



4. Особенности теплообмена в системе

«человек - тепловая защита - окружающая среда»

На процесс охлаждения оказывают влияние многие параметры – условия окружающей среды: водная или воздушная среда, ее температура и скорость движения; физиологические особенности организма: пол, возраст, процентное содержание жира, внутренние тепловыделения организма; свойства защитной одежды: тепловое сопротивление, воздухопроницаемость. При создании средств индивидуальной защиты необходимо обеспечить должное тепловое сопротивление при минимальных затратах и массе. С этой целью важно провести исследование эффективности защитной одежды, изготовленной из материалов с разными величинами теплового сопротивления при различных условиях окружающей среды.

4.1. Теплоизоляционные материалы

Наиболее очевидным последствием воздействия холода при работах на открытой территории является охлаждение поверхностных и глубоких тканей тела человека и связанные с ним реакции в диапазоне от общих и/или локальных дискомфортных теплоощущений до поражений различной степени. В связи с необходимостью проведения работ на открытой территории в холодный период года большое значение имеют средства индивидуальной защиты, теплофизические параметры которых обеспечивают должную защиту от охлаждения всех участков поверхности тела человека в соответствии с конкретными условиями его трудовой деятельности. Одежда должна удовлетворять комплексу требований, часто не совместимых друг с другом: малая масса и высокие теплозащитные свойства; малая воздухопроницаемость и высокая влагопроницаемость. Одежда должна защищать человека от внешней



влаги и не препятствовать удалению влаги с поверхности тела, защищать от охлаждения в состоянии покоя и не вызывать перегрева при выполнении интенсивной физической работы. Кроме вышеперечисленного, необходимо учитывать и множество других факторов.

Теплоотдача от организма человека в окружающую среду осуществляется четырьмя способами: конвекцией, теплопроводностью, излучением и испарением. Так, для расчета величины тепловых потерь теплопроводностью необходимо знать теплофизические параметры материалов, из которых изготовлена защитная одежда, то есть ее тепловое сопротивление. При расчете теплопотерь организма при испарении следует учитывать теплоемкость одежды, а также расположение потовых желез на поверхности тела человека, скорость потоотделения, относительную влажность и температуру окружающего воздуха.

Существует множество теплозащитных материалов, которые в настоящее время применяются при создании средств индивидуальной защиты от экстремальных температур. В настоящей работе собран материал и выполнен анализ теплофизических свойств материалов, используемых при создании одежды для защиты от переохлаждения и перегрева [124, 131]. Для измерения теплового сопротивления материалов введена специальная единица – *clo* ($1 \text{ clo} = 0,155 \text{ м}^2\text{°С/Вт}$). Для проведения анализа эффективности защитной одежды были выбраны комплекты с разными величинами теплового сопротивления в диапазоне 3...7 *clo* (табл. 4.1).

Таблица 4.1

Утеплитель	«Файбертек»	Электрофлокированный материал	Шерстяной ватин	Натуральная овчина	Верблюжья шерсть
Тепловое	3	4	5	6	7



сопротивлени e, clo					
--------------------------	--	--	--	--	--

«Файбертек» — это нетканый материал, представляющий собой объемный слой из композиции тонких пустотелых волокон с элементами объемного термоскрепления, специально обработанных силиконом.

Защитный костюм с утеплителем из электрофлюкированного материала относится к средствам индивидуальной защиты и может быть использован для работников Министерства чрезвычайных ситуаций, строительной, металлургической и химической промышленности. Защитный костюм состоит из куртки со съёмным капюшоном и брюк, изготовленных из многослойного материала. Внешний слой костюма выполнен из водупорной мембранной ткани, в качестве подкладки используется хлопчатобумажная бязь.

Спецодежда для защиты от пониженных температур, которая рекомендуется для эксплуатации в условиях Крайнего Севера, изготавливается с применением трех утеплителей: шерстяного ватина, натуральной овчины и верблюжьей шерсти.

На основе физиологических исследований теплообмена человека с окружающей средой, терморегуляторных реакций в ответ на воздействие холодового стресса разработаны критериальные показатели допустимой степени охлаждения человека (табл. 4.2, 4.3), гарантирующие сохранение работоспособности и здоровья. Показана необходимость рассмотрения комплекта одежды для защиты от холода как единого целого, поскольку охлаждение любой области тела (или его участка) может быть причиной холодового дискомфорта или поражения при достаточном и даже избыточном утеплении остальной поверхности.



