lambda_{i-1} \frac{\partial t}{\partial x} \approx -\lambda \frac{(T_i - T_{i-1})}{\Delta x}, \quad (4)$$

$$q_{i+1} = -\lambda_{i+1} \frac{\partial t}{\partial x} \approx -\lambda \frac{(T_{i+1} - T_i)}{\Delta x}, \quad (5)$$

где Δx – расстояние между точками (шаг разбиения).

Подвод теплоты от внутренних источников:

$$q_v = \rho q_g, \quad (6)$$

где q_g – удельное тепловыделение ткани (см. табл. 1)

От наружной поверхности моделируемого объекта (при $i=1$) теплота отводится посредством конвективного теплообмена:

$$q_{i-1} = \alpha(T_1 - T_i), \quad (7)$$

где α – коэффициент теплоотдачи; T_1 – температура теплоотводящей среды.

Выражение (7) представляет собой граничное условие третьего рода, определяющее взаимодействие моделируемого объекта с газообразным теплоносителем.

На пассивной границе объекта используем условия первого рода $t_n = \text{const} = 37,0 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Начальные условия для объекта охлаждения задают распределение температуры в слоях при $\tau = 0$.

Общее число элементарных участков в пределах пассивной границы принимает $n = 100$.

К числу возможных экспериментальных задач относится исследование влияния толщины покровных слоев, поэтому в модели предусмотрена возможность их варьирования. По заданным толщинам покровных тканей: $\delta_э$ – толщина эпителия, $\delta_ж$ – толщина жировой ткани, рассчитываются координаты границ: $x_1 = \delta_э$ и $x_2 = \delta_э + \delta_ж$. Формируем

целочисленный массив ns , который содержит индекс – признак моделируемого слоя:

если $1 \leq x_i < x_1$, то $ns = 2$ (эпителий),
 если $x_1 \leq x_i < x_2$, то $ns = 3$ (жировая ткань),
 если $x_2 \leq x_i$, то $ns = 1$ (мышца).

Вычисляются и фиксируются номера узловых точек, соответствующих границам слоев: n_1 и n_2 .

Массив начальных значений температур необходимо сформировать с учетом заданного геометрического строения объекта. Значения температуры в момент времени $\tau = 0$:

если $ns = 2$, то $T_i = T_э$,
 если $ns=3$, то $T_i = T_э + \frac{T_м - T_э (i - n_i + 1)}{(n_2 - n_1 + 1)}$,
 если $ns = 1$, то $T_i = T_м$.

Начальное теплосодержание для узловой точки вычисляется по начальному значению температуры:

$$h_i = (T_i - T^*)c_{nsi}, \quad (8)$$

где T^* – температура дефростации, $T^* = 271$ К, c_{nsi} – удельная теплоемкость текущего слоя покровообразующих тканей.

Описанный алгоритм формирования начальных массивов температуры и энтальпии слоев выполняется в начале численного эксперимента при $\tau = 0$. На всех последующих временных слоях ($\tau > 0$) энтальпия вычисляется из (3). Значения температуры рассчитываются по величине энтальпии: $T_i' = f(h_i')$.

$$T_i' = T_0^* + \frac{h_i'}{c_{nsi}} \quad (9)$$

Для повышения точности и сокращения объема расчетов целесообразно составлять для каждого узла локальный тепловой баланс.

Схема вычисления теплового баланса узловой точки (см. рис. 2) строится на основе представления о том, что тепловые потоки направ-

лены в текущую узловую точку. Действительная физическая картина процесса переноса теплоты описывается знаком, который имеет вектор теплового потока. Если поток повышает теплосодержание точки, его знак положительный, и наоборот. Знак потока определяется из градиента температур. Например, от последующей точки определяется выражением

$$q_{i+1} = \lambda \frac{(T_{i+1} - T_i)}{\Delta x} \quad (10)$$

Соответственно при $T_{i+1} > T_i$ тепловой поток от последующей точки положительный: $q_{i+1} > 0$.

Принцип построения локального теплового баланса поясняется рис. 2. Для первой точки $i = 1$ подвод теплоты от предыдущего участка определяется конвективным отводом теплоты: при $i = 1$ $q_{i-1} = q_{\text{конв}}$, подвод теплоты от последующей точки q_{i+1} или q_{2-1} определяется как:

$$q_{2-1} = -\lambda \frac{(T_2 - T_1)}{\Delta x} \quad (11)$$

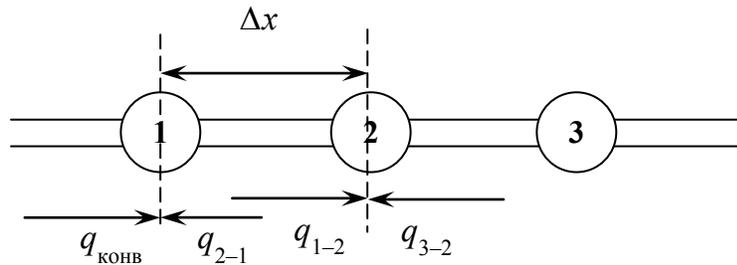


Рис. 2. Локальные тепловые балансы соседних узловых точек

Из тепловой схемы (см. рис. 2) видно, что тепловой поток, подводимый от второго узла к первому q_{2-1} , равен по величине тепловому потоку, поступившему из первого узла ко второму q_{1-2} , но имеет другой знак: $q_{2-1} = -q_{1-2}$.

Это позволяет сократить объем вычислений и вероятность ошибок. Для учета результатов вычислений, выполненных для предыдущего узла, введем буферную переменную $q_{\text{пред}} = -q_{2-1}$, которая используется

для описания количества теплоты, полученного от предыдущей точки. Тогда (3) для всех точек примет вид:

$$h'_i = h_i + \frac{(q_{\text{пред}} - q_{i+1} + q_v \Delta x) \Delta \tau}{\Delta x \rho} \quad (12)$$

Для первой узловой точки $i = 1$ подвод теплоты от предыдущего участка определяется конвективной теплоотдачей $q_{\text{пред}} = q_{\text{конв}}$. После вычисления величины h'_1 для первой точки производится присвоение $q_{\text{пред}} = -q_{i+1}$, т. е. при переходе к вычислению энтальпии второй узловой точки величина $q_{\text{пред}}$ известна.

Порядок выполнения лабораторной работы

Математическая модель объекта охлаждения реализуется в виде электронной таблицы *Excel*. Математическое моделирование выполняется на двух листах рабочей книги *Excel*: «Гипотермия» и «Криотерапия».

Для определения физических свойств теплоносителя в численном эксперименте используются таблицы свойств воздуха: при атмосферном давлении и температуре от 78 до 320 К и воды при температуре от 273 до 285 К [3]. Таблицы размещаются на отдельных листах «Свойства воды» и «Свойства азота».

