



#### 4. Исследование процессов теплообмена в системе «человек – окружающая среда»

В данной части работы рассмотрены результаты исследований основных закономерностей теплообмена в системе «человек – окружающая среда» в режиме охлаждения в воздушной и водной среде, а так же приведен анализ эффективности термического сопротивления слоя теплоизоляции и средств защиты от холода. Исследуется влияние параметров окружающей среды, таких как температура, давление и скорость, а так же влияние мощности внутренних источников тепла на тепловые процессы.

##### 4.1. Исследование влияния параметров окружающей среды

###### Методика расчета коэффициентов теплоотдачи с учетом теплофизических свойств среды

При исследовании влияния параметров окружающей среды на процесс теплообмена в системе «человек – окружающая среда» используются следующие зависимости для расчета коэффициента теплоотдачи.

###### *Коэффициент теплоотдачи для свободной конвекции:*

$$Nu_{дж} = C(Gr_{дж} Pr_{ж})^m (Pr_{ж}/Pr_c)^{0,25},$$

$$Gr_{дж} = g\beta\Delta t \frac{d^3}{\nu^2}$$

где  $Nu = \frac{\alpha d}{\lambda}$ ,  $\alpha = \frac{Nu\lambda}{d}$ ,  $d$  – характерный размер, коэффициенты  $C$  и  $m$  зависят от соотношения  $Gr_{дж} Pr_{ж}$ : при  $10^3 < Gr_{дж} Pr_{ж} < 10^8$   $c = 0,5$ ;  $m = 0,25$

###### *Коэффициент теплоотдачи для вынужденной конвекции*

$$Nu_{дж} = C Re_{дж}^m Pr_{ж}^{0,36} (Pr_{ж}/Pr_c)^{0,25},$$

где коэффициенты  $C$  и  $m$  зависят от  $Re$ : при  $Re_{дж} < 10^3$   $c = 0,56$ ;  $m = 0,5$ ; при  $Re_{дж} > 10^3$   $c = 0,28$ ;  $m = 0,6$ .

В качестве эквивалентного диаметра используются диаметры расчетных элементов. Коэффициенты теплоотдачи вычисляются при теплофизических свойствах среды, соответствующих значению температуры на данном интервале времени.

*Теплофизические свойства воздуха* определяются по следующим зависимостям (табл. 4.1).



Таблица 4.1.

**Теплофизические свойства воздуха:**

Параметр	Зависимость
Коэффициент температуропроводности	$\alpha = \frac{1,735 \cdot 10^{-6} \cdot (273 + t)}{9,05 \cdot 10^2}$
Коэффициент теплопроводности	$\lambda = 1,95 \cdot 10^{-4} \cdot (273 + t)^{0,861}$
Динамический коэффициент вязкости	$\mu = \frac{10^{-6} \cdot (273 + t)^{0,75}}{3,93}$
Кинематический коэффициент вязкости	$\nu = \frac{10^{-6} \cdot (273 + t)^{1,75}}{1,387 \cdot 10^3}$
Плотность	$\rho = \frac{P \cdot 10^3}{(273 + t) \cdot R}$
Теплоемкость	$C_p = 0,5 \cdot 10^3 \cdot (273 + t)^{0,121}$
Коэффициент объемного расширения	$\beta = \frac{1}{273 + t}$

**Теплофизические свойства воды** определяются линейной интерполяцией по таблице свойств воды на линии насыщения при атмосферном давлении  $P = 1,013 \cdot 10^5$  (табл. 4.2) [84].

Таблица 4.2.

**Теплофизические свойства воды**

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho,$ кг/м <sup>3</sup>	$C_p,$ кДж/кг·К	$\lambda,$ Вт/м·К	$\alpha \cdot 10^6,$ м <sup>2</sup> /с	$\mu \cdot 10^6,$ Па·с	$\nu \cdot 10^6,$ м <sup>2</sup> /с	$\beta \cdot 10^4,$ 1/К	Pr
0	999,9	4,212	0,560	13,2	1788	1,789	-0,63	13,5
10	999,7	4,191	0,580	13,8	1306	1,306	0,70	9,45
20	998,2	4,183	0,597	14,3	1004	1,006	1,82	7,03
30	995,7	4,174	0,612	14,7	801,5	0,805	3,21	5,45
40	992,2	4,174	0,627	15,1	653,3	0,659	3,87	4,36

**Сравнение процессов теплообмена в воде и в воздухе**

Поражение холодом в воде имеет свои особенности. Оно обусловлено в первую очередь физическими свойствами воды, являющейся к тому же сильным раздражителем нервных рецепторов кожи. Как известно теплоемкость воды в 4 раза, а теплопроводность в 25-26 раз больше таких же свойств воздуха. Поэтому человек в воде теряет значительно больше тепла, чем в воздушной среде такой же температуры.

**Тепловые потери расчетных элементов.** Исследования проводятся при охлаждении в воде и воздухе. Установлено, что при температуре воды 0°C теряется в 5 ... 10 раз больше тепла, чем в воздушной среде такой же температуры, к тому же процесс охлаждения происходит гораздо интенсивнее (рис. 4.1). В результате анализа установлен скачок значений тепловых потоков на начальной стадии охлаждения, который объясняется конвективным

переносом тепла: в первой фазе происходит резкий отток теплоносителя из «оболочки» в «ядро», за счет чего снижается теплоотдача в окружающую среду, а затем в регулярном режиме «ядро» постепенно остывает.

**Вклад составляющих теплового потока** показан на примере одного расчетного элемента (рис. 4.2). Установлено, что в воде основной вклад до 80 % вносит конвективная составляющая, а в воздухе вклад всех составляющих примерно одинаков. При этом доля конвективного переноса тепла с током теплоносителя в воде больше, чем в воздухе.

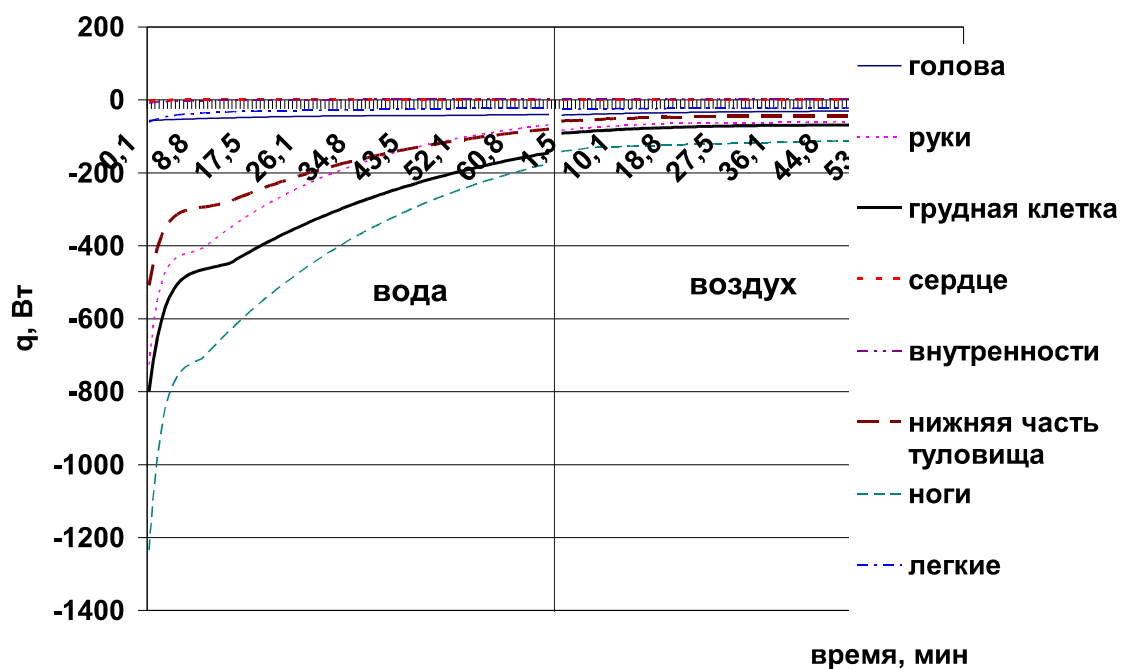


Рис. 4.1. Теплоотдача в окружающую среду в воде и в воздухе для разных расчетных элементов

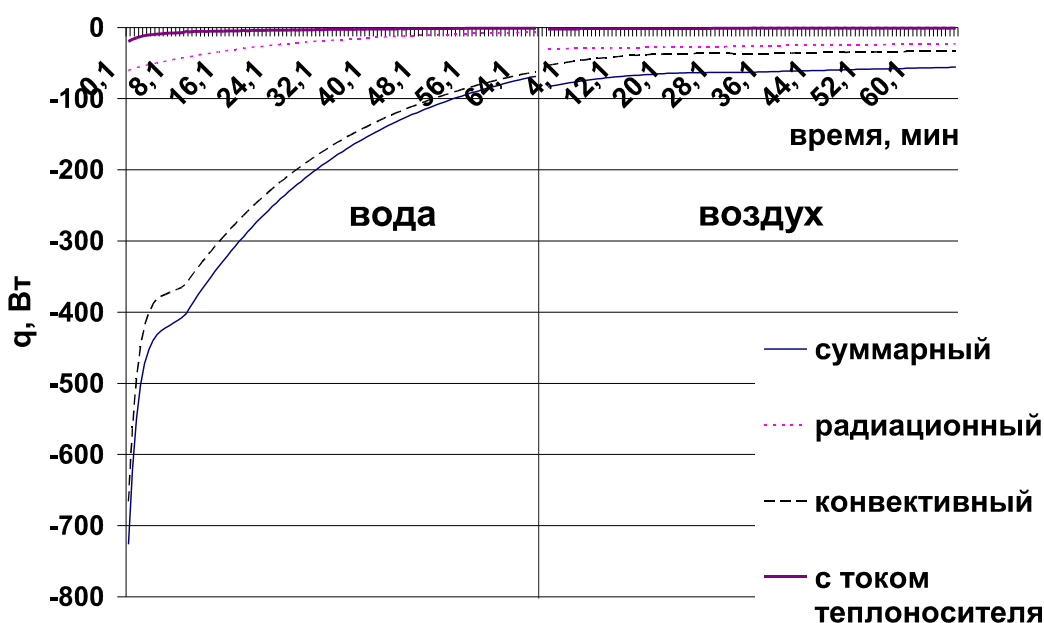


Рис. 4.2. Вклад составляющих теплового потока на примере одного расчетного элемента (руки)

**Среднемассовые температуры «ядра» расчетных элементов.** В связи с тем, что теплоотдача в воде интенсивнее, чем в воздухе, градиент понижения температуры в воде также больше. В задачах погружения человека в ледяную воду критерием оценки времени пребывания является достижение порогового значения температуры  $24\text{ }^{\circ}\text{C}$  (на графике жирная горизонтальная линия). При температуре воды  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  биологический порог температуры достигается уже через 15 минут. Первыми остывают руки, ноги, мышцы верхней и нижней частей туловища, а затем внутренние органы и сердце. За час нахождения в ледяной воде средний слой «ядра» (мышцы) остывает до  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ . В воздухе градиент падения температуры гораздо меньше. Самой низкой температуры  $28\text{ }^{\circ}\text{C}$  за час достигают только руки. Таким образом, расчетные элементы остывают с разной скоростью, что связано с их формой, расположением внутри термодинамической системы, соотношением массы и площади поверхности теплообмена и свойствами окружающей среды. В воде процесс охлаждения проходит в 10 раз интенсивнее, чем в воздухе.