Таблица 4.2

Показатель теплового состояния человека	Энерготраты, Вт/м ²				
	69	87	113	145	177
1. Температура тела ректальная, t_r , оС	37,0	37,2	37,3	37,5	37,7
2. Средневзвешенная температура кожи*, t_k , оС	32,0	31,5	31,1	30,0	29,0
3. Средняя температура тела*, t_t , оС	34,9	34,9	34,9	34,9	34,9
4. Изменение теплосодержания*, $Q_{тс}$, кДж/кг	2,72	2,72	2,72	2,72	2,72
5. Увеличение частоты сердечных сокращений*, ЧСС, уд/мин	5	6	10	15	25
6. Влагопотери, P , г/ч	не характерны				
7. Теплоощущения*, T_o , баллы	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
8. Разность между температурой кожи груди и стопы ($t_{кг} - t_{кс}$), оС	6,0	6,0	не характерна		
9. Температура тыла кисти*, $t_{тк}$, оС	25,0	24,5	24,0	23,5	23,0
10. Температура тыла стопы*, $t_{тс}$, оС	28,0	27,5	27,0	26,5	26,0

* - наиболее значимые показатели; ** - снижение работоспособности:
возможно снижение показателя координации движений до 10 %.

Таблица 4.3

Показатель теплового состояния человека	Энерготраты, Вт/м ²				
	69	87	113	145	177
1. Температура тела ректальная, t_r , оС	36,9	37,1	37,2	37,5	37,7
2. Средневзвешенная температура кожи*, t_k , оС	31,0	30,5	29,5	28,5	27,5
3. Средняя температура тела*, t_t , оС	34,4	34,4	34,4	34,4	34,4
4. Изменение теплосодержания*, $Q_{тс}$, кДж/кг	4,82	4,82	4,82	4,82	4,82
5. Увеличение частоты сердечных сокращений*, ЧСС, уд/мин	4	5	8	12	22
6. Влагопотери, P , г/ч	не характерны				
7. Теплоощущения*, T_o , баллы	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
8. Разность между температурой кожи груди и стопы ($t_{кг} - t_{кс}$), оС	не характерна				
9. Температура тыла кисти*, $t_{тк}$, оС	24,0	23,5	23,0	22,5	22,0
10. Температура тыла стопы*, $t_{тс}$, оС	27,0	26,5	26,0	25,5	25,0



* - наиболее значимые показатели; ** - снижение работоспособности:
возможно снижение показателя координации движений до 20 %.

Величины теплоизоляции комплекта СИЗ от холода в различных климатических регионах должны соответствовать приведенным в табл. 4.4.

Таблица 4.4

Климатический регион (пояс)	Средняя температура воздуха зимних месяцев, °С	Наиболее вероятная скорость ветра в зимние месяцы, м/с	Должная величина теплоизоляции комплекта СИЗ в реальных условиях его использования, I, кв. м °С/Вт	Должная величина теплоизоляции комплекта СИЗ в относительно спокойном воздухе, I, кв. м °С/Вт, при воздухопроницаемости внешнего слоя одежды, куб. дм/кв. м с			
				10	20	30	40
IA (особый)	-25	6,8	0,513	0,669	0,714	0,764	0,823
IB (IV)	-41	1,3	0,681	0,744	0,752	0,759	0,767
II (III)	-18	3,6	0,442	0,518	0,534	0,551	0,569
III (II)	-9,7	5,6	0,360	0,451	0,474	0,500	0,528

Требования приведены с учетом влияния воздухопроницаемости внешнего слоя спецодежды на степень снижения теплоизоляции при воздействии наиболее вероятной скорости ветра, характерной для каждого климатического региона в зимний период. Теплоизоляция головных уборов, обуви и рукавиц должна соответствовать величинам, приведенным в табл. 4.5.

Таблица 4.5



Климатический регион (пояс)	Теплоизоляция <*>, кв. м °С/Вт (не менее)		
	головного убора	обуви	рукавиц
IA (особый)	0,397	0,437	0,497
IB (IV)	0,447	0,572	0,551
II (III)	0,329	0,422	0,403
III (II)	0,295	0,332	0,377

<*> измеренная в относительно спокойном воздухе.

4.2. Анализ влияния величины теплового сопротивления защитной одежды

В данном исследовании используется описанная ранее модель работы системы термостабилизации человека, дополненная слоем пассивной теплоизоляции – защитной одеждой. Это многослойная многоэлементная модель, в которой каждая часть тела представлена расчетным элементом с соответствующим количеством и видом слоев: внутренний слой, мышцы, жир, подкожные капилляры, покровные ткани и внешняя теплоизоляция (рис. 4.1). Кровеносная система работает совместно с системой терморегуляции и осуществляет перенос тепла от внутренних органов к поверхности тела. Для расчета процесса охлаждения составляется система уравнений теплопроводности для каждого расчетного элемента с учетом тепловых процессов, которые происходят в каждом из его слоев. Сначала рассчитываются тепловые потоки, затем температуры на границах слоев и среднемассовые температуры.