Данные о свойствах теплоносителей при различных температурах используются для расчетов коэффициента конвективной теплоотдачи. Для определения значения критерия Нуссельта используется выражение [1]:

$$Nu_{\text{жж}} = A (Gr_{\text{жж}} Pr_{\text{жж}})^n \frac{Pr_{\text{ж}}}{Pr_{\text{с}}}^m \quad (13)$$

Значения целочисленного коэффициента A и степенных коэффициентов n и m выбираются с учетом режима конвективного перемешивания теплоносителя.

Ввод стандартных данных

Для выполнения лабораторной работы используется стандартная заготовка книги *Excel*, которая содержит листы «Свойства воды», «Свойства азота», «Гипотермия» и «Криотерапия». Листы «Гипотер-

мия» и «Криотерапия» содержат необходимую для формирования физической модели объекта охлаждения информацию. Экспериментатор, в соответствии с индивидуальным заданием, задает сведения о толщине слоев эпителия и жира, высоту объекта охлаждения и температуру теплоносителя (см. рис. 3).

| | A | B | C | D | E |
|----|--|---|-------------|----------------------|-----------------------|
| 1 | ХАРАКТЕРИСТИКА ПОКРОВООБРАЗУЮЩИХ ТКАНЕЙ | | | | |
| 2 | | | Кожа | Жировая ткань | Мышечная ткань |
| 3 | Теплоемкость, Дж/кг·К | | 3600 | 2250 | 3458 |
| 4 | Теплопроводность, | | 0,389 | 0,2 | 0,44 |
| 5 | Плотность, кг/м ³ | | 1093 | 916 | 1041 |
| 6 | Влажность | | 0,5373 | 0,2 | 0,439 |
| 7 | Тепловыделение, Вт/кг | | 10,06 | 0 | 6,99 |
| 8 | Идентификатор слоя | | 1 | 2 | 3 |
| 9 | | | | | |
| 10 | ТОЛЩИНА ПОКРОВНЫХ СЛОЕВ, мм | | | | |
| 11 | ЭПИТЕЛИЙ | | 2 | | |
| 12 | ЖИРОВАЯ ТКАНЬ | | 10 | | |
| 13 | | | | | |
| 14 | Высота объекта, м | | 1 | | |
| 15 | ПАРАМЕТРЫ СЕТКИ РАЗБИЕНИЯ | | | | |
| 16 | Шаг по времени, с | | 1 | | |
| 17 | Шаг по координате, мм | | 0,5 | | |

Рис. 3. Ввод исходных данных численного эксперимента

По заданным исходным данным на рабочем листе автоматически формируется матрица характеристик узловых точек. Матрица содержит сведения о значениях x_i , ns_i , c_i , λ_i , ρ_i , ϕ_i , q_i (см. рис. 4).

Проведение эксперимента предполагает контроль температуры на внутренней границе жирового слоя $T_{i=n2}$. Значения $n2$ определяется автоматически по заданным толщинам эпителиального и жирового слоев.

Кроме геометрических параметров объекта, в рамках лабораторной работы возможно изменение начальных и граничных условий. По заданным начальным условиям рассчитываются температура и энтальпия всех узловых точек в момент $\tau = 0$ (см. рис. 5). Для вычисления температур используется функция «ЕСЛИ».

Далее следует сформировать алгоритм расчета изменения энтальпии узловых точек во времени.

| | A | B | C | D | E | F | G |
|----|-------------------------------------|---|----------|----------|----------|--------|------|
| 19 | ХАРАКТЕРИСТИКИ УЗЛОВЫХ ТОЧЕК | | | | | | |
| 20 | № точки | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 21 | Координата точки, мм | | 0 | 0,5 | 1 | 1,5 | 2 |
| 22 | Идентификатор слоя | | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 |
| 23 | | | | | | | |
| 24 | Теплоемкость, Дж/кг·К | | 3600 | 3600 | 3600 | 3600 | 2250 |
| 25 | Теплопроводность, | | 0,389 | 0,389 | 0,389 | 0,389 | 0,2 |
| 26 | Плотность, кг/м ³ | | 1093 | 1093 | 1093 | 1093 | 916 |
| 27 | Влажность | | 0,5373 | 0,5373 | 0,5373 | 0,5373 | 0,2 |
| 28 | Тепловыделение, Вт/кг | | 10,06 | 10,06 | 10,06 | 10,06 | 0 |
| 29 | q_v , Вт/м ³ | | 10995,58 | 10995,58 | 10995,58 | 10996 | 0 |

Рис. 4. Характеристики узловых точек математической модели объекта охлаждения

| | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K |
|----|-------------------------------------|---|--------------------------|----------|----------|--------|-----------------|----------|-----------------|--------|--------|
| 19 | ХАРАКТЕРИСТИКИ УЗЛОВЫХ ТОЧЕК | | | | | | | | | | |
| 20 | № точки | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 21 | Координата точки, мм | | 0 | 0,5 | 1 | 1,5 | 2 | 2,5 | 3 | 3,5 | 4 |
| 22 | Идентификатор слоя | | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| 23 | | | | | | | | | | | |
| 24 | Теплоемкость, Дж/кг·К | | 3600 | 3600 | 3600 | 3600 | 2250 | 2250 | 2250 | 2250 | 2250 |
| 25 | Теплопроводность, | | 0,389 | 0,389 | 0,389 | 0,389 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 |
| 26 | Плотность, кг/м ³ | | 1093 | 1093 | 1093 | 1093 | 916 | 916 | 916 | 916 | 916 |
| 27 | Влажность | | 0,5373 | 0,5373 | 0,5373 | 0,5373 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 |
| 28 | Тепловыделение, Вт/кг | | 10,06 | 10,06 | 10,06 | 10,06 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 29 | q_v , Вт/м ³ | | 10995,58 | 10995,58 | 10995,58 | 10996 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 30 | Контрольная точка, n_1 | | 5 | | | | | | | | |
| 31 | Контрольная точка, n_2 | | 25 | | | | | | | | |
| 32 | | | | | | | | | | | |
| 33 | | | ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ | | | | T_1 , К | 285 | $T_{2,i=n}$, К | | 310 |
| 34 | | | НАЧАЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ | | | | $T_{2,i=1}$, К | 305 | $T_{2,i=n}$, К | | 310 |
| 35 | Начальная температура | | 305 | 305 | 305 | 305 | 305,24 | 305,48 | 305,71 | 305,95 | 306,19 |
| 36 | Начальная энтальпия | | 122400 | 122400 | 122400 | 122400 | 77035,7 | 77571,43 | 78107,143 | 78643 | 79179 |

Рис. 5. Определение начальных значений температуры и энтальпии узловых точек

Вычисление изменения энтальпии и температуры узловых точек

Изменение энтальпии узловых точек происходит под действием внешнего конвективного отвода теплоты:

$$q_{\text{конв}} = -\alpha(T_{i=1} - T_1)$$

Температура теплоносителя T_1 и поверхности объекта охлаждения $T_{i=1}$ определена, поэтому для расчета конвективного отвода теплоты необходимо определить коэффициент теплоотдачи α :

$$\alpha = \frac{Nu\lambda}{Y}$$

Листы «Гипотермия» и «Криотерапия» содержат матрицу для расчета массива энтальпий узловых точек по известным значениям внешнего отвода теплоты. Матрица реализована в виде второго временного слоя $\tau = \tau + \Delta\tau$.