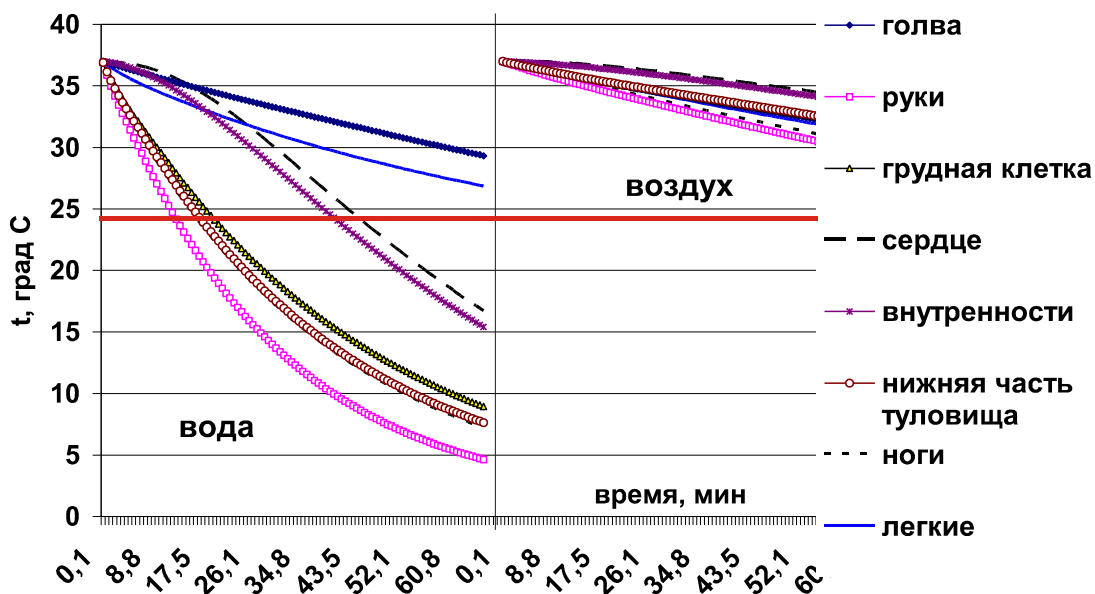


Рис. 4.3. Среднемассовые температуры расчетных элементов

**Среднемассовые температуры «оболочки» расчетных элементов,** в отличие от среднемассовых температур «ядра», различаются в воде и воздухе не так резко. «Оболочка» в воде остывает в 2 раза быстрее, чем в воздухе (рис. 4.4). При этом разные элементы остывают с разной скоростью, что обусловлено различной площадью поверхности теплообмена. Быстрее всего остывает «оболочка» нижней части туловища.

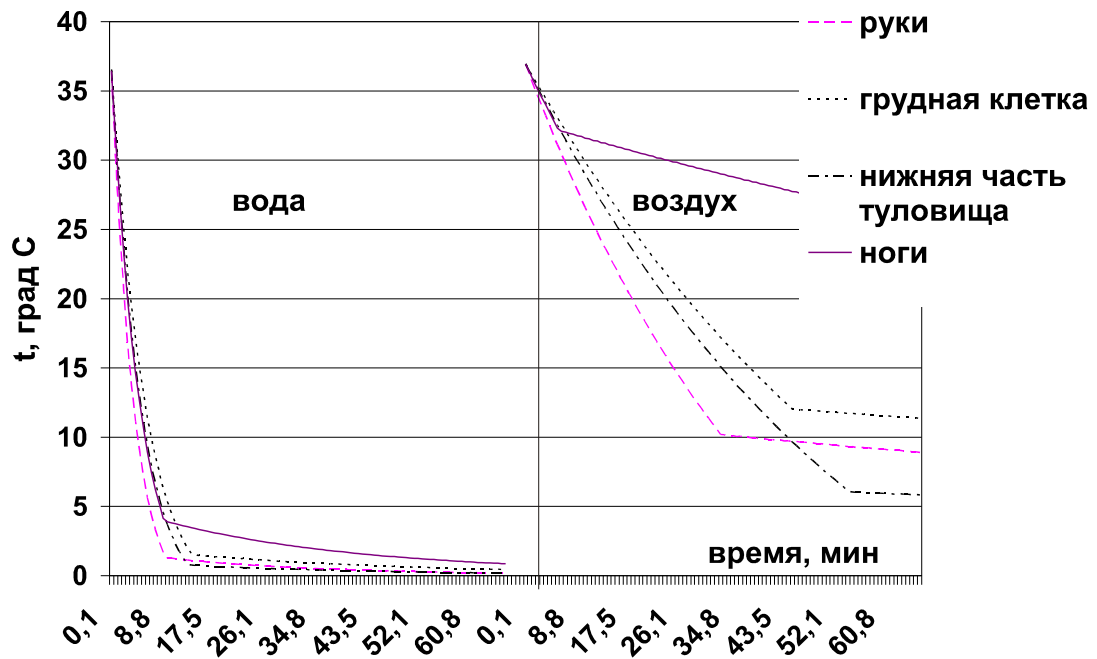


Рис 4.4. Среднемассовые температуры «оболочки» элементов

### Влияние температуры среды на процесс теплообмена

Исследование влияния температуры окружающей среды на процесс теплообмена проводится в воде при температуре 0 °С, 5 °С, 10 °С и 20 °С и в воздухе при температуре -40 °С, -20 °С, 0 °С, 20 °С. Показано, что с увеличением температуры среды теплоотдача уменьшается почти в 2 раза (рис. 4.5) и «ядро» остывает медленнее (рис. 4.6, 4.7). Т.е. увеличение температуры среды приводит к увеличению периода нахождения в воде и в воздухе.

Установлено, что уменьшение температуры воздуха приводит к росту коэффициента теплоотдачи –  $\alpha = 4...5 \text{ Вт/м}^2\text{К}$  на 50...60 % (рис. 4.8). При этом максимальные  $\alpha$  приходятся на конечности, минимальные на элементы туловища – разница составляет 15 ... 60 %. Уменьшение температуры воды приводит к снижению  $\alpha = 250 ... 500 \text{ Вт/м}^2\text{К}$  на 30...40 % (рис. 4.9).

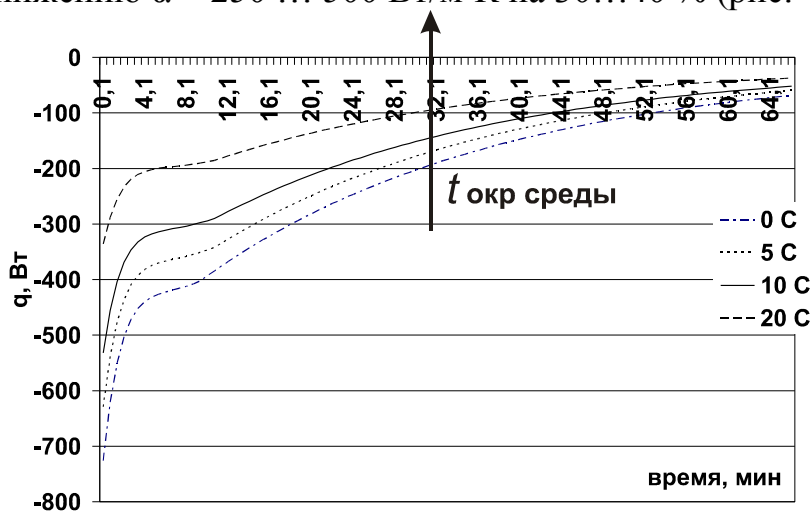


Рис. 4.5. Изменение суммарного теплового потока расчетного элемента в зависимости от температуры воды

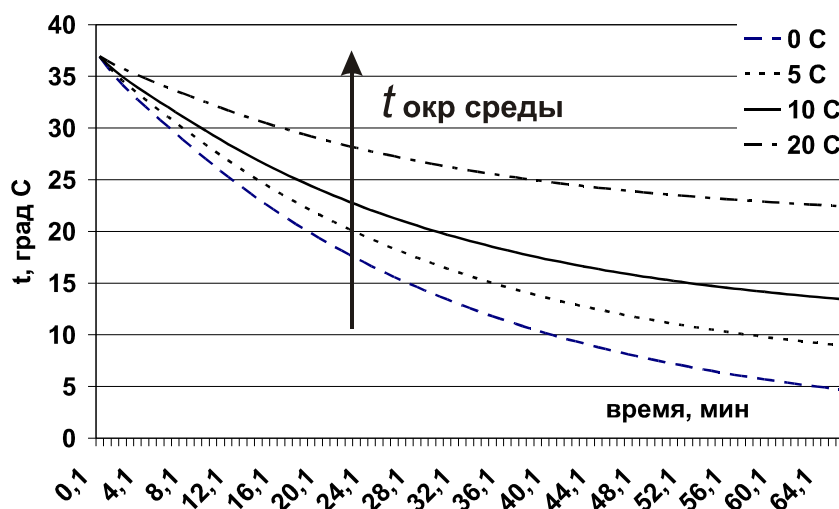


Рис. 4.6. Изменение среднemasсовой температуры расчетного элемента в зависимости от температуры воды

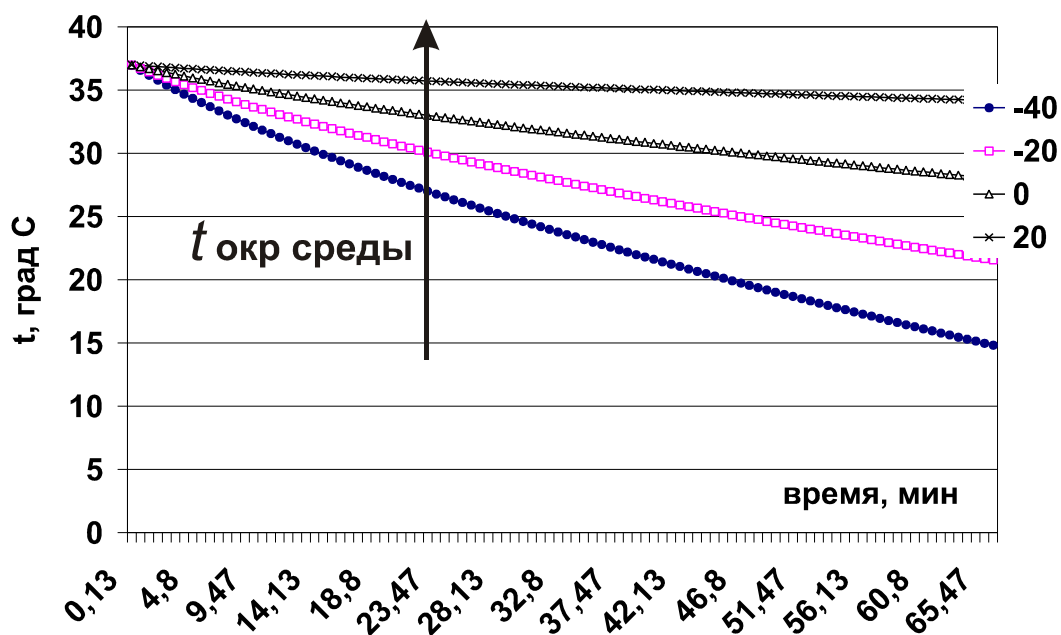


Рис. 4.7. Изменение среднемассовой температуры расчетного элемента в зависимости от температуры воздуха

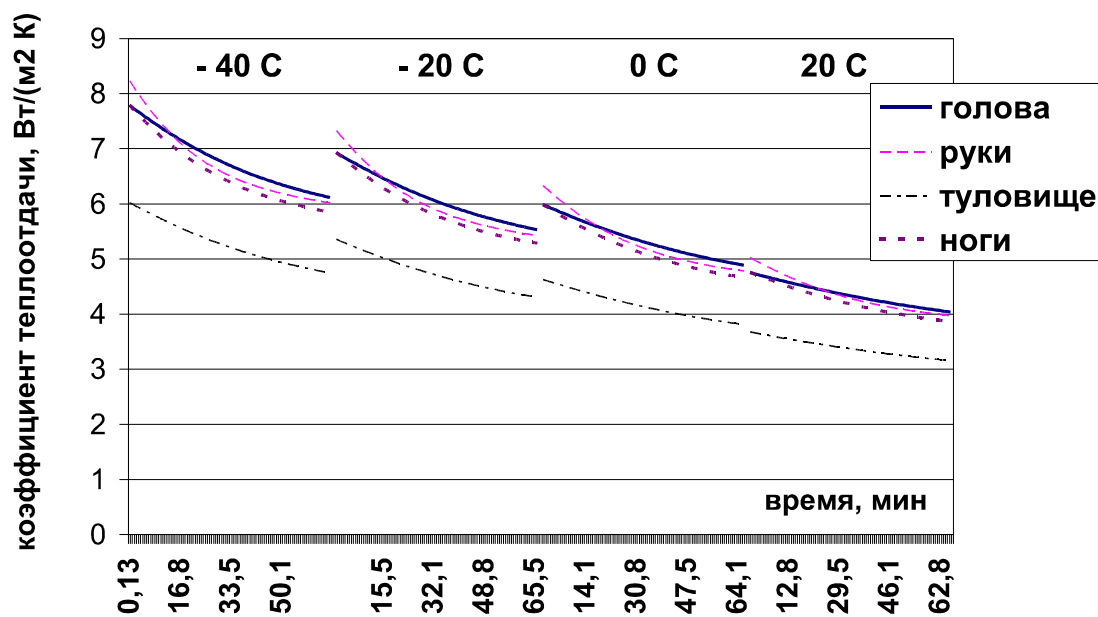


Рис. 4.8. Влияние температуры воздуха на коэффициент теплоотдачи различных расчетных элементов