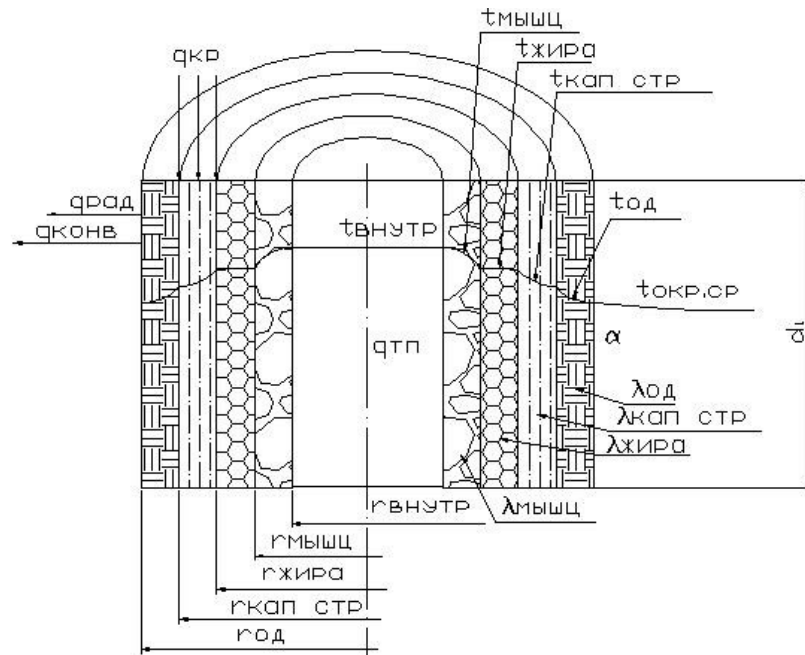


Рис.4.1. Расчетный элемент системы термостабилизации: $q_{кр}$ – конвективный тепловой поток с током теплоносителя; $q_{тп}$ – внутренние источники тепла (телопродукция мышц); $q_{рад}$ – радиационный тепловой поток; $q_{конв}$ – конвективная составляющая теплового потока; $t_{внутр}$ – температура внутреннего слоя «ядра»; $t_{мышц}$ – температура среднего слоя «ядра»; $t_{жир}$ – температура пассивного слоя теплоизоляции; $t_{кап_СТР}$ – температура внешнего слоя (активной теплоизоляции); $t_{одеж}$ – температура защитной одежды; $t_{окр_ср}$ – температура окружающей среды; $\lambda_{внутр}$ – эквивалентный коэффициент теплопроводности внутреннего слоя «ядра»; $\lambda_{мышц}$ – эквивалентный коэффициент теплопроводности среднего слоя «ядра»; $\lambda_{жир}$ – эквивалентный коэффициент теплопроводности пассивного слоя теплоизоляции; $\lambda_{кап_СТР}$ – эквивалентный коэффициент теплопроводности внешнего слоя (активной теплоизоляции); $\lambda_{одеж}$ – эквивалентный коэффициент теплопроводности защитной одежды; α – коэффициент теплоотдачи; r – радиус слоев.

Проверка достоверности. Охлаждение разных частей тела носит неодинаковый характер вследствие различий в количестве и видах



составляющих их слоев, в связи с чем необходимо учитывать особенности строения человека при создании защитного костюма. С целью обеспечить должную защиту всех областей тела человека от охлаждения теплоизоляция комплекта средств индивидуальной защиты и толщина пакета материалов распределяются в соответствии с коэффициентами, приведенными в табл. 4.6.

Таблица 4.6

Область тела	Известный коэффициент	Рассчитанный коэффициент
Голова	0,50	0,67
Туловище	1,26	1,33
Плечо и предплечье	1,13	1,00
Кисть	0,74	
Бедро и ягодицы	1,13	0,67
Голень	0,90	
Стопа	0,83	

В качестве проверки достоверности в работе использовалось сравнение по коэффициентам тепловых сопротивлений разных участков тела. Было рассчитано необходимое тепловое сопротивление для головы, туловища, рук и ног для нахождения на открытом воздухе не менее двух часов при температуре -18°C и скорости ветра 3,6 м/с, что соответствует средней температуре воздуха зимних месяцев и наиболее вероятной скорости ветра за этот период для климатического пояса II(III). Затем вычислены коэффициенты, представляющие отношение величины тепловой изоляции на каждом участке к величине общей тепловой изоляции защитного костюма, и проведено сравнение рассчитанных коэффициентов с известными (рис. 4.2).

Сравнение показало, что существуют некоторые расхождения, связанные с тем, что в представленной модели системы термостабилизации человека руки и ноги рассматриваются как цилиндры с неизменным по длине поперечным сечением и не делятся на плечо и предплечье и бедро и голень соответственно.