Копируя строку многократно, получаем экспериментальную матрицу, которая описывает изменения температуры $T_i = f(\tau, x)$, энтальпии $h_i = f(\tau, x)$ и тепловых потоков $q_{i+1} = f(\tau, x)$ в период $\tau \leq \tau_{\text{max}}$. Продолжительность виртуального эксперимента ограничивается по условиям гипотермической безопасности [4]:

$$T_{i=1} > 271 \text{ K}, \quad T_{i=n2} > 309 \text{ K}$$

Для учета этих условий в экспериментальную матрицу введен столбец «Контроль», ячейки которого посредством функции «ЕСЛИ» проверяют соблюдение условий гипотермической безопасности на каждом временном слое. В случае нарушения условий в ячейке «Контроль» появится информационное сообщение о характере нарушений, а эксперимент прекратится (см. рис. 6).

| I204 | | fx | | =ЕСЛИ(К204<271,00001;"Т1=271";ЕСЛИ(СМЕЩ(К204;0;С\$31*3)<309,0001;"tn2= | | | | | |
|------|-----|-----|--------|--|-------|--------|-------|----------|--|
| | A | B | H | I | J | K | L | M | |
| 202 | 162 | 275 | 151,03 | | -1047 | 281,94 | 39367 | 1013,7 2 | |
| 203 | 163 | 275 | 150,91 | | -1044 | 281,92 | 39305 | 1010,1 2 | |
| 204 | 164 | 275 | 150,79 | 'tn2=309' | -1041 | 281,9 | 39243 | 1006,7 2 | |
| 205 | 165 | 275 | 150,66 | 'tn2=309' | -1037 | 281,88 | 39181 | 1003,3 2 | |

Рис. 6. Проверка соблюдения условий гипотермической безопасности

После оформления матрицы численного эксперимента можно переходить к выполнению индивидуального задания. Например, изменять температуру теплоносителя и определять максимально допустимую продолжительность охлаждения, варьировать толщину слоев δ_3 и $\delta_{ж}$, менять начальное распределение температуры и т. д.

Контрольные вопросы к лабораторной работе № 1

1. С какой целью проводится охлаждение тела пациента в криотерапевтических системах?
2. На какие органы чувств влияет охлаждение поверхности тела?
3. Как определяется допустимая продолжительность пребывания пациента в жидком и газообразном теплоносителе?
4. Почему меняется темп охлаждения поверхности тела в жидком теплоносителе?
5. Почему темп охлаждения поверхности тела в криогенном теплоносителе почти не меняется за время эксперимента?
6. Как количественно соотносится дискомфорт гипотермических и криотерапевтических процедур?
7. Что является причиной прекращения эксперимента с жидким теплоносителем?
8. Что является причиной прекращения эксперимента с газообразным теплоносителем?

9. Почему расчетный тепловой поток с поверхности тела в жидком теплоносителе значительно выше, чем в эксперименте с газообразным теплоносителем?

10. Почему в обоих эксперимента от поверхности объекта отведено примерно равное количество теплоты, хотя расчетный тепловой поток с поверхности тела в жидком теплоносителе значительно выше?

11. Почему охлаждение в жидком теплоносителе не позволяет получить на поверхности объекта температуру менее $4\text{ }^{\circ}\text{C}$?

12. Почему охлаждение в газообразном теплоносителе не позволяет получить на поверхности объекта температуру до $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$?

13. Как соотносится физиотерапевтический эффект охлаждения в жидком и газообразном теплоносителе?

14. Почему физиотерапевтический эффект охлаждения в газообразном теплоносителе на порядок выше?

15. Почему криотерапевтические процедуры проводятся без учета состояния системы терморегуляции пациента?

16. Сколько теплоты теряет пациент за один сеанс криотерапии?

17. Сколько теплоты теряет ядро тела пациента за один сеанс криотерапии?

18. Что позволяет телу пациента сохранить постоянство температуры ядра тела, несмотря на мощный отвод теплоты с поверхности тела?

19. Сколько сеансов криотерапии можно проводить ежедневно?

20. Что ограничивает допустимое число процедур?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ КРИОГЕННОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В УСТАНОВКАХ ОБЩЕЙ КРИОТЕРАПИИ

Общее криотерапевтическое воздействие (ОКВ) основано на конвективном охлаждении поверхности тела криогенной газовой средой в условиях естественной или слабовынужденной конвекции. Целью ОКВ является снижение температуры поверхности тела при незначительной потере теплоты от центра организма, что достигается за счет интенсивного отвода теплоты от объекта криотерапевтического воздействия.

Интенсивность охлаждения в условиях естественной конвекции и постоянства размеров объекта охлаждения зависит только от температуры охлаждающей среды – криогенного газа.

В реальных условиях температура газа меняется во времени, что связано с организацией ОКВ, энерговооруженностью криотерапевтического устройства и т.д. Если принимать во внимание подобные частности, результаты эксперимента будут зависеть от конструкции конкретного исполнительного устройства.

Для получения обобщающих результатов и выводов процесс охлаждения криогенным газом следует рассматривать в идеальных условиях. Принимая допущения, что поле температур газа изотропно и не зависит от времени, можно определить оптимальный температурно-временной режим криогенного воздействия.

Исследование процесса ОКВ в идеальном охлаждающем устройстве позволит конкретизировать основные параметры технологического процесса – температура газа и продолжительность охлаждения. Такая конкретизация имеет принципиальное значение, так как технология ОКВ не имеет четкого определения. Разброс температур теплоносителя, рекомендуемых разными источниками, составляет около 100 К и колеблется от 90 до 180 К. В последнее время для реализации криотерапии предлагают аппаратуру с рабочей температурой 190, 210 и даже 240 К.

Уровень рабочей температуры определяется возможностями конкретной системы криостатирования. Высокие температуры характерны для комплексов с компрессионными системами криостатирования, и ес-

ли для отвода теплоты используется азотный квазицикл, то температура газа составляет около 140 К.