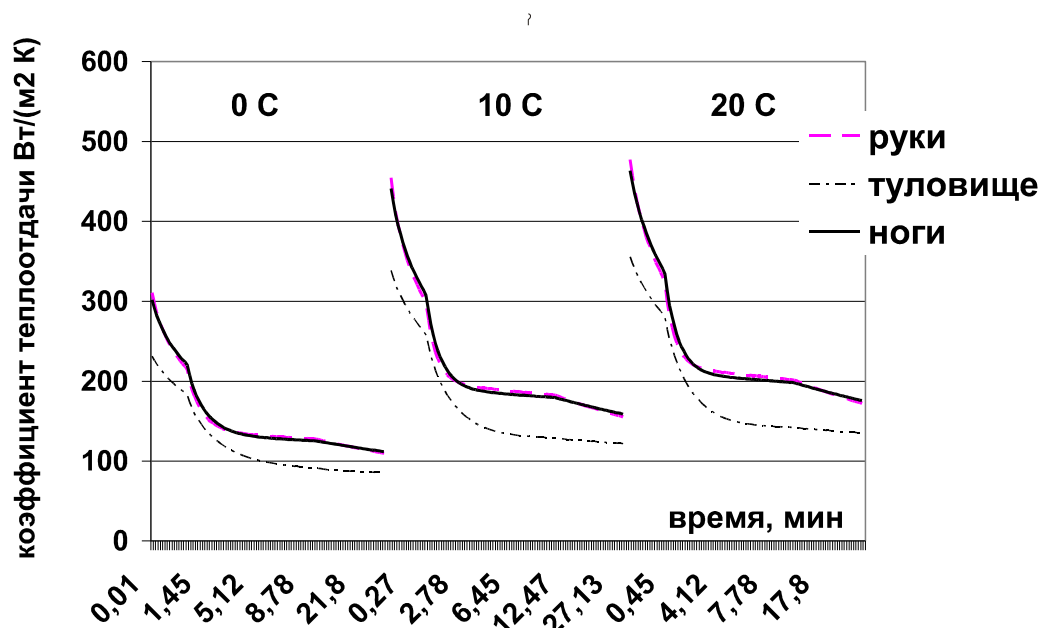


Рис. 4.9. Влияние температуры воды на коэффициент теплоотдачи расчетных элементов

Точки излома на кривых связаны с шагом и интервалом времени на трех участках: первый участок – шаг  $\Delta\tau = 0,1$  с, интервал 30 с; второй участок – шаг  $\Delta\tau = 1$  с, интервал 9,5 мин; третий участок – шаг  $\Delta\tau = 4$  с, интервал 20 мин.

### Влияние давления и скорости среды на процесс теплообмена

*Исследование влияния скорости и давления на процесс теплообмена в воздушной среде.* Расчеты для воздуха выполнены в следующих диапазонах параметров: скорость –  $V = 0 \dots 3$  м/с, давление –  $P = 40 \dots 100$  кПа. Установлено, что увеличение скорости среды  $V$  повышает  $\alpha$  в 4 ... 5 раза (рис. 4.10),  $q$  в 2 ... 3 раза (рис. 4.11). Снижение давления уменьшает  $\alpha$  на 25 %,  $q$  на 10 % (рис 4.12).



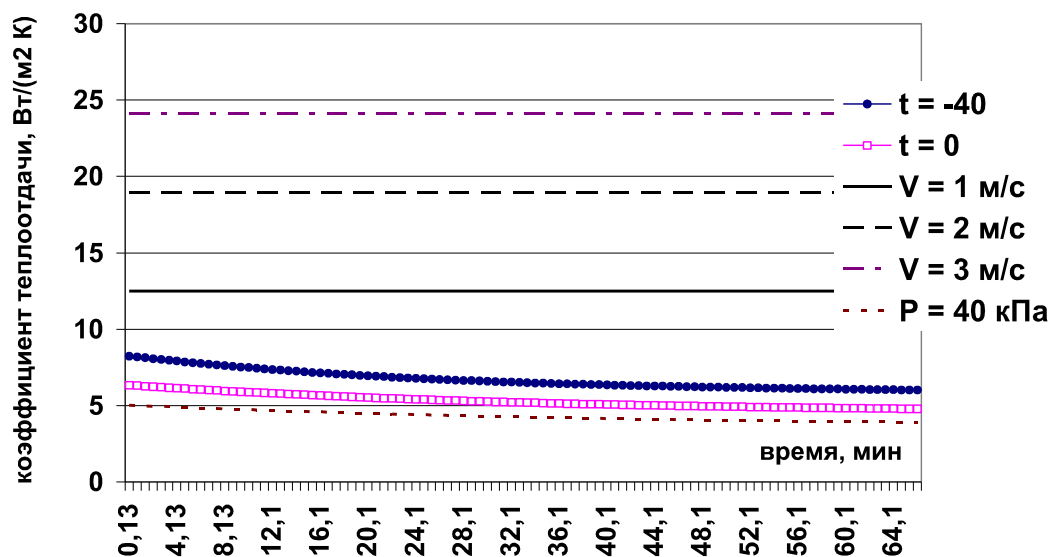


Рис. 4.10. Влияние давления, температуры и скорости среды на коэффициент теплоотдачи расчетного элемента (руки) в воздухе

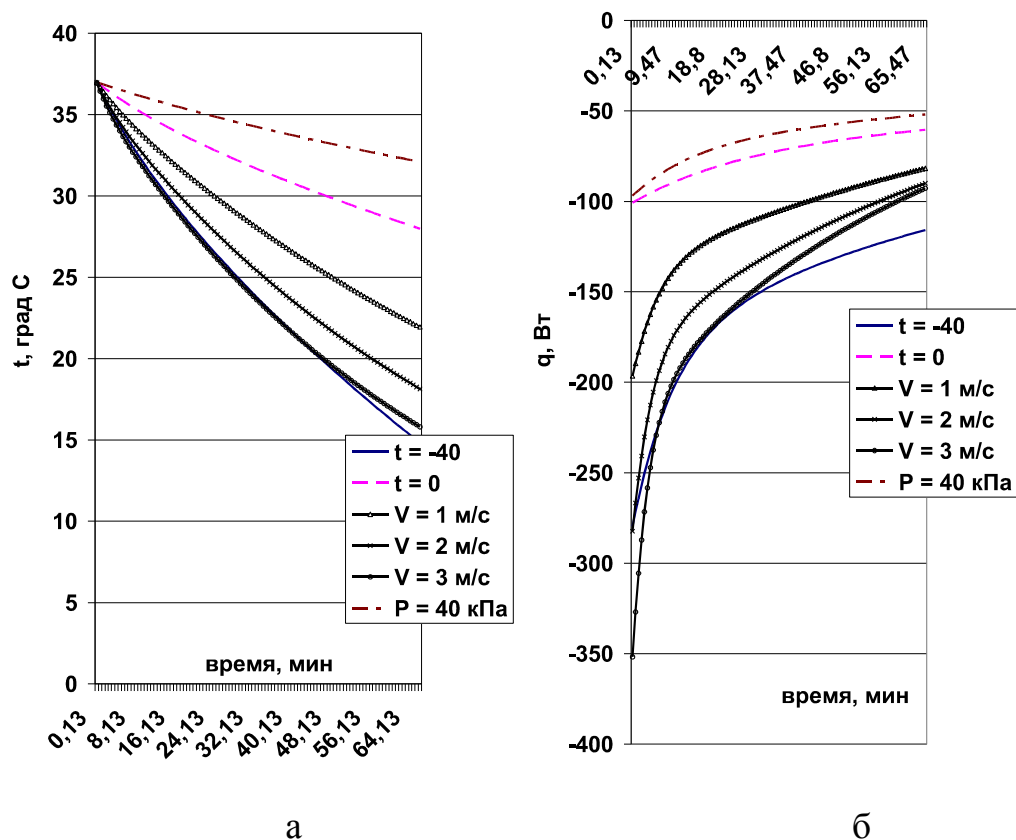


Рис. 4.11. Изменение теплофизических параметров «ядра» расчетного элемента (руки) в воздушной среде: а – среднемассовой температуры; б – тепловых потерь

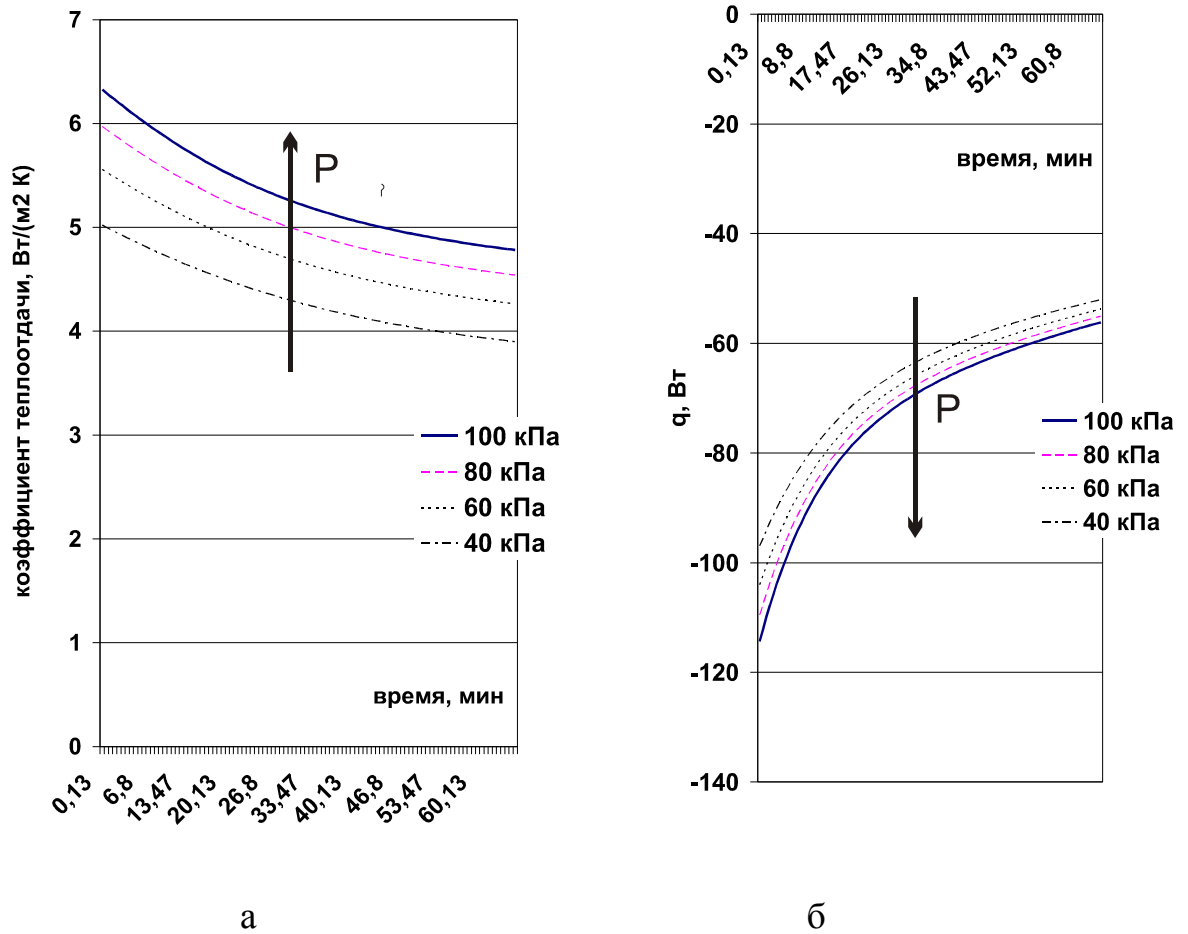


Рис. 4.12. Изменение теплофизических параметров расчетного элемента (руки) в воздушной среде в зависимости от внешнего давления:  
а – коэффициента теплоотдачи; б – тепловых потерь

**Исследование влияния скорости среды на процесс теплообмена в воде.**  
Расчеты для воды выполнены в диапазонах скорости –  $V = 0 \dots 2$  м/с. Установлено, что увеличение скорости среды повышает  $\alpha$  в 5 ... 10 раз (рис. 4.13),  $q$  в 2 ... 3 раза (рис. 4.14).