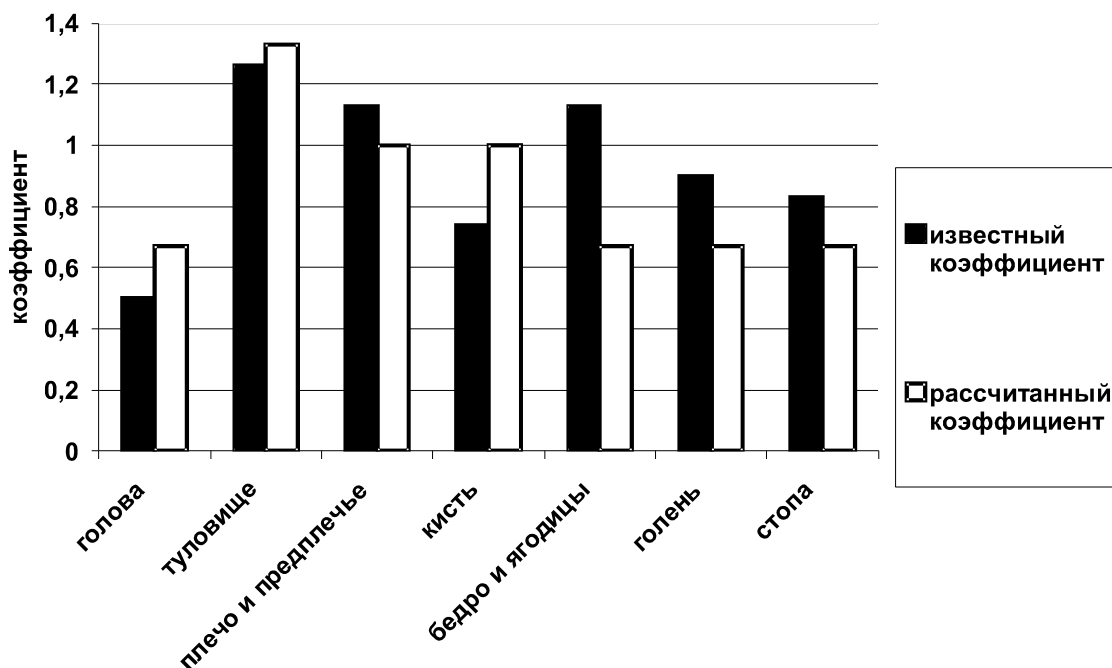


Рис. 4.2. Проверка достоверности

Сравнение разных величин тепловых сопротивлений. Исследуется влияние термического сопротивления внешней теплоизоляции в диапазоне $clo = 0 \dots 7$ на процесс теплообмена в сложной термодинамической системе (рис. 4.3).



Рис. 4.3. 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 среднемассовых 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 среднемассовых температур расчетных «ядра» расчетных элементов (рис. 4.4). 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.

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. 4.5).

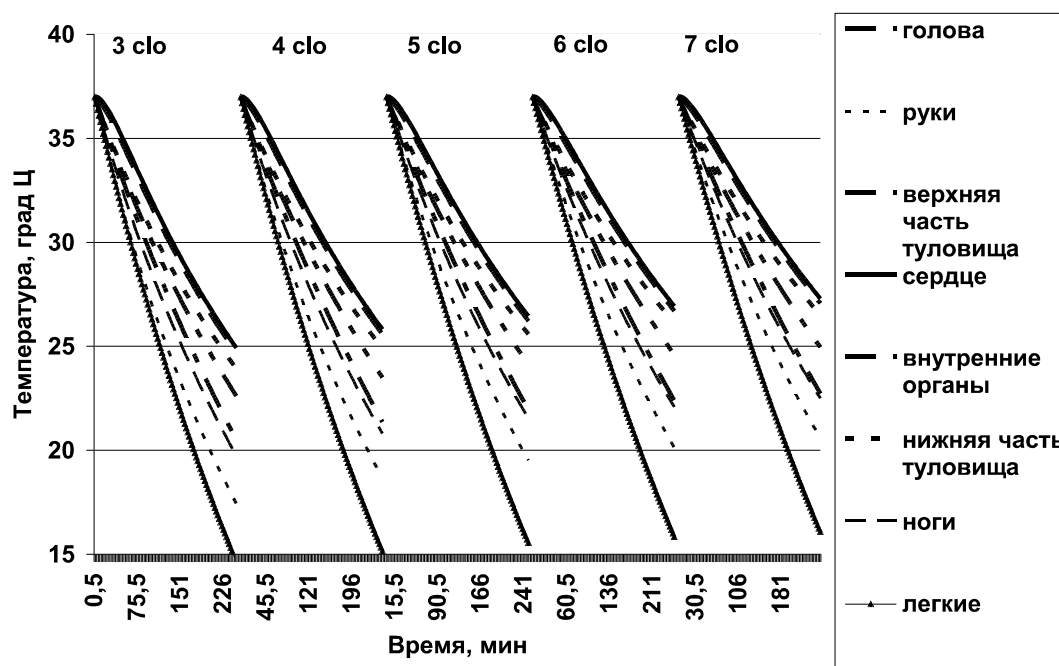


Рис. 4.4. Изменение среднемассовых температур «ядра» расчетных элементов в зависимости от значений термического сопротивления внешней теплоизоляции