В зависимости от уровня температуры газа рекомендуется различная продолжительность охлаждения: 1,5 минуты при 90 К, 3 минуты при 140 К, 4–4,5 минуты при 170 К. Разброс технологических параметров говорит о том, что общего представления о целях ОКВ не существует. Постановка эксперимента по моделированию ОКВ при разных температурах позволяет сформировать обоснованное представление об оптимальной технологии.

Цель лабораторной работы

Целью лабораторной работы является:

- исследование влияния выбора температуры криогенного теплоносителя на нестационарный перенос теплоты в объектах ОКВ;
- определение максимально допустимой продолжительности ОКВ τ_{\max} при различных температурах теплоносителя;
- исследование тепловых потоков с поверхности и через внутренние границы объекта ОКВ;
- оценка изменения полученных температур объекта при максимально допустимой продолжительности ОКВ и различных температурах газа;
- составление локальных и интегральных тепловых балансов для иллюстрации влияния температуры теплоносителя.

Порядок выполнения лабораторной работы

Лабораторная работа выполняется методом вычислительного эксперимента. В эксперименте используются алгоритмы и программные продукты, разработанные при выполнении предыдущей лабораторной работы, в частности методы расчета коэффициента конвективной теплоотдачи, математическая модель оболочки человеческого тела, условия однозначности.

Широкое применение готовых продуктов сокращает время подготовки эксперимента.

Содержание лабораторной работы

Вычислительный эксперимент сводится к последовательному выполнению численного моделирования процесса конвективного охлаждения объекта ОКВ при 10 значениях температуры газа T_1 . Схема процесса охлаждения приведена на рис. 7.

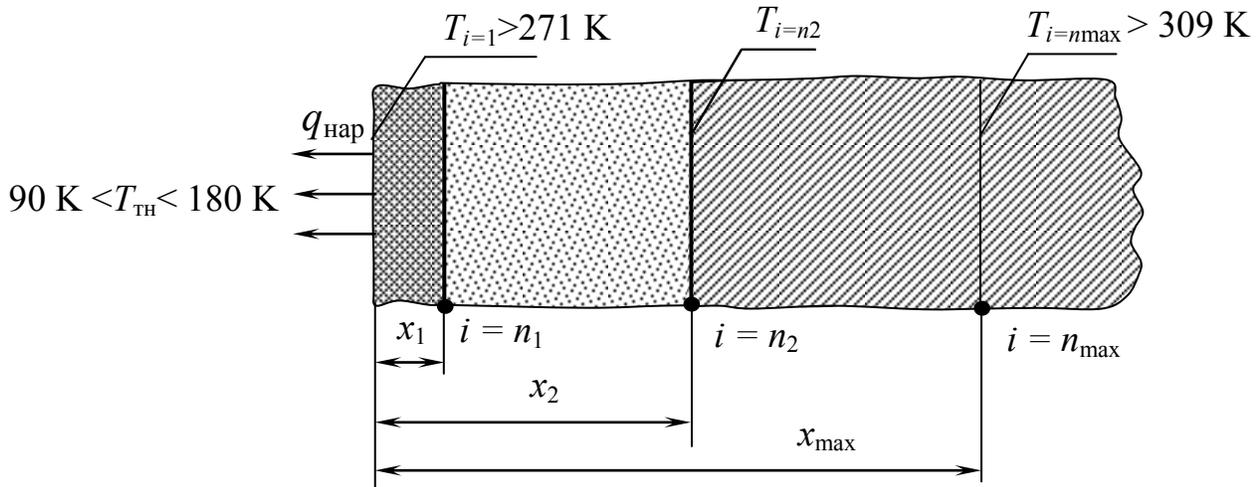


Рис. 7. Схема эксперимента по оптимизации температурного режима охлаждения в условиях естественной конвекции

На математической модели объекта исследований средствами *Excel* выполняется расчет вариантов с различной температурой теплоносителя: $90 \text{ K} \leq T_{\text{TH}} \leq 180 \text{ K}$. Результаты расчета копируются и используются для последующего анализа.

Каждый эксперимент продолжается до тех пор, пока выполнялось условие безопасности:

$$T_{i=1} > 271 \text{ K} \quad \text{и} \quad T_{i=n2} > 309 \text{ K}$$

Граничные условия на поверхности объекта охлаждения определяются температурой теплоносителя $T_{1,j}$. На каждом временном шаге вычисляется текущее значение коэффициента теплоотдачи:

$$\alpha_j = f(T_{1,j}, T_{i=1,j})$$

Порядок подготовки и выполнения эксперимента

Для проведения эксперимента используются разработанные ранее программные продукты. Книга лабораторной работы № 2 создается путем копирования книги «Гипотермия», созданной при выполнении лабораторной работы № 1 под новым названием «Криотерапия», после чего из полученной копии удаляются листы, не нужные для данного эксперимента. Структура листа «Криотерапия» соответствует алгоритму расчета и плохо приспособлена для анализа полученных результатов, поэтому в книгу «Криотерапия» вставляется дополнительный лист «Обработка», на который будут считываться результаты эксперимента. Окончательное содержание книги приведено на рис. 8.

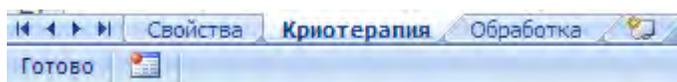


Рис. 8. Содержание Excel – книги «Криотерапия»

Обработка результатов начинается с определения максимально допустимой продолжительности охлаждения τ_{\max} . Для этого используется содержание столбца «Контроль» (столбец P). В случае нарушения условий безопасности двойной логический оператор «ЕСЛИ» возвращает в текущую ячейку сведения о нарушении (см. рис. 9).

| =ЕСЛИ(S28<271;"T1<271";ЕСЛИ(O28<309;"Tn2<309";" ")) | | | | | |
|---|----------|-------|----------|---------|---|
| O | P | Q | R | S | |
| 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 0,2 | |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | |
| 307,8 | 308 | 308,2 | 308,4 | 308,6 | |
| 94500 | 95000 | 95500 | 96000 | 96500 | |
| | | | | | 1 |
| Tn2 | Контроль | | qконв | Ti=1 | |
| 310 | | 1 | 1490,301 | 306 | |
| 309,958 | | 1 | 1478,408 | 305,243 | |
| 309,946 | | 1 | 1471,366 | 304,794 | 1 |

Рис. 9. Определение допустимой продолжительности охлаждения

На листе «Криотерапия» в ячейке H24 вводится формула для определения безопасной продолжительности охлаждения (см. рис. 10). При этом анализируется столбец «Индекс» (столбец Q), который может принимать значения 1 – безопасное охлаждение или 0 – продолжение охлаждения, что связано с опасностью переохлаждения тела или обморожения кожи (см. рис. 11).