Сравнение с охлаждением в воздухе показывает резкое увеличение коэффициента теплоотдачи в 20 ... 40 раз и появление двух характерных фаз в процессе охлаждения: начальной (от 1 до 3 минут) – с резким снижением температуры «оболочки» и соответственно  $\alpha$  и  $q$ ; регулярный режим – с плавным охлаждением «ядра» и монотонным снижением  $\alpha$  и  $q$ . Термическое сопротивление «оболочки» в начальной фазе увеличивается до 2 ... 3 раз и сохраняется в регулярном режиме. Таким образом, «оболочка» обладает переменными теплофизическими параметрами и служит «защитным экраном» – теплоизоляцией для «ядра».

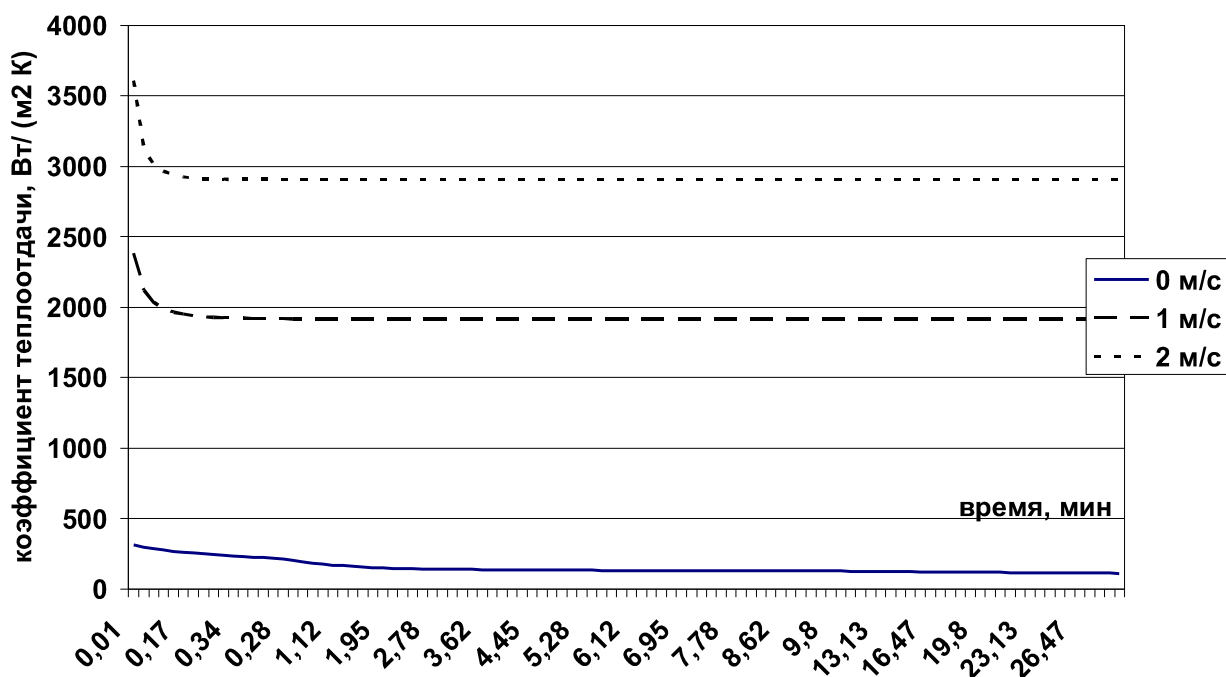


Рис. 4.13. Влияние скорости среды на коэффициент теплоотдачи расчетного элемента (руки) в воде

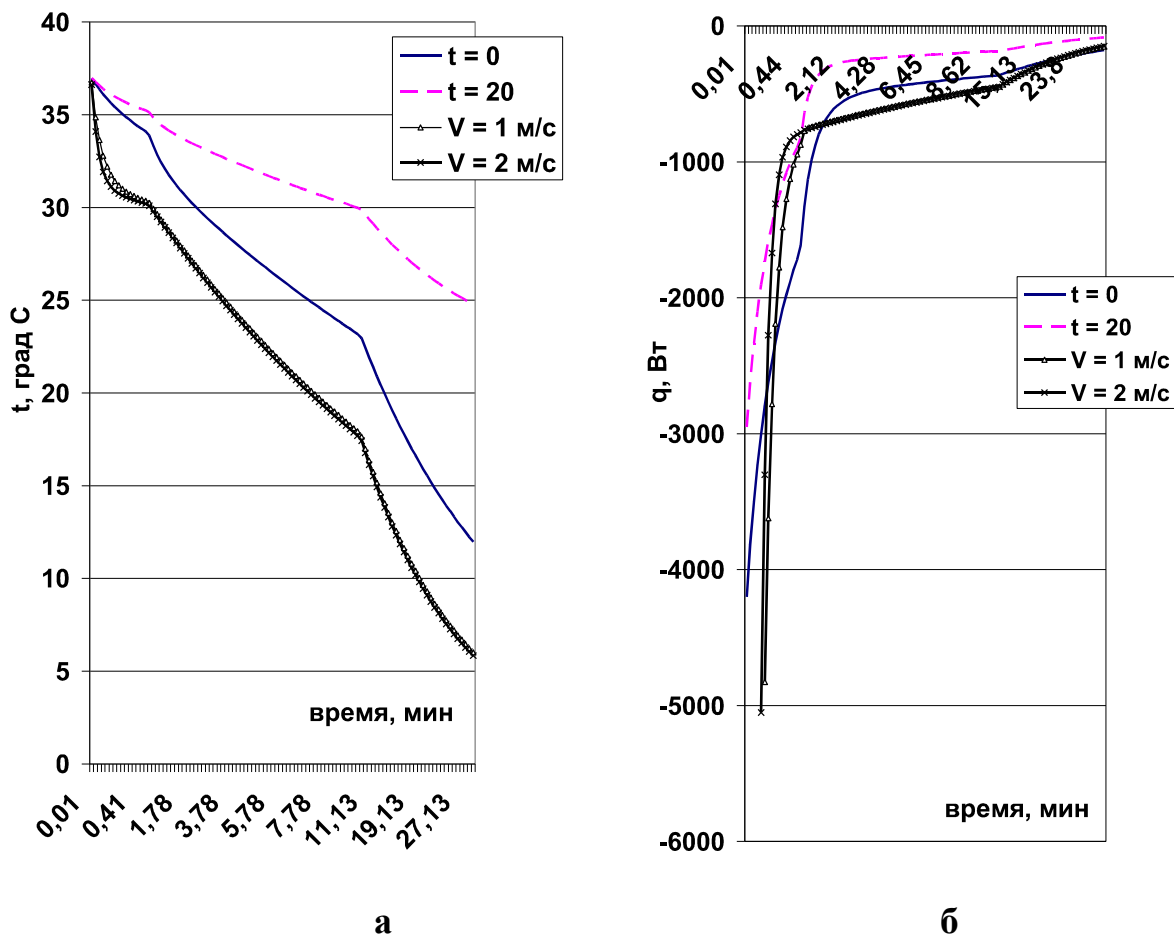


Рис. 4.14. Изменение теплофизических параметров «ядра» расчетного элемента (руки) в водной среде: а – среднемассовой температуры; б – тепловых потерь

#### 4.2. Анализ термического сопротивления теплоизоляции

В данном разделе представлен анализ влияния термического сопротивления теплоизоляции на процесс теплообмена в системе «человек – окружающая среда». Теплоизоляция состоит из двух слоев. Первый – естественный, называемый «оболочкой», второй – искусственный – специальная защитная одежда.

##### Исследование термического сопротивления «оболочки»

«Оболочка» выступает эффективным слоем теплоизоляции и состоит из двух слоев: сети подкожных капилляров системы термостабилизации и жировой прослойки. Сеть подкожных капилляров является активным слоем теплоизоляции и участвует в процессе оттока теплоносителя из «оболочки» в «ядро» в начальной стадии охлаждения с целью уменьшить теплоотдачу в окружающую среду. Жировая прослойка служит пассивным слоем теплоизоляции. Она расположена между активным слоем «оболочки» и



средним слоем «ядра» и является термическим сопротивлением, препятствующим проникновению холода в «ядро» и сохраняющим его температуру.

Чем больше теплоносителя в том или ином слое, тем больше его теплопроводность. Это обусловлено тем, что «ядро», а соответственно и теплоноситель имеют температуру, большую чем «оболочка». Интенсивное поступление теплоносителя в слой вызывает повышение его температуры, и, следовательно, повышение теплоотдачи. В слое пассивной теплоизоляции почти нет трубопроводов гидравлической системы и очень мало теплоносителя, поэтому его теплоизолирующие свойства очень высоки.

При низких температурах «оболочка» и «ядро» ведут себя прямо противоположно. В слое активной теплоизоляции находится до 50 процентов всего теплоносителя (2,5 литра). При действии низких температур трубопроводы гидросистемы сужаются, теплоноситель из них выдавливается в «ядро», температура поверхности «оболочки» уменьшается, и теплопроводность поверхностных слоев снижается. Теплопроводность слоя активной теплоизоляции с прослойкой пассивной теплоизоляции почти в три раза ниже теплопроводности слоя без пассивной прослойки [5].

Признаки, определяющие теплопроводящие свойства «оболочки»:

- «оболочка» представляет собой двухслойную структуру и образована активным и пассивным слоями теплоизоляции;
- наружный ороговевший слой активной теплоизоляции пронизан холодными и тепловыми рецепторами;
- рецепторы регистрируют температуру наружного слоя активной теплоизоляции;
- ткани, образующие «оболочку», для описания переноса теплоты могут быть представлены как параллельные плоскости;
- внутренние тепловыделения слоев равномерно распределены в объеме;
- пассивная теплоизоляция выполняет теплоизолирующую функцию и не продуцирует теплоты.

В условиях теплового комфорта «оболочка» имеет толщину примерно 10 мм; при охлаждении толщина слоя уменьшается, а при нагреве увеличивается.

**Теплофизические свойства слоя пассивной теплоизоляции** являются постоянными, т.к. в нем отсутствуют внутренние тепловыделения и конвективный перенос тепла с током теплоносителя (табл. 4.3) [17].

Таблица 4.3.

**Теплофизические свойства пассивного слоя теплоизоляции**

Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Содержание воды, %	Теплоёмкость, $C_p$ Дж/кг·К	Теплопроводность, $\lambda$ Вт/м·К	Тепловыделение, Вт/кг
916	15 – 20	2250	0,200	–



Толщина слоя пассивной теплоизоляции определяется в зависимости от процентного содержания жира в «оболочке» и диаметра расчетных элементов. В частности, для мужчин и женщин существуют разные формулы расчета процента жира (рис. П.2.2, табл. П.2.7 ... П.2.8):

Для мужчин:

$$\varepsilon_{\text{ж}} = 495 / (1,0324 - 0,19077(\lg(\text{талия-шея})) + 0,15456(\lg(\text{рост}))) - 450$$

Для женщин:

$$\varepsilon_{\text{ж}} = 495 / (1,29579 - 0,35004(\lg(\text{талия+бедр-шея})) + 0,22100(\lg(\text{рост}))) - 450$$

Расчет толщины жира по процентному содержанию производится по следующим формулам:

$$d_{\text{вн}} = \frac{d_{\text{нар}}}{\sqrt{1 + \frac{\rho_{\text{м}} \cdot \varepsilon_{\text{ж}}}{\rho_{\text{ж}} \cdot 100}}}$$
$$\delta_{\text{ж}} = \frac{d_{\text{нар}} - d_{\text{вн}}}{2}$$

где  $d_{\text{нар}}$ ,  $d_{\text{вн}}$  – наружный и внутренний диаметры слоя жира,  $\delta_{\text{ж}}$  – толщина слоя жира,  $\rho_{\text{ж}}$ ,  $\rho_{\text{м}}$  – плотность жира и тканей мышц,  $\varepsilon_{\text{ж}}$  – процентное содержание жира.

Расчеты проводятся для мужчины 30 лет в диапазоне процентного содержания жира от 0 до 40 % с шагом 10. Параметры внешней среды одинаковы для всех случаев: охлаждение в воде при температуре 0 °С при отсутствии защитного снаряжения.

Анализ суммарного теплового потока расчетного элемента (рис. 4.15) показал, что с ростом толщины слоя теплоизоляции существенно уменьшается теплоотдача в окружающую среду. Причем самое значительное сокращение теплотерь наблюдается при 10 ... 20 % жира, а при дальнейшем увеличении процента уменьшение теплотерь незначительно. Этот диапазон является физиологической нормой и для мужчин и для женщин.