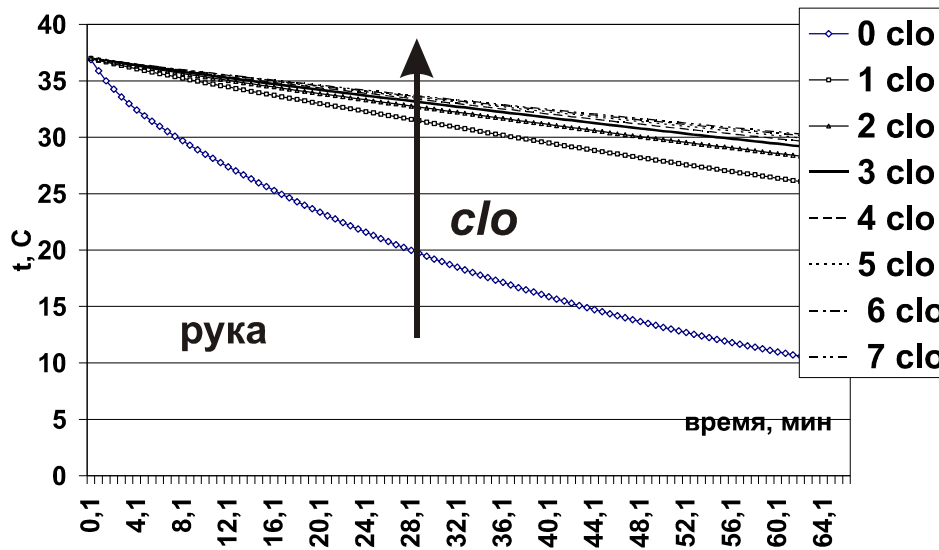


Рис. 4.5. Зависимость среднемассовой температуры ядра расчетного элемента от термического сопротивления внешней теплоизоляции

На рис. 4.6 приведен график зависимости времени охлаждения «ядра» до критической температуры 24°C от теплового сопротивления защитной одежды. По оси x отложено тепловое сопротивление одежды в clo , по оси y – время охлаждения до критической температуры в минутах. Исследования проводились для температур окружающей среды 0°C и -30°C . Из графика видно, что для 0°C при увеличении теплового сопротивления от 0 до 4 clo время пребывания на холоде увеличивается (от 146 до 234 минут), а при дальнейшем увеличении теплового сопротивления меняется менее заметно (от 234 до 258 минут). При -30°C тепловое сопротивление практически не влияет на время пребывания на холоде (78 минут при тепловом сопротивлении 0 clo и 88 минут – при тепловом сопротивлении 7 clo).

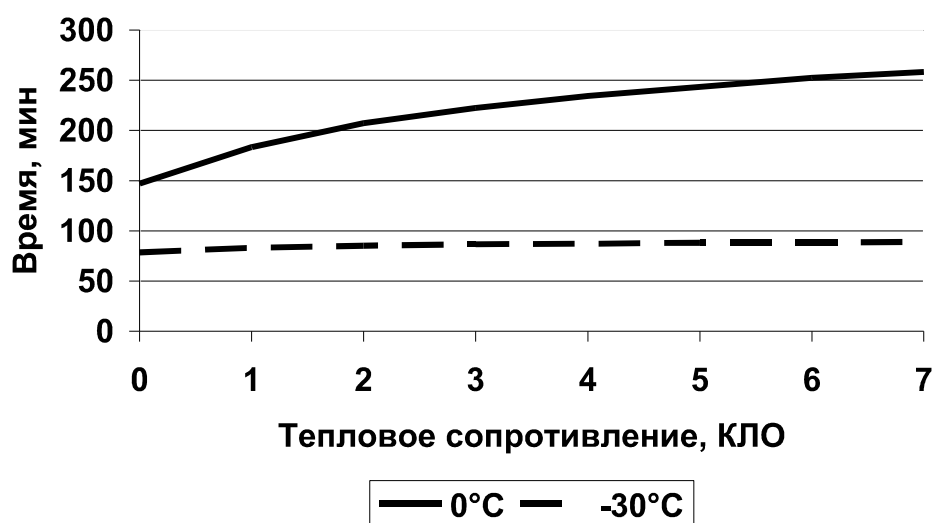


Рис. 4.6. График зависимости времени охлаждения от теплового сопротивления

На рис. 4.7 представлен график зависимости тепловых потоков от теплового сопротивления при охлаждении до критической температуры. По оси x отложено тепловое сопротивление одежды в clo , по оси y – значение тепловых потоков в $Вт/м^2$. Исследования проводились для температур окружающей среды $0^{\circ}C$ и $-30^{\circ}C$. Из графика видно, что для $0^{\circ}C$ при увеличении теплового сопротивления от 0 до 4 clo тепловые потоки заметно уменьшаются (от 31 Вт/м^2 до 18 Вт/м^2). Далее – меняются незначительно (от 18 Вт/м^2 до 16 Вт/м^2). При $-30^{\circ}C$ при увеличении теплового сопротивления от 0 до 2 clo тепловые потоки уменьшаются (от 63 Вт/м^2 до 58 Вт/м^2), а при дальнейшем увеличении теплового сопротивления практически не меняются (58 Вт/м^2 и 56 Вт/м^2).