| H24 | | fx =СЧЁТЕСЛИ(Q28:Q347;1) | | | |
|-----|-------|--------------------------|-------|-------|-------|
| | F | G | H | I | J |
| 21 | 306 | 306,2 | 306,4 | 306,6 | 306,8 |
| 22 | 90000 | 90500 | 91000 | 91500 | 92000 |
| 23 | | | | | |
| 24 | | τ_{max} | 257 | | |
| 25 | | | | | |

Рис. 10. Автоматическое определение максимальной продолжительности охлаждения при всех температурах газа

| Q28 | | fx =ЕСЛИ(S28<271;0;ЕСЛИ(O28<309;0;1)) | | | | | |
|-----|----------|---------------------------------------|----------|---------|----------|--------|-------|
| | L | M | N | O | P | Q | R |
| 26 | 329220,3 | 144,5838 | 20677,51 | | | | |
| 27 | Qконв | qn2 | Qn2 | Tn2 | Контроль | Индекс | qкон |
| 28 | 0 | 0 | 0 | 310 | | 1 | 1490, |
| 29 | 1490,301 | 39,1285 | 39,1285 | 309,958 | | 1 | 1478, |
| 30 | 2968,709 | 31,67773 | 70,80623 | 309,946 | | 1 | 1471, |
| 31 | 4440,075 | 41,57411 | 112,3803 | 309,93 | | 1 | 1465, |

Рис. 11. Автоматическое определение эффективности охлаждения

Учитывая то, что эксперимент должен характеризовать тепловые потоки в объекте исследований, определяется тепловой поток с поверхности объекта $q_{конв} = f(\tau)$ (см. рис. 12). Ячейки столбца I содержат значение коэффициента теплоотдачи, столбца S – температуру объекта на внутренней границе жирового слоя, столбца В – температуру теплоносителя. По данным о текущей величине $q_{конв}$ определяется количество теплоты, отведенной с поверхности объекта $Q_{конв} = f(\tau)$ (см. рис. 13).

| R28 | | fx | | =I28*(S28-B28) | |
|-----|--------|----------|---------|----------------|----|
| | Q | R | S | T | |
| 26 | | | 1 | | |
| 27 | Индекс | qконв | Ti=1 | h | |
| 28 | 1 | 1490,301 | 306 | 129600 | |
| 29 | 1 | 1478,408 | 305,243 | 126875,5 | 59 |
| 30 | 1 | 1471,366 | 304,794 | 125259,94 | |

Рис. 12. Определение теплового потока с поверхности объекта

| fx | | =L28+R28*\$B\$24 | | |
|----|----------|------------------|----------|----------|
| | K | L | M | N |
| | | | | |
| | 12,66974 | 329220,3 | 144,5838 | 20677,51 |
| | тэфф | Qконв | qn2 | Qn2 |
| 87 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 69 | 0,01587 | 1490,301 | 39,1285 | 39,1285 |
| 05 | 0,032439 | 2968,709 | 31,67773 | 70,80623 |
| 94 | 0,049444 | 4440,075 | 41,57411 | 112,3803 |
| 27 | 0,066828 | 5905,308 | 38,68870 | 151,0671 |

Рис. 13. Определение теплоты, отводимой с поверхности объекта

Суммарное количество отведенной теплоты:

$$Q_{\text{конв}} = \sum_{\tau=0}^{\tau=\tau_{\text{max}}} q_{\text{конв}}$$

определяется при помощи функции «СМЕЩ», которая возвращает значение, соответствующее моменту окончания охлаждения при $\tau = \tau_{\text{max}}$ ячейки столбца Н. Для рассматриваемого примера это ячейка Н285 (28+257) (см. рис. 14).

| L26 | | fx =СМЕЩ(Л28;Ш\$24;0) | | | | |
|-----|--------------|-----------------------|----------|----------|--------------|----------|
| | G | H | I | J | K | L |
| 24 | τ_{max} | 257 | | | | |
| 25 | | | | | | |
| 26 | | | | | 12,66974 | 329220,3 |
| 27 | n | Nu | α | l | $\tau_{эфф}$ | Qконв |
| 28 | 0,33 | 690,956 | 11,82779 | 0,01587 | 0 | 0 |
| 29 | 0,33 | 689,584 | 11,8043 | 0,016569 | 0,01587 | 1490,301 |

Рис. 14. Суммарное количество отведенной теплоты с поверхности объекта

Аналогичным способом по матрице значений $q_{n_2} = f(\tau)$ (столбец M) в ячейке M26 определяется тепловой поток на внутренней границе жирового слоя (см. рис. 15), а в ячейке N26 – суммарный отвод теплоты от ядра тела за время эксперимента:

$$Q_{n_2} = \sum_{\tau=0}^{\tau=\tau_{max}} q_{n_2}$$

| M26 | | fx =СМЕЩ(М28;Ш\$24;0) | | | | | | |
|-----|--------------|-----------------------|----------|----------|--------------|----------|----------|----------|
| | G | H | I | J | K | L | M | N |
| 23 | | | | | | | | |
| 24 | τ_{max} | 257 | | | | | | |
| 25 | | | | | | | | |
| 26 | | | | | 12,66974 | 329220,3 | 144,5838 | 20677,51 |
| 27 | n | Nu | α | l | $\tau_{эфф}$ | Qконв | qn2 | Qn2 |
| 28 | 0,33 | 690,956 | 11,82779 | 0,01587 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 29 | 0,33 | 689,584 | 11,8043 | 0,016569 | 0,01587 | 1490,301 | 39,1285 | 39,1285 |

Рис. 15. Тепловой поток на внутренней границе жирового слоя

Для сохранения полученных результатов и их дальнейшего использования для составления отчета на листе «Обработка» формируется массив выходных данных при $\tau = \tau_{max}$:

- эффективное время криотерапии, $\tau_{эфф}$;
- расчетная продолжительность охлаждения, τ_{max} ;

- тепловой поток с поверхности, $q_{\text{конв}}$;
- теплота, отведенная с поверхности $Q_{\text{конв}}$;
- тепловой поток на внутренней границе жирового слоя, q_{n2} ;
- теплота, отведенная с внутренней границы жирового слоя, Q_{n2} ;
- температура поверхности, $T_{i=1}$;
- температура на внутренней границе жирового слоя, $T_{i=n2}$.