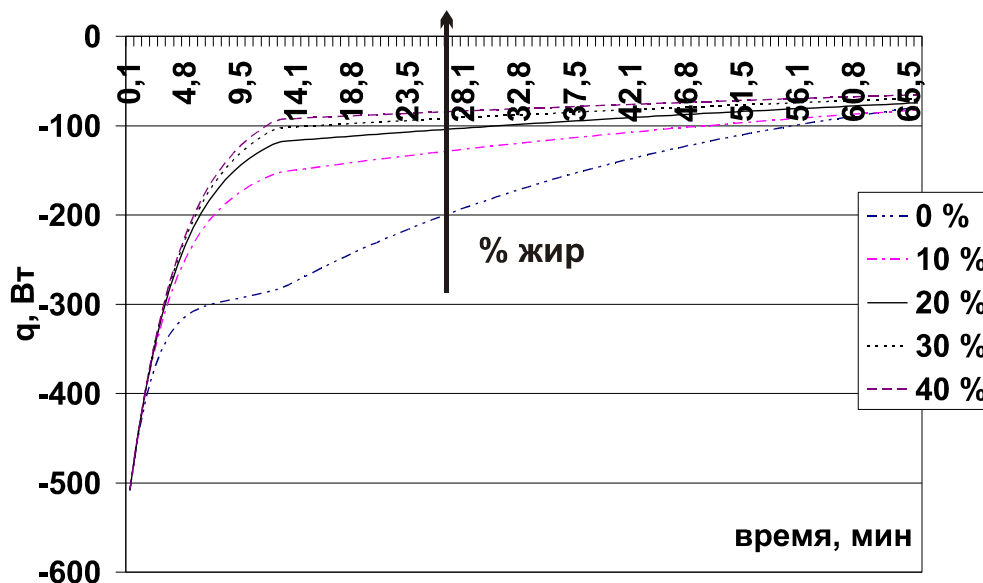


Рис. 4.15. Влияние толщины слоя пассивной теплоизоляции (% жира) на суммарные тепловые потери расчетного элемента

Таким образом, увеличение толщины слоя теплоизоляции приводит к уменьшению теплоотдачи на 50 ... 60 %, причем этот эффект наблюдается за счет уменьшения вклада конвективной составляющей.

В связи с уменьшением теплотерь из-за роста толщины слоя пассивной теплоизоляции изменение среднемассовой температуры «ядра» происходит с меньшей скоростью (рис. 4.16). Аналогично тепловому потоку, максимальное уменьшение падения среднемассовой температуры «ядра» происходит в диапазоне 10 ... 20 % жира. Температура, по сравнению с отсутствием слоя пассивной теплоизоляции, увеличивается в 2 ... 3 раза, что в среднем составляет 10 ... 15 °С. С дальнейшим ростом толщины слоя изменения не столь значительны и составляют 2 ... 4 °С.

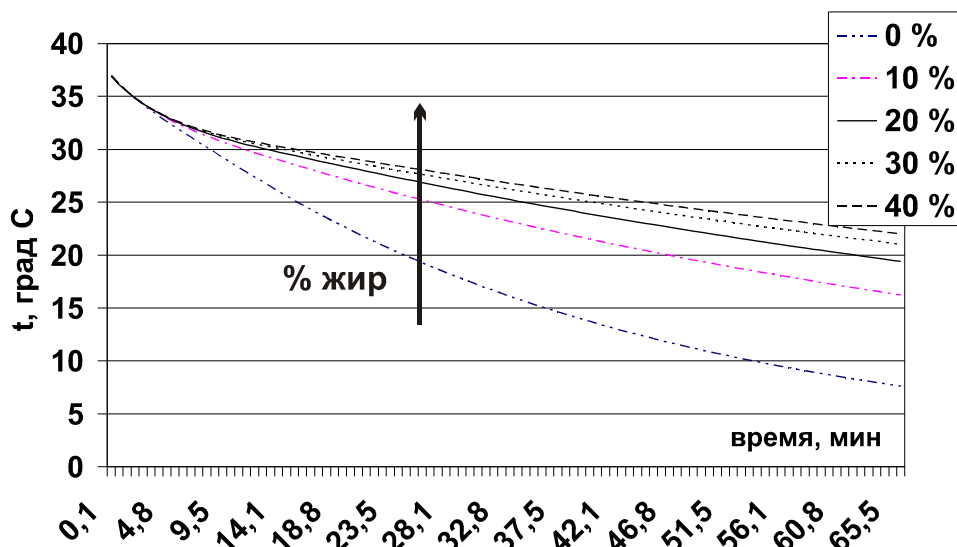


Рис. 4.16. Влияние толщины слоя пассивной теплоизоляции (% жира) на среднемассовую температуру «ядра»

Анализ температур на границах слоев расчетных элементов показал, что с ростом толщины пассивной теплоизоляции увеличивается разница температур между активной и пассивной теплоизоляцией от 0 до 10 ... 15 °С (рис. 4.17). Это приводит к увеличению температуры непосредственной под слоем пассивной теплоизоляции (рис. 4.18).

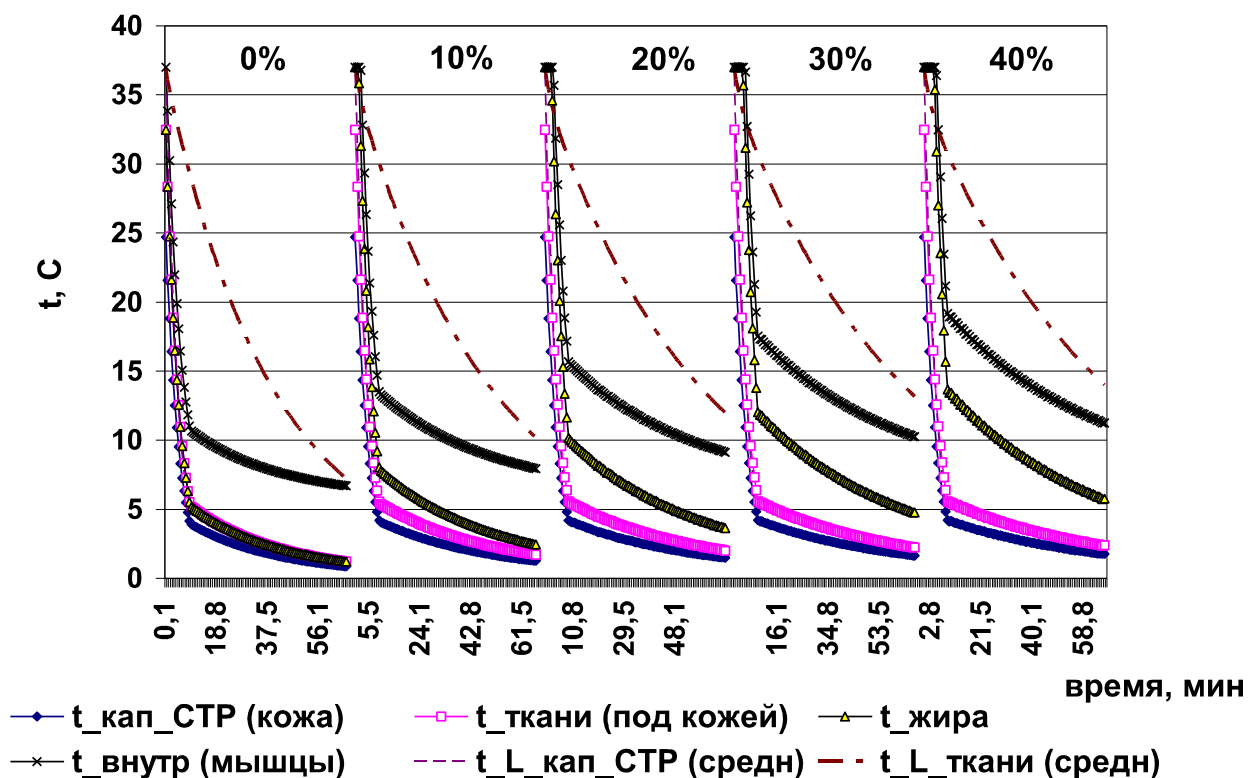




Рис. 4.17. Изменение температуры на границах слоев расчетного элемента с ростом толщины слоя пассивной теплоизоляции

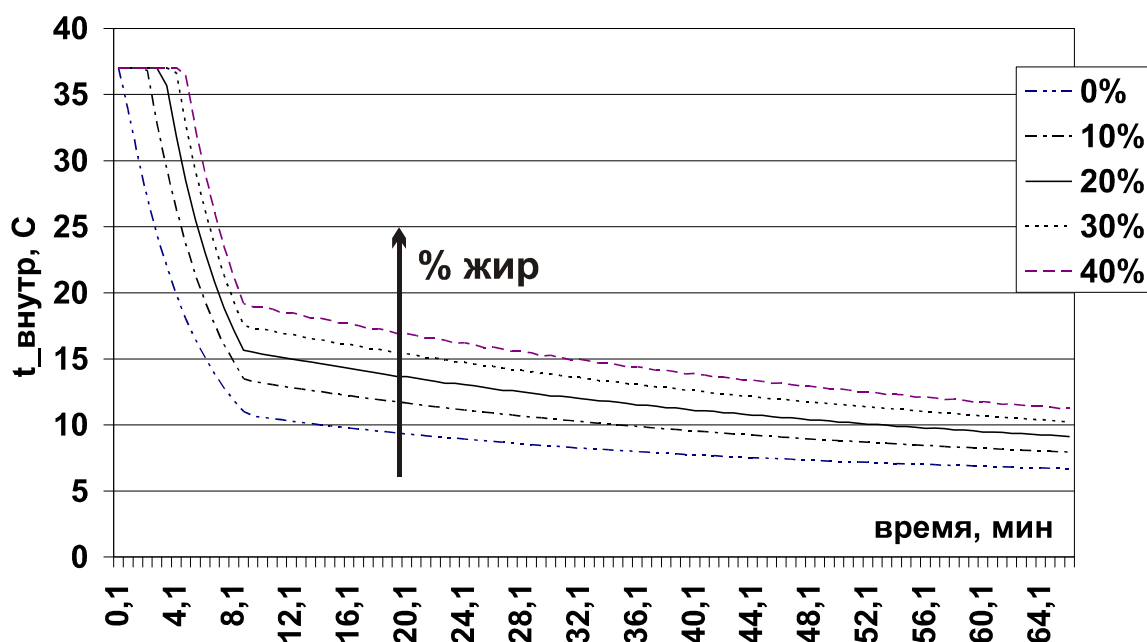


Рис. 4.18. Изменение температуры под слоем пассивной теплоизоляции в зависимости от толщины слоя

Чем больше толщина слоя теплоизоляции, тем дольше температура среднего слоя «ядра» остается неизменной в начальной фазе и тем медленнее остывает «ядро» в регулярном режиме. При 40 % жира температура среднего слоя «ядра» постоянна на протяжении всей начальной стадии охлаждения, а в регулярном режиме в 1,5 ... 2 раза выше, чем при 0 %.

Таким образом, пассивный слой теплоизоляции оказывает существенное влияние на процесс теплообмена в многослойной многоэлементной термодинамической системе. Увеличение толщины исследуемого слоя снижает суммарные теплотери на 50 ... 60 %, что в свою очередь приводит к уменьшению градиента изменения среднемассовой температуры «ядра», т.е. «ядро» остывает медленнее.

#### ***Исследование термического сопротивления активной теплоизоляции.***

Слой активной теплоизоляции обладает переменным термическим сопротивлением, т.к. в нем присутствуют внутренние тепловыделения и конвективный перенос тепла с током теплоносителя. В настоящем разделе исследуется влияние свойств окружающей среды и мощности внутренних источников тепла.

Для анализа термического сопротивления слоя активной теплоизоляции решается обратная задача: вычисляется эффективный коэффициент теплопроводности, который определяется по формуле:

$$\lambda_{\text{эффект}} = \frac{q_{\Sigma} \delta_{\text{кап\_СТР}}}{t_{\text{кап\_СТР}} - t_{\text{жир}}}$$

Исследование охлаждения в воде и воздухе показало, что эффективный коэффициент теплопроводности у каждого расчетного элемента разный (рис. 4.19). Самые высокие значения у грудной клетки и нижней части туловища, а низкие – у рук и ног. Таким образом, эффективный коэффициент теплопроводности зависит от площади поверхности теплообмена. Чем больше поверхность, тем больше коэффициент теплопроводности и меньше термическое сопротивление слоя активной теплоизоляции. В воздухе эквивалентный коэффициент теплопроводности практически не меняется. В воде он нелинейно уменьшается в 2 раза на начальной стадии охлаждения за счет изменения свойств слоя, и остается примерно постоянным в регулярном режиме.