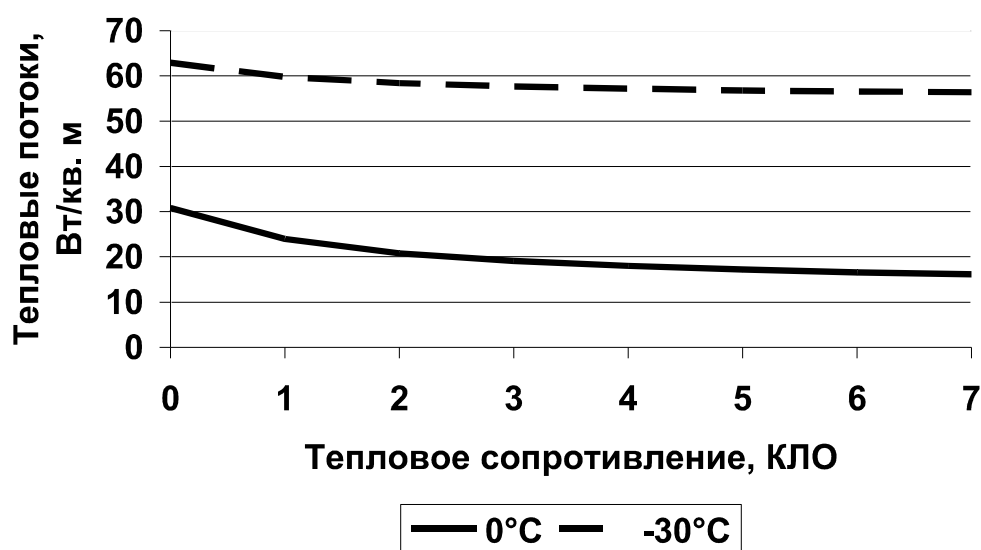


Рис. 4.7. График зависимости тепловых потоков от теплового сопротивления

Влияние скорости движения воздушной среды. На рис. 4.8 представлен график зависимости допустимого времени охлаждения от скорости движения воздушной среды. Исследования проводятся для задачи охлаждения мужчины 30 лет на воздухе с температурой -40°C без защитной одежды. При увеличении скорости среды от 0 м/с до 2 м/с время охлаждения организма до критической температуры уменьшается в 2 раза. В случае использования защитной одежды сопротивлением 3 clo (рис. 5.9), наблюдается увеличение времени охлаждения при скорости 0 м/с в 2,5 раза и дальнейшее уменьшение градиента сокращения времени в зависимости от увеличения скорости среды.

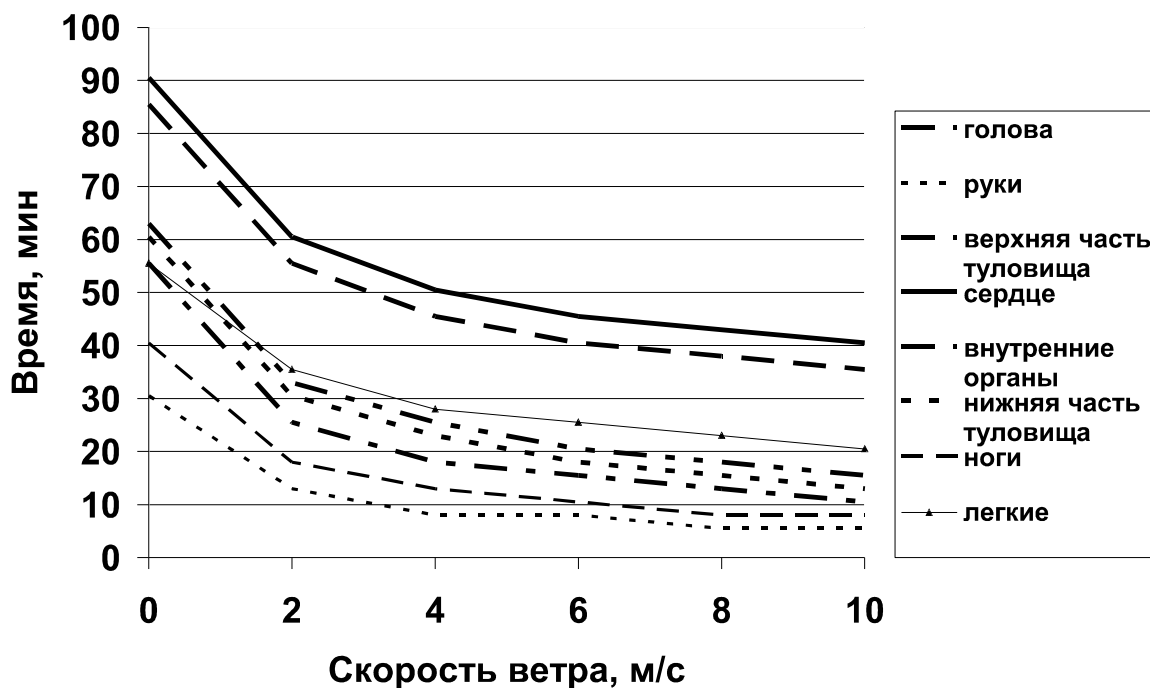


Рис. 4.8. Зависимость времени охлаждения от скорости движения воздушной среды при тепловом сопротивлении 0 clo.