Для этого в ячейку F3 вводится температура теплоносителя, по которой проводится считывание с экспериментального листа «Криотерапия» основных данных о состоянии объекта в момент завершения эксперимента (см. рис. 16).

| | C | D | E | F |
|----|--|---|---|-------------|
| 1 | | | | |
| 2 | | | | |
| 3 | Температура теплоносителя | | | 180 |
| 4 | Эффективное время криотерапии | | | 12,7 |
| 5 | Расчетная продолжительность охлаждения | | | 257 |
| 6 | Тепловой поток с поверхности | | | 1490,3 |
| 7 | Теплота, отведенная с поверхности | | | 329220,3 |
| 8 | Тепловой поток на внутренней границе жирового слоя | | | 144,6 |
| 9 | Теплота, отведенная с внутренней границы жирового слоя | | | 20677,5 |
| 10 | Температура поверхности | | | 11,76810879 |
| 11 | Температура на внутренней границе жирового слоя | | | 35,99833962 |
| 12 | | | | |
| 13 | | | | |

Рис. 16. Результаты эксперимента

Далее считываются массивы температур поверхности и внутренней границы жирового слоя, преобразуя эти значения в градусы Цельсия (см. рис. 17). Для сохранения данных необходимо скопировать в любой другой столбец (например, S) массив значений температуры поверхности, как наиболее информативный, используя команду «Специальная вставка».

| F16 | | fx | | =ЕСЛИ(D16<=\$F\$5;Криотерапия!S28-273;" ") | |
|-----|--|----|--------|--|----------|
| | C | D | E | F | G |
| 4 | Эффективное время криотерапии | | | 12,7 | |
| 5 | Расчетная продолжительность охлаждения | | | 257 | |
| 6 | Тепловой поток с поверхности | | | 1490,3 | |
| 7 | Теплота, отведенная с поверхности | | | 329220,3 | |
| 8 | Тепловой поток на внутренней границе жирового слоя | | | 144,6 | |
| 9 | Теплота, отведенная с внутренней границы жирового слоя | | | 20677,5 | |
| 10 | Температура поверхности | | | 11,76810879 | |
| 11 | Температура на внутренней границе жирового слоя | | | 35,99833962 | |
| 12 | | | | | |
| 13 | | | | | |
| 14 | | | τ | $T_{i=1}$ | T_{n2} |
| 15 | | | | | |
| 16 | | | 0 | 33 | 37 |
| 17 | | | 1 | 32,24319515 | 36,95756 |
| 18 | | | 2 | 31,79442695 | 36,9463 |
| 19 | | | 3 | 31,40871018 | 36,93011 |

Рис. 17. Формирование массивов температур

Для определения оптимальной температуры теплоносителя необходимо многократно повторить эксперимент. Последовательно изменяя значения температуры теплоносителя в ячейке F3 в пределах от 80 до 180 К с заданным шагом 10 К, создается итоговый массив выходных данных. Эти данные (см. табл. 2) далее переносятся в редактор Word для составления отчета о лабораторной работе.

Кроме табл. 2 отчет должен содержать комментарии полученных результатов, выводы и рекомендации по выбору оптимальной температуры газа. Для подтверждения рекомендаций в отчете о лабораторной работе необходимо привести графические иллюстрации:

- диаграмму изменения температуры поверхности: $T_{i=1} = f(\tau)$. Например, на рис. 18 приведена диаграмма изменения температуры поверхности при температуре теплоносителя 180 К, а на рис. 18 – диаграмма изменения температуры на внутренней границе жирового слоя при температуре теплоносителя 180 К;

- диаграмму изменения теплового потока с поверхности объекта охлаждения: $q_{\text{конв},j} = f(\tau)$;

- диаграмму распределения температуры в элементарных точках: $T_i = f(x_i)$ при τ_{max} ;

- построить диаграммы: $\tau_{ЭФ} = f(T_1)$ (см. рис. 20) и $\tau_{max} = f(T_1)$ (см. рис. 21).

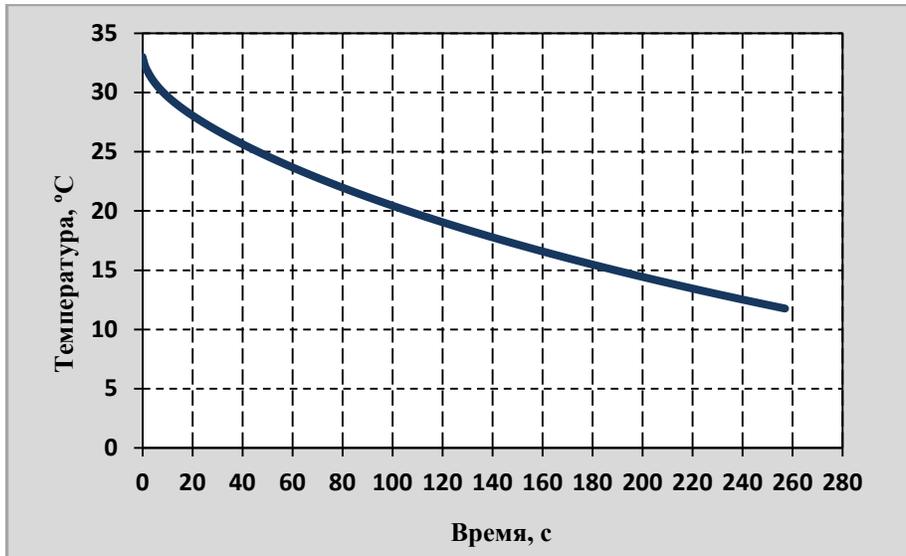


Рис. 18. Зависимость температуры поверхности объекта охлаждения от времени при температуре теплоносителя 180 К

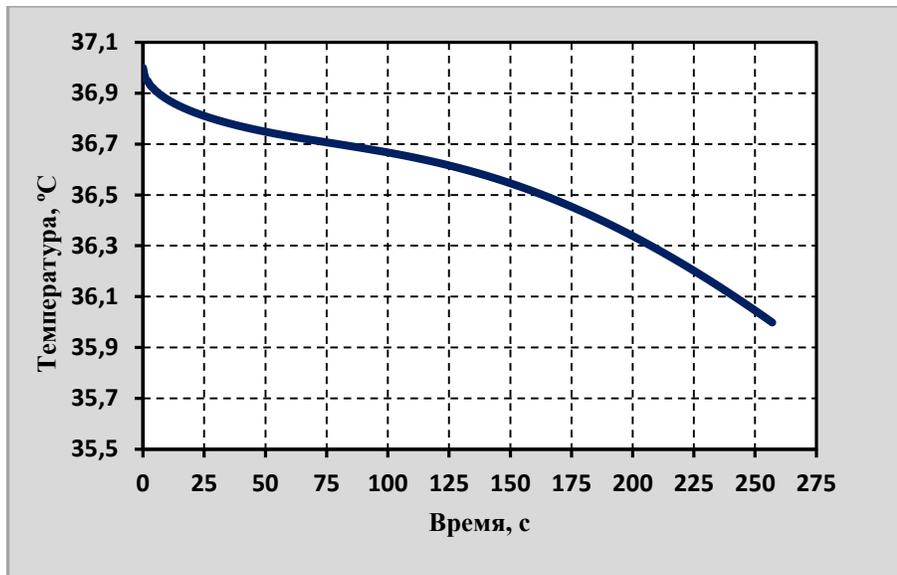


Рис. 19. Зависимость температуры на внутренней границе жирового слоя от времени при температуре теплоносителя 180 К