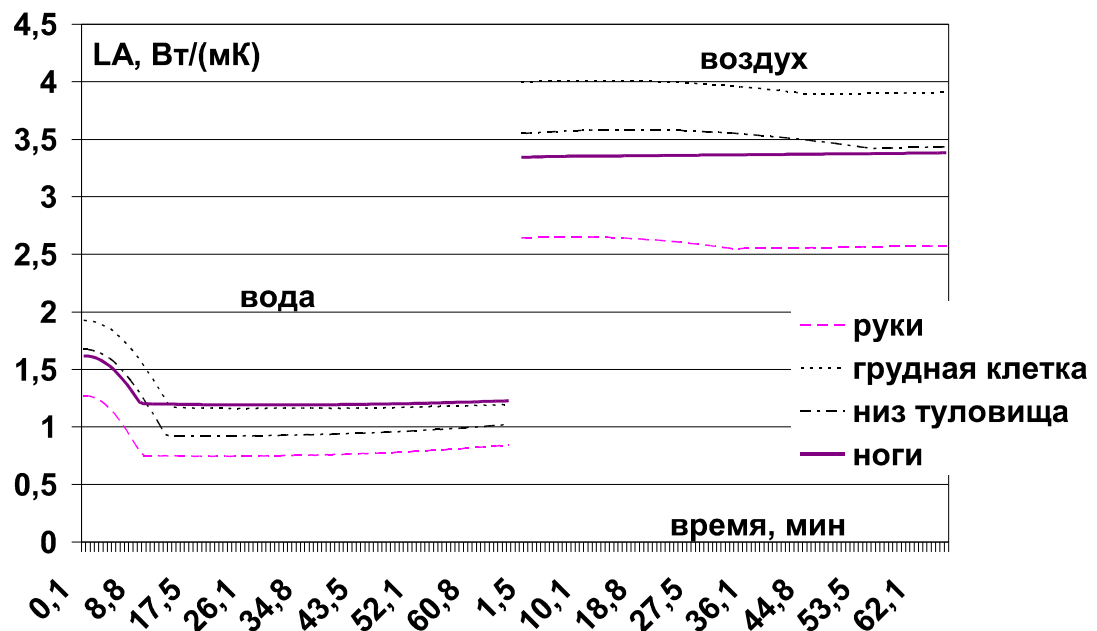


Рис. 4.19. Эффективный коэффициент теплопроводности (LA) расчетных элементов в воде и в воздухе

Анализ влияния мощности внутренних источников тепла показал, что в регулярном режиме эквивалентный коэффициент теплопроводности дополнительно увеличивается в 2 раза за счет увеличения внутренних тепловыделений от 0 до 800 Вт (рис. 4.20).

С ростом внутренних тепловыделений растет термическое сопротивление слоя теплоизоляции и уменьшается градиент изменения безразмерной среднемассовой температуры слоя в 1,5 ... 2 раза (рис. 4.21). Безразмерная температура  $\Theta$  определяется по следующей формуле:

$$\Theta = \frac{t_{\text{кап\_СТР}} - t_{\text{окр\_среда}}}{37 - t_{\text{окр\_среда}}}$$

Увеличение температуры окружающей среды приводит к незначительному увеличению на 1 ... 2 % эффективного коэффициента теплопроводности в регулярном режиме охлаждения (рис. 4.22).

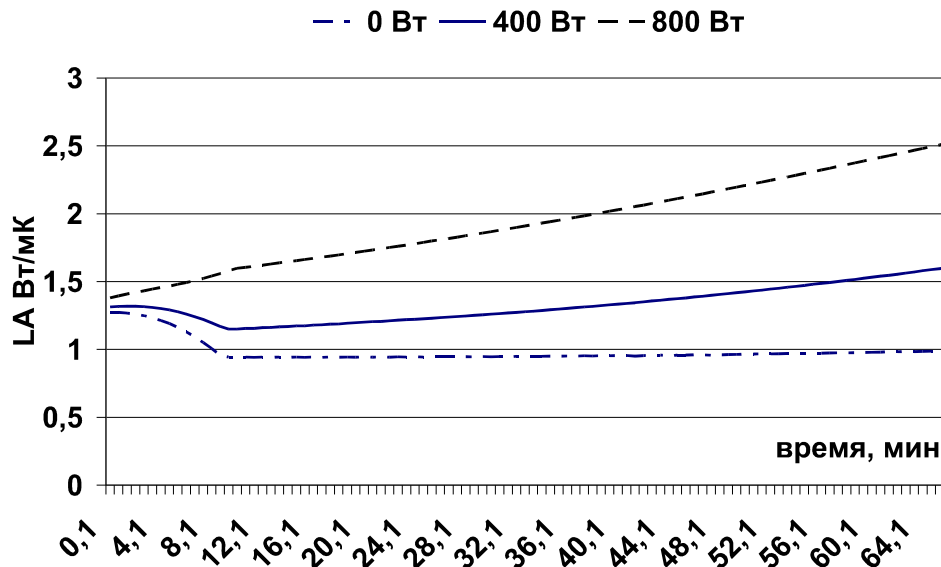


Рис. 4.20. Зависимость эффективного коэффициента теплопроводности (LA) активного слоя теплоизоляции расчетного элемента от мощности внутренних источников тепла

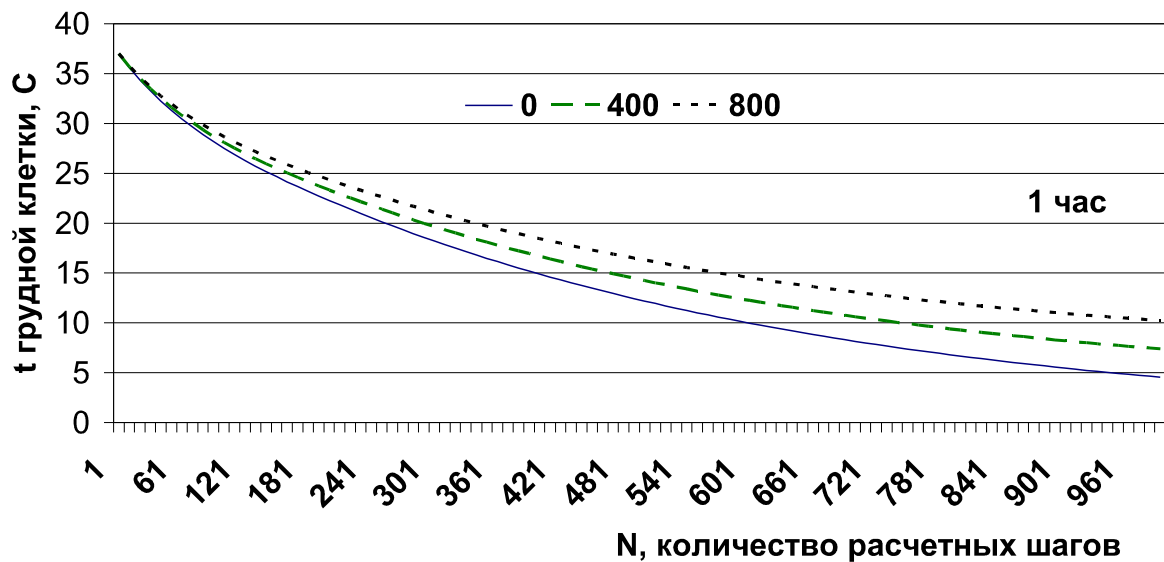


Рис. 4.21. Зависимость безразмерной температуры  $\Theta$  слоя активной теплоизоляции расчетного элемента от мощности внутренних тепловыделений

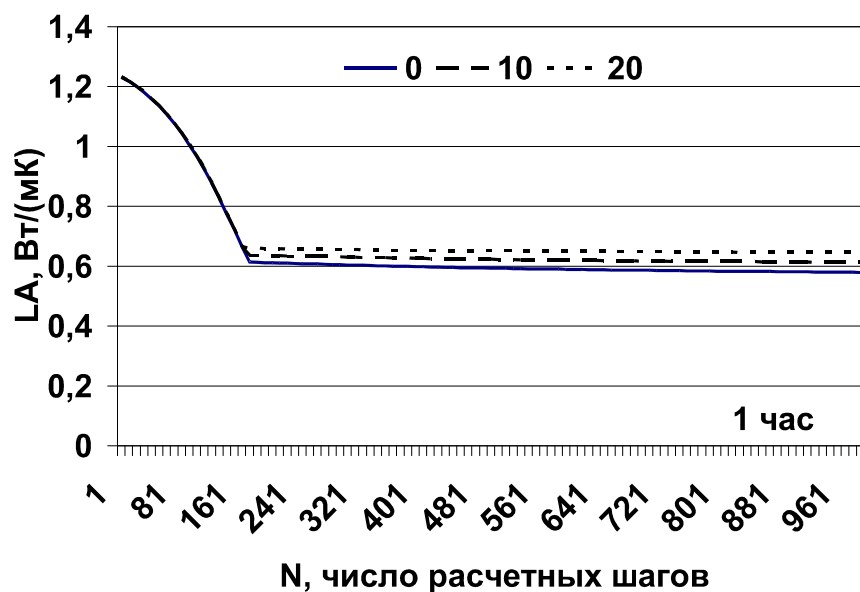


Рис. 4.22. Изменение эффективного коэффициента теплопроводности активного слоя теплоизоляции ( $LA$ ) в зависимости от температуры окружающей среды

Таким образом, установлено, что теплофизические параметры слоя активной теплоизоляции существенным образом зависят от типа расчетного элемента, режимов охлаждения, свойств окружающей среды и мощности внутренних источников тепла.

#### **Анализ эффективности термического сопротивления внешней теплоизоляции**

Активную роль в защите человека от холода играет одежда, теплофизические параметры которой обеспечивают должную защиту от охлаждения всех участков поверхности тела человека в соответствии с конкретными условиями его трудовой деятельности. Создание одежды для защиты от холода является сложной научной и практической задачей, так как одежда должна удовлетворять комплексу требований, часто не совместимых друг с другом. Так, например, в одежде должны сочетаться малая масса и высокие теплозащитные свойства; малая воздухопроницаемость и достаточная влагопроницаемость, необходимая для обеспечения влагообмена человека с окружающей средой. Одежда должна защищать человека от внешней влаги и не препятствовать удалению влаги с поверхности тела, она также должна защищать человека от охлаждения в состоянии покоя и не вызывать перегрева при выполнении интенсивной физической работы.

В настоящей работе собран материал и выполнен анализ теплофизических свойств материалов, используемых при создании одежды для защиты от переохлаждения и перегрева [124, 131]. В зависимости от

конструкции защитная одежда позволяет создать термическое сопротивление в диапазоне  $0,2 \dots 2,0 \text{ м}^2 \cdot \text{град}/\text{Вт}$  и по своим теплозащитным свойствам разделяется на диапазоны  $clo = 1 \dots 7$  ( $1 \text{ clo} = 0,21 \text{ м}^2 \cdot \text{град}/\text{Вт}$ ).

Исследуется влияние термического сопротивления внешней теплоизоляции в диапазоне  $clo = 0 \dots 7$  на процесс теплообмена в сложной термодинамической системе (рис. 4.23).

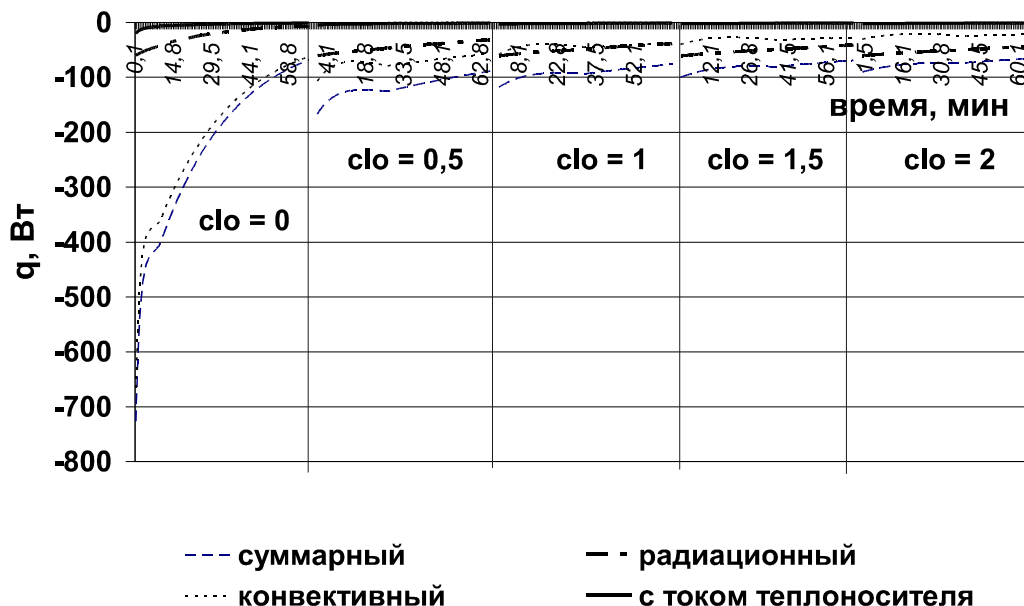


Рис. 4.23. Изменение суммарного теплового потока и его составляющих в зависимости от термического сопротивления ( $clo$ ) внешней теплоизоляции (одежды)

Установлено, что рост термического сопротивления приводит к уменьшению теплотерь расчетных элементов системы в окружающую среду, а также к уменьшению градиента понижения среднemasсовых температур и температур на границах слоев «оболочки» и «ядра». Данные изменения связаны с уменьшением в 4 ... 5 раз суммарного теплового потока в окружающую среду, происходящего за счет резкого уменьшения конвективной составляющей. При этом с ростом термического сопротивления наблюдается увеличение вклада радиационной составляющей и уменьшение вклада конвективного переноса тепла с током теплоносителя.