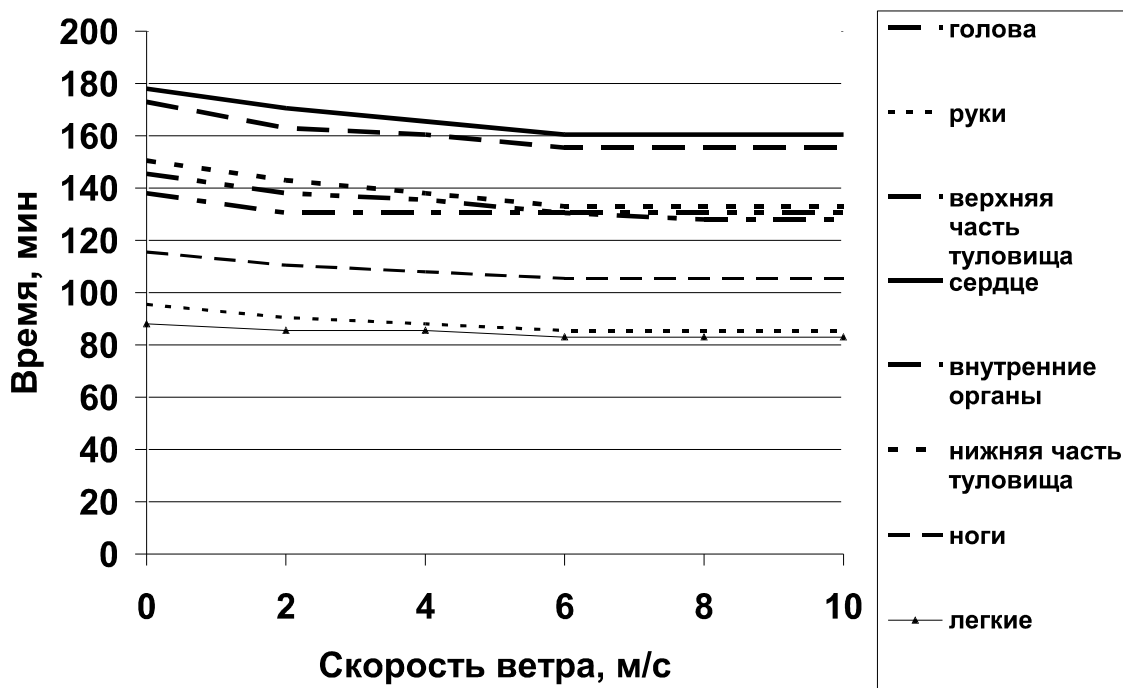


Рис. 4.9. Зависимость времени охлаждения от скорости движения воздушной среды при тепловом сопротивлении 3 clo.



4.3. Влияние величины внутренних тепловыделений на эффективность средств индивидуальной тепловой защиты

При выполнении физической нагрузки в организме человека происходит выделение тепла. Этот процесс называется теплопродукцией. Некоторую часть тепла выделяет печень человека (около 30%). Основное тепловыделение происходит в мышцах. Мощность внутренних тепловыделений измеряется в Вт. В таблице 4.7 приведены данные о количестве тепла, выделяемого организмом человека во время различных видов физической активности.

Таблица 4.7

Вид физического упражнения	<i>Met</i> (1 <i>Met</i> = 58 Вт/м ²)
Тренажер	3–4
Современные и народные танцы	4–5
Физкультура	4–6
Теннис	5–7
Аэробика	6–8
Бег 15 км/ч	9
Бег 12 км/ч	8
Бег 9 км/ч	7
Боевые искусства, бокс	7–9
Велотренажер	8–10

На рис. 4.10 представлен график зависимости времени охлаждения до критической температуры от теплопродукции организма при температуре окружающей среды 0°C. По оси *x* отложена теплопродукция организма в Вт, по оси *y* – время допустимого пребывания на холоде в минутах. Разными линиями показана одежда с тепловым сопротивлением 3 *clo* (обычная синтепоновая одежда) и 7 *clo* (одежда из верблюжьей шерсти). На рис. 5.11 в том же виде



представлены результаты расчета при -30°C . Видно, что при -30°C интенсивная физическая нагрузка малоэффективна. При 0°C с увеличением теплопродукции от 50 до 100 Вт время пребывания на холоде увеличивается незначительно. При дальнейшем увеличении теплопродукции – заметно увеличивается. Для -30°C , в отличие от 0°C , большой разницы между двумя материалами не наблюдается (разница во времени охлаждения до критической температуры составляет от 2 до 4 минут).