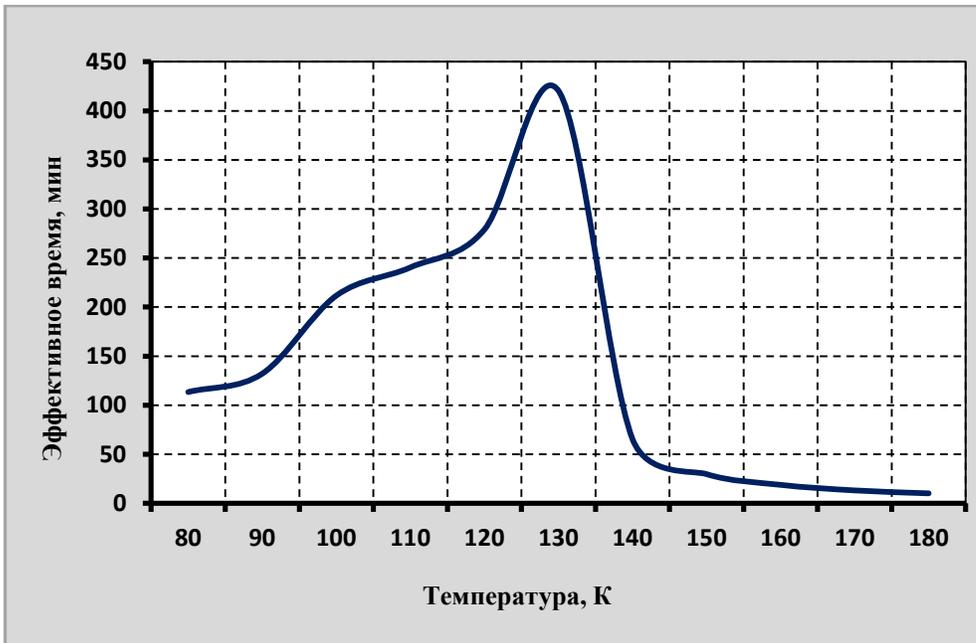


Рис. 20. Зависимость величины эффективного времени от температуры теплоносителя

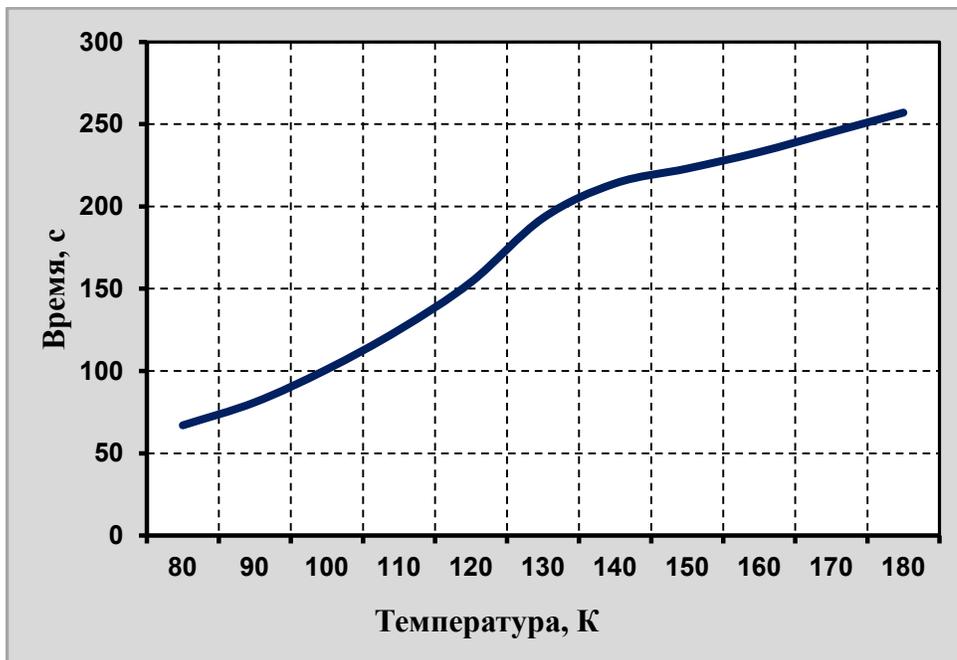


Рис. 21. Зависимость продолжительности процедур от температуры теплоносителя

Таблица 2

Результаты численного эксперимента

| Вычисляемые параметры, единицы измерения | Температура теплоносителя, К | | | | | | | | | | |
|---|------------------------------|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | 80 | 90 | 100 | 110 | 120 | 130 | 140 | 150 | 160 | 170 | 180 |
| Расчетная продолжительность охлаждения, τ_{max} , с | | | | | | | | | | | |
| Температура поверхности, $t_{i=1}$ при $\tau=\tau_{max}$, °С | | | | | | | | | | | |
| Температура на внутренней границе жирового слоя, t_{n2} при $\tau=\tau_{max}$, °С | | | | | | | | | | | |
| Тепловой поток с поверхности, $q_{конв}$ при $\tau=0$, кВт/м ² | | | | | | | | | | | |
| Тепловой поток на внутренней границе жирового слоя, q_{n2} при $\tau=\tau_{max}$, кВт/м ² | | | | | | | | | | | |
| Эффективное время криотерапии, мин | | | | | | | | | | | |
| Теплота, отведенная с поверхности, $Q_{конв}$ при $\tau=\tau_{max}$, кДж/м ² | | | | | | | | | | | |
| Теплота, отведенная с внутренней границы жирового слоя, Q_{n2} при $\tau=\tau_{max}$, кДж/м ² | | | | | | | | | | | |

Контрольные вопросы к лабораторной работе № 2

1. По какому критерию определяется оптимальная температура теплоносителя?
2. Как изменяется безопасная продолжительность процедур при повышении температуры?
3. Как определяется безопасная продолжительность охлаждения?
4. Как изменяется величина эффективного времени при повышении температуры теплоносителя?
5. Почему зависимость величины эффективного времени от температуры имеет максимум?
6. Почему величина эффективного времени монотонно убывает при снижении температуры от оптимальной до 80 К?
7. Почему величина эффективного времени резко снижается при превышении оптимального температурного уровня?
8. Каковы причины прекращения процесса охлаждения при выборе температуры выше оптимальной?
9. Каковы причины прекращения процесса охлаждения при выборе температуры ниже оптимальной?
10. Каковы причины прекращения процесса охлаждения при оптимальном значении температуры теплоносителя?
11. Как определить минимальную продолжительность эффективного воздействия?
12. Какой диапазон температур следует рекомендовать для использования в криотерапевтических установках? На 20–30 К выше оптимальной температуры или на 20–30 К ниже оптимальной температуры?
13. Почему процедуры охлаждения в газовой среде с температурой выше оптимальной называют криогенной газовой гипотермией?
14. Почему процедуры охлаждения в газовой среде с температурой на 30–50 К ниже оптимальной называют экстремальной криотерапией?
15. Какое количество теплоты отводится от поверхности тела при экстремальной криотерапии?