В связи с уменьшением теплоотдачи в окружающую среду с ростом  $clo$  уменьшается и градиент падения среднemasсовых температур расчетных «ядра» расчетных элементов (рис. 4.24). При этом разные расчетные элементы остывают с разной скоростью. Быстрее всего остывают руки и ноги, медленнее – туловище и внутренние органы. Для компенсации этого эффекта необходим такой костюм, который обладает разным термическим сопротивлением для разных частей тела.

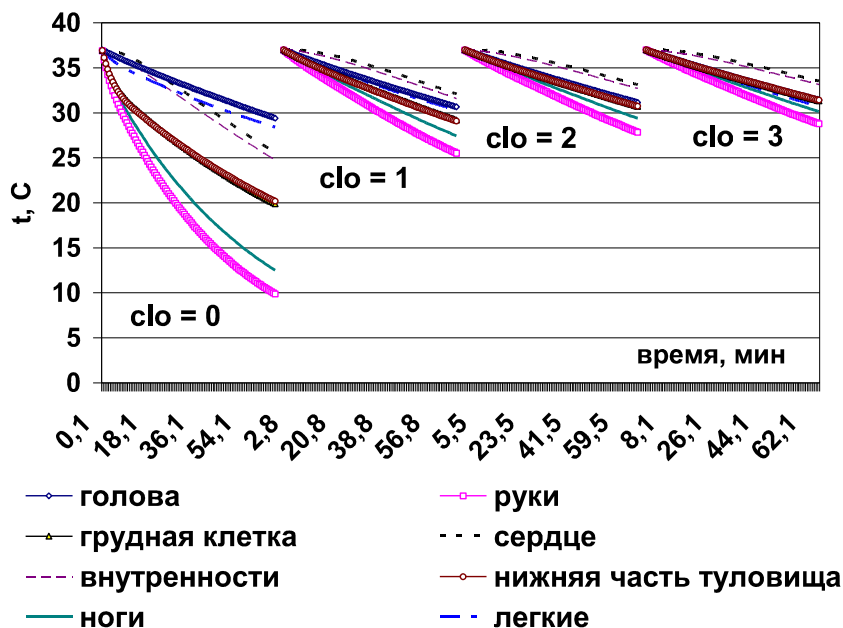


Рис. 4.24. Изменение среднемассовых температур «ядра» расчетных элементов в зависимости от значений термического сопротивления внешней теплоизоляции

Исследование разной величины термического сопротивления внешней теплоизоляции показало, что максимальное влияние внешняя теплоизоляция имеет в диапазоне  $clo = 0 \dots 3$ , при больших значениях изменения параметров незначительно (рис. 4.25).

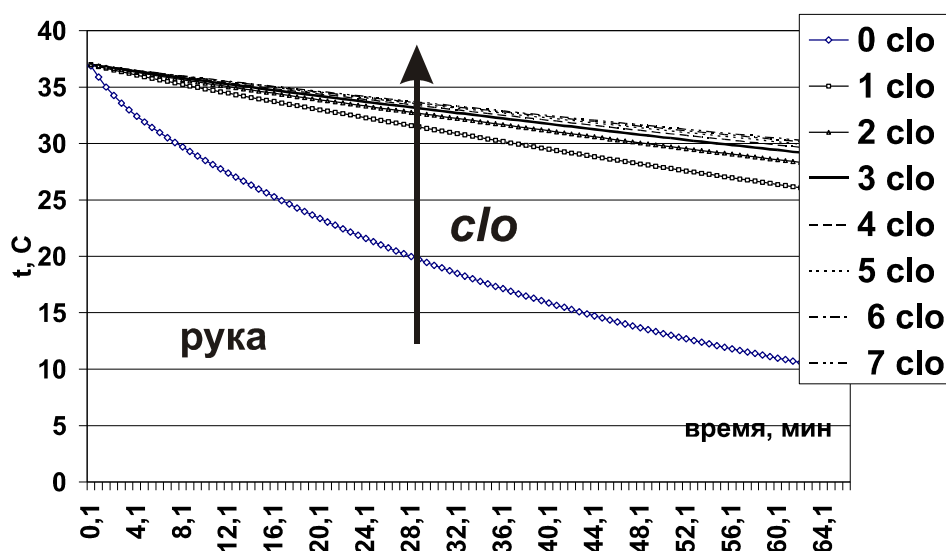


Рис. 4.25. Зависимость среднемассовой температуры ядра расчетного элемента от термического сопротивления внешней теплоизоляции



### **4.3. Исследование влияния мощности внутренних источников тепла**

Механизм увеличения теплообразования при понижении температуры окружающей среды заключается в увеличении скорости обменных процессов в различных тканях. Наибольшее количество тепла образуется в органах с интенсивным обменом веществ: в печени и почках, в эндокринных и пищеварительных железах, в скелетной мускулатуре. Наименьшее количество тепла образуется в костях, хрящах и соединительной ткани. В различных органах тела образуется неодинаковое количество тепла. Главный регулятор тепловыделений – мышцы. При интенсивной физической нагрузке они поставляют до 90% тепла. В нормальных условиях на долю мышц приходится 65-70% мощности внутренних источников тепла. Второй по значимости источник – печень и пищеварительный тракт. Они дают 20-30% тепла.

При мышечной работе накопленная в мышцах химическая энергия только на одну треть переходит в механическую работу, остальные две трети переходят в теплоту. При увеличении мышечной работы происходит повышение тепловыделений и температуры. Напряжение мускулатуры у человека, находящегося в состоянии покоя, повышает теплопродукцию на 10 %, а перемещение тела и связанное с этим увеличение мышечной активности способствует повышению теплообразования на 25 ... 30 %. Человек в покое продуцирует около 2 тыс. ккал, а при мышечной работе повышение теплообразования достигает 4 ... 6 тыс. ккал, доходя при тяжелой работе до 9 тыс. ккал.

Для исследования влияния мощности внутренних источников тепла на процесс охлаждения выполнены расчеты для 0, 500 и 1000 Вт внутренних тепловыделений. Установлено, что с увеличением мощности суммарные тепловые потери растут (рис. 4.26), однако наблюдается перераспределение вклада различных составляющих. Доля тепла, переносимого теплоносителем на начальной стадии охлаждения, с ростом мощности увеличивается почти в 2 раза, что связано с притоком разогретого теплоносителя в «оболочку» и увеличением в связи с этим теплоотдачи в окружающую среду.

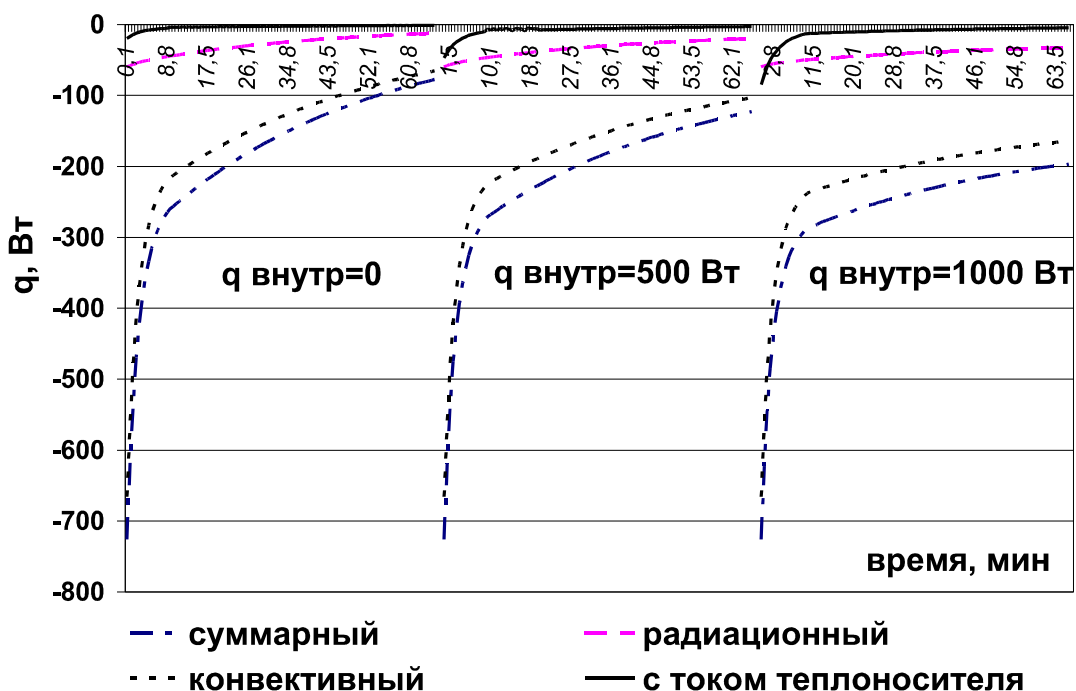


Рис. 4.26. Влияние мощности внутренних источников тепла на тепловые потери руки

С ростом мощности внутренних источников тепла увеличивается разница между температурами на границах слоев (рис. 4.27). При отсутствии тепловыделений разница между температурами с внешней и внутренней стороны активного слоя теплоизоляции небольшая, но с ростом тепловыделений перепад температур увеличивается больше чем в 2 раза за счет притока подогретого теплоносителя к «оболочке». Из анализа среднемассовых температур установлено, что в то время как температура среднего слоя «ядра» и «оболочки» растет с увеличением мощности, температура внутреннего слоя «ядра» падает. Это связано с увеличением расхода теплоносителя на средний слой и «оболочку» в результате внешней работы, приводящим к тому, что подогретый теплоноситель все время доставляется в «оболочку», откуда после интенсивного охлаждения возвращается в «ядро», дополнительно понижая его температуру (рис 4.28). В связи с тем, что при физической нагрузке учащается дыхание, повышается интенсивность тепломассообмена в легких и соответственно температура в легких с увеличением мощности внутренних тепловыделений резко падает.