16. Какое количество теплоты отводится от поверхности тела при криогенной газовой гипотермии?

17. Какие физические факторы определяют величину оптимальной температуры общего криотерапевтического воздействия?

18. Какие субъективные факторы определяют величину оптимальной температуры общего криотерапевтического воздействия?

19. Как масса тела пациента влияет на значение оптимальной температуры общего криотерапевтического воздействия?

20. Как можно повысить эффективность общего криотерапевтического воздействия?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Основной

1. **Исаченко В.А., Осипова А.С., Сукомел А.С.** Теплопередача. – М.: Энергоиздат, 1981. – 416 с.
2. **Пасконов В.М., Полежаев В.И., Чудов Л.А.** Численное моделирование процессов тепло- и массообмена. – М.: Наука, 1984. – 357 с.
3. **Акулов А.А., Борзенко Е.И., Зайцев А.В.** Теплофизические свойства криопродуктов: Учеб. пособие для вузов. – СПб.: Политехника, 2001. – 243 с.
4. **Турчак Л.И., Плотников П.В.** Основы численных методов: Учеб. пособие. – М.: Физматлит, 2003. – 349 с.

Дополнительный

5. **Максимов А.В., Кирьянова В.В.** Аэрокриотерапия: Учеб. пособие. – СПб.: МАПО, 2000. – 20 с.
6. **Терновой К.С., Гассанов Л.Г., Земсков В.С.** и др. Низкие температуры в медицине. – Киев: Наукова Думка, 1980. – 280 с.
7. **Цыганов Д.И.** Криомедицина: процессы и аппараты: Монография. – М.: САЙНС-ПРЕСС, 2011. – 304 с.

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|--|----|
| ВВЕДЕНИЕ | 3 |
| ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1 ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ ОБОЛОЧКИ ТЕЛА ЖИДКИМ ИЛИ ГАЗООБРАЗНЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ..... | 3 |
| Цель лабораторной работы..... | 4 |
| Выбор методики исследований..... | 4 |
| ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОБЪЕКТА ОХЛАЖДЕНИЯ | 5 |
| МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОБЪЕКТА ОХЛАЖДЕНИЯ | 6 |
| Порядок выполнения лабораторной работы | 10 |
| Ввод стандартных данных..... | 10 |
| Вычисление изменения энтальпии и температуры узловых точек..... | 13 |
| Контрольные вопросы к лабораторной работе № 1 | 14 |
| ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ КРИОГЕННОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В УСТАНОВКАХ ОБЩЕЙ КРИОТЕРАПИИ..... | 16 |
| Цель лабораторной работы..... | 17 |
| Порядок выполнения лабораторной работы | 17 |
| Содержание лабораторной работы..... | 18 |
| Порядок подготовки и выполнения эксперимента..... | 19 |
| Контрольные вопросы к лабораторной работе № 2 | 28 |
| СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ..... | 30 |

Миссия университета – генерация передовых знаний, внедрение инновационных разработок и подготовка элитных кадров, способных действовать в условиях быстро меняющегося мира и обеспечивать опережающее развитие науки, технологий и других областей для содействия решению актуальных задач.

ИНСТИТУТ ХОЛОДА И БИОТЕХНОЛОГИЙ



Институт холода и биотехнологий является преемником Санкт-Петербургского государственного университета низкотемпературных и пищевых технологий (СПбГУНиПТ), который в ходе реорганизации (приказ Министерства образования и науки Российской Федерации № 2209 от 17 августа 2011г.) в январе 2012 года был присоединен к Санкт-Петербургскому национальному исследовательскому университету информационных технологий, механики и оптики.

Созданный 31 мая 1931года институт стал крупнейшим образовательным и научным центром, одним из ведущих вузов страны в области холодильной, криогенной техники, технологий и в экономике пищевых производств.

За годы существования вуза сформировались известные во всем мире научные и педагогические школы. В настоящее время фундаментальные и прикладные исследования проводятся по 20 основным научным направлениям: научные основы холодильных машин и термотрансформаторов; повышение эффективности холодильных установок; газодинамика и компрессоростроение; совершенствование процессов, машин и аппаратов криогенной техники; теплофизика; теплофизическое приборостроение;

машины, аппараты и системы кондиционирования; хладостойкие стали; проблемы прочности при низких температурах; твердотельные преобразователи энергии; холодильная обработка и хранение пищевых продуктов; тепломассоперенос в пищевой промышленности; технология молока и молочных продуктов; физико-химические, биохимические и микробиологические основы переработки пищевого сырья; пищевая технология продуктов из растительного сырья; физико-химическая механика и тепло-и массообмен; методы управления технологическими процессами; техника пищевых производств и торговли; промышленная экология; от экологической теории к практике инновационного управления предприятием.

На предприятиях холодильной, пищевых отраслей реализовано около тысячи крупных проектов, разработанных учеными и преподавателями института.

Ежегодно проводятся международные научные конференции, семинары, конференции научно-технического творчества молодежи.

Издаются научно-теоретический журнал «Вестник Международной академии холода» и Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Холодильная техника и кондиционирование», Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств», Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Экономика и экологический менеджмент».

В вузе ведется подготовка кадров высшей квалификации в аспирантуре и докторантуре.

Действуют два диссертационных совета, которые принимают к защите докторские и кандидатские диссертации.

Вуз является активным участником мирового рынка образовательных и научных услуг.

www.ifmo.ru

ihbt.ifmo.ru

Баранов Александр Юрьевич
Малышева Татьяна Алексеевна
Сидорова Анастасия Юрьевна

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ УСТАНОВКАХ МЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Учебно-методическое пособие

Ответственный редактор
Т.Г. Смирнова

Титульный редактор
Р.А. Сафарова

Компьютерная верстка
Д.Е. Мышковский

Дизайн обложки
Н.А. Потехина

Печатается
в авторской редакции

Подписано в печать 31.03.2015. Формат 60×84 1/16
Усл. печ. л. 2,09. Печ. л. 2,25. Уч.-изд. л. 1,94
Тираж 50 экз. Заказ № С 26

Университет ИТМО. 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49

Издательско-информационный комплекс
191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9