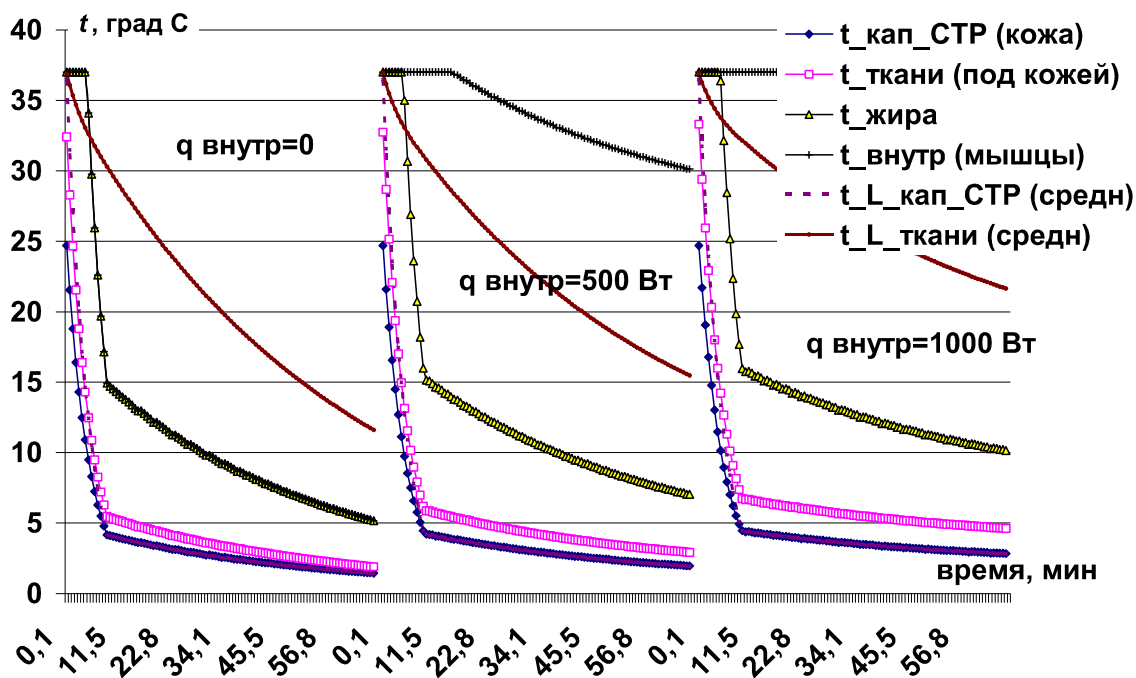


Рис. 4.27. Влияние мощности внутренних источников тепла на температуры на границах слоев расчетного элемента

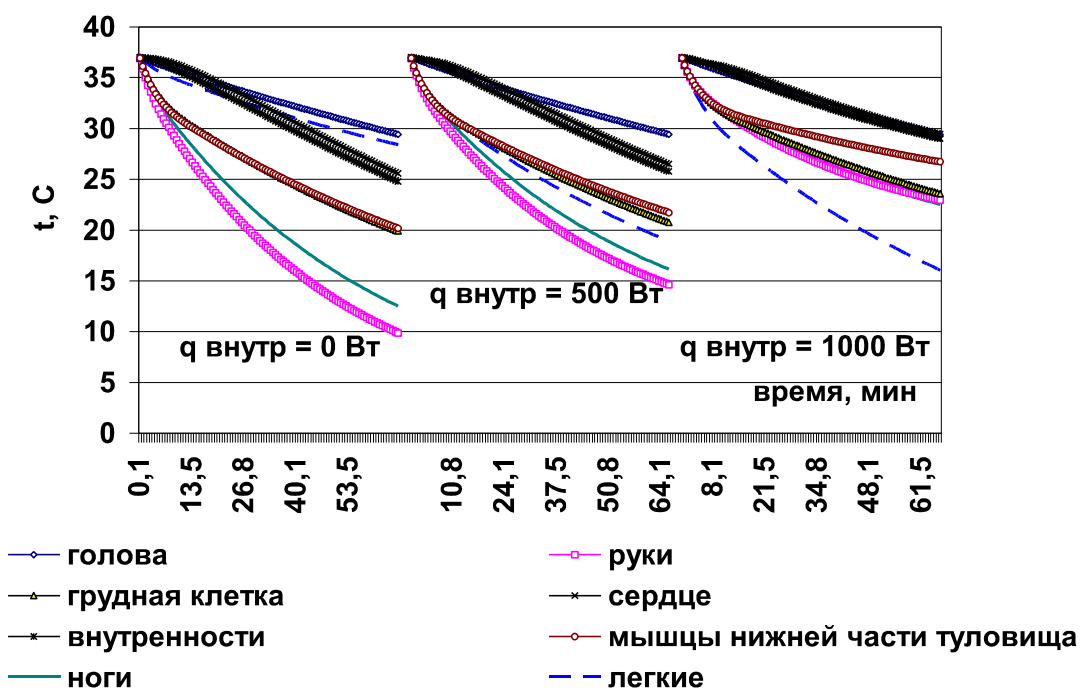


Рис. 4.28. Влияние мощности внутренних источников тепла на среднемассовые температуры «ядра» расчетных элементов

В действительности внутренние источники тепла имеют переменную мощность, величина которой изменяется во времени. Для иллюстрации данного эффекта рассматривается случай, когда величина физической нагрузки максимальна на начальной стадии и ступенчато убывает к концу

рассматриваемого периода времени. Расчеты представлены для трех вариантов (рис. 4.29): без внутренних тепловыделений, переменная мощность внутренних источников тепла (1000, 500 и 250 Вт) и постоянная мощность (1000 Вт). Показано, что при постоянной мощности характер изменения температуры среднего слоя «ядра» плавный, а при переменной мощности – ступенчатый. При переменной мощности температуры слоев к концу расчетного периода примерно такие же, как и при отсутствии внутренних тепловыделений, а при постоянной мощности в 2 раза выше.

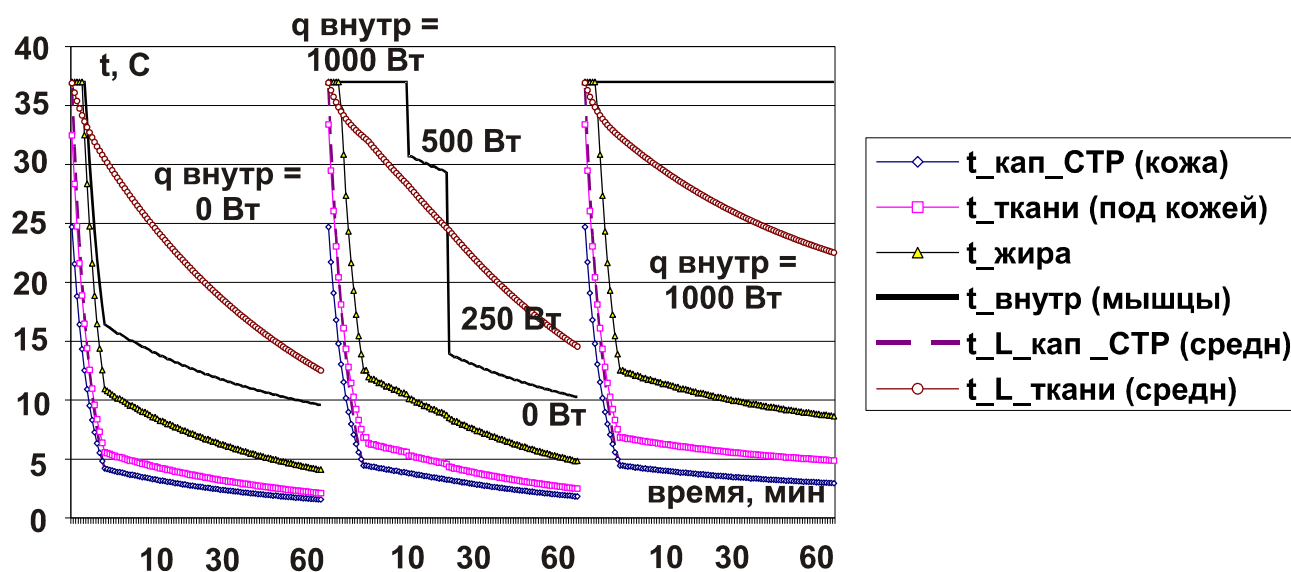


Рис. 4.29. Температуры на границах слоев расчетных элементов в зависимости от характера мощности внутренних источников тепла

Анализ среднемассовых температур слоев показал, что на начальной стадии охлаждения во всех трех случаях температуры примерно одинаковы (рис. 4.30). По истечении 10 мин наступает регулярный режим. При отсутствии внутренних тепловыделений температуры расчетных элементов резко уменьшаются. В случае ступенчатой нагрузки мощность падает с 1000 до 500 Вт и температуры начинают уменьшаться, но с меньшим градиентом, чем при отсутствии внутренних источников. Если нагрузка остается постоянной (1000 Вт), то охлаждение расчетных элементов происходит 2 ... 3 раза медленнее, чем при переменной нагрузке. Исключение составляют легкие, температура которых с ростом мощности внутренних источников тепла падает. Именно переменная мощность в полной мере иллюстрирует реальный процесс охлаждения организма человека.

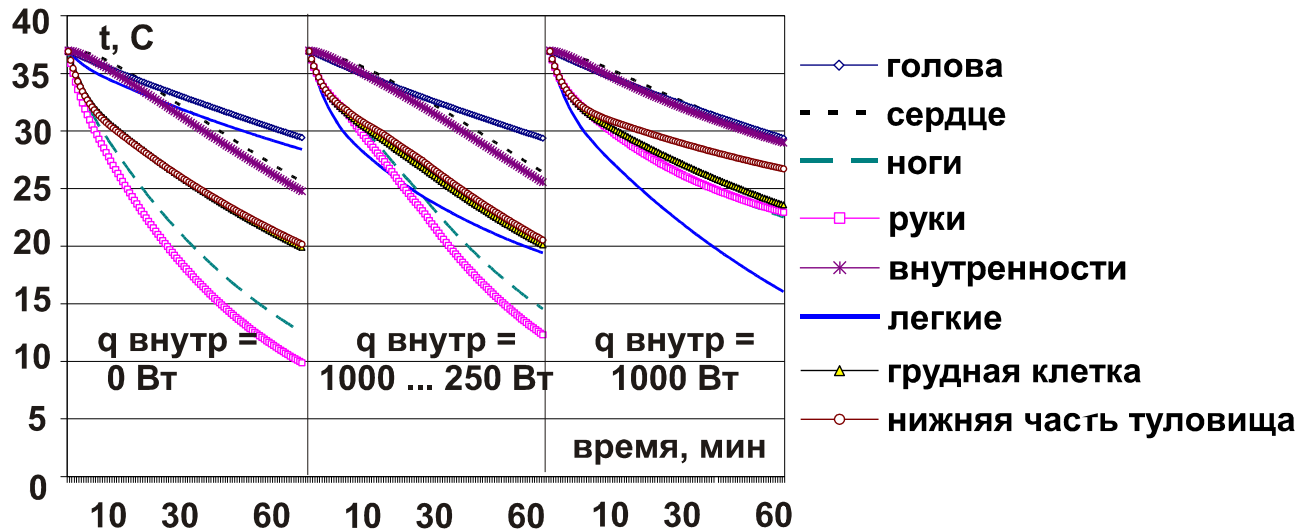


Рис. 4.30. Зависимость среднемассовых температур слоев расчетных элементов от характера изменения мощности внутренних источников тепла

Таким образом, увеличение мощности внутренних источников тепла приводит к изменению характера температурных полей расчетных элементов в исследуемой термодинамической системе. Увеличение мощности до 1000 Вт приводит к увеличению в 2 раза разницы температур между «оболочкой» и средним слоем «ядра». При этом температура внутреннего слоя «ядра» с ростом внутренних тепловыделений падает за счет постоянного притока охлажденного теплоносителя из «оболочки». Увеличение мощности внутренних источников тепла ведет к увеличению теплоотдачи в окружающую среду, однако наблюдается перераспределение вклада различных составляющих. Доля тепла, переносимого теплоносителем на начальной стадии охлаждения, с ростом мощности увеличивается почти в 2 раза. Переменная во времени мощность внутренних источников иллюстрирует реальный процесс охлаждения организма человека.

## Выводы

1. Установлено, что расчетные элементы остывают с разной скоростью, что связано с их формой, расположением внутри термодинамической системы, соотношением массы и площади поверхности теплообмена, свойствами окружающей среды и мощностью внутренних источников тепла.

2. Показано, что при снижении температуры воды от 25 до 0 °С суммарные тепловые потери системы увеличиваются с 1 до 4,5 кВт, причем в начальной фазе охлаждения происходит резкое снижение температуры оболочки, что приводит к снижению тепловых потерь в 2 ... 3 раза. Одновременно термическое сопротивление оболочки вырастает в 2 ... 3 раза. В регулярном режиме охлаждения наблюдается постепенное остывание ядра вплоть до температуры окружающей среды. При охлаждении в воздушной



среде установлено увеличение времени начальной фазы в 5 ... 7 раз и снижение суммарных потерь до 0,2 ... 1,0 кВт. Установлено, что изменение параметров внешней среды существенным образом сказывается на процессы теплообмена за счет изменения коэффициента теплоотдачи, в частности коэффициент теплоотдачи: при снижении температуры воздуха от 20 до -40 °С увеличивается на 50...60 %, росте скорости от 0 до 3 м/с – увеличивается в 4 ... 5 раза, а при снижении давления от 100 до 40 кПа уменьшается на 25 %.

3. Установлено, что увеличение мощности внутренних источников тепла от 0 до 1,0 кВт при охлаждении в воде приводит к росту среднemasсовых и температур на границах слоев, причем температура ядра увеличивается на 50 %, а температура оболочки на 30 ... 40 %. При этом термическое сопротивление оболочки снижается на 30 %. За счет этого суммарные тепловые потери системы вырастают на 20 ... 30 %. Увеличение термического сопротивления внешнего слоя теплоизоляции в диапазоне 0,2 ... 2,0 м<sup>2</sup> ·град/Вт приводит к значительному сокращению в 4...5 раза тепловых потерь и существенному росту температур оболочки и ядра.