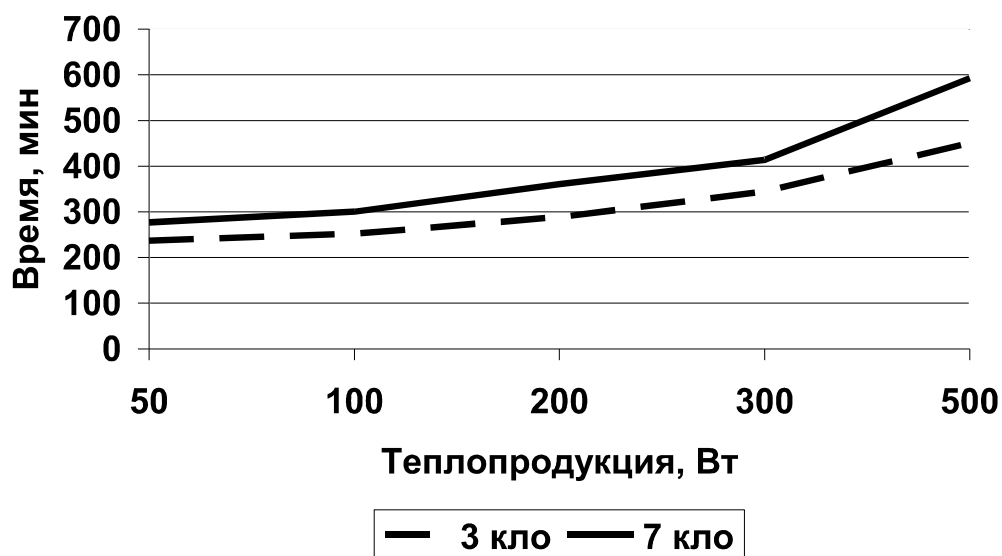


Рис. 4.10. График зависимости времени охлаждения от теплопродукции при 0°C .

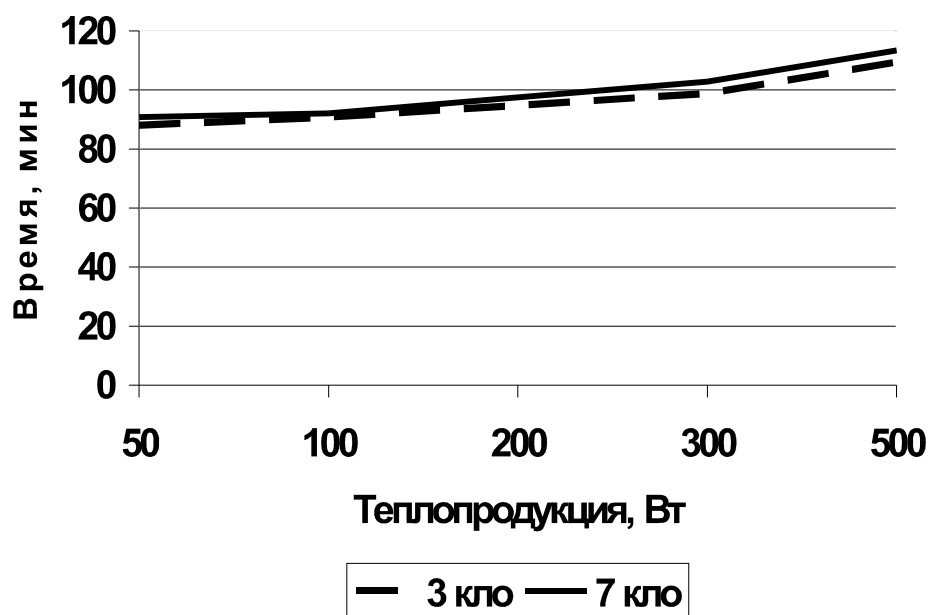


Рис. 4.11. График зависимости времени охлаждения от теплопродукции при -30°C .

4.4. Исследование влияния индивидуальных параметров организма

Влияния пола. На рис. 4.12 представлен график зависимости изменения температуры ядра от времени в зависимости от пола. Исследования проводились для задачи охлаждения мужчин и женщин 20 лет на воздухе при температуре -18°C и скорости ветра $3,6 \text{ м/с}$ в защитной одежде с тепловым сопротивлением 3 clo . По оси x отложено время пребывания на холоде в минутах, по оси y – температура ядра в $^{\circ}\text{C}$. Разными линиями показаны части тела. Из графика видно, что женщины замерзают быстрее мужчин (в течение 101,6 минут в отличие от 109,6 минут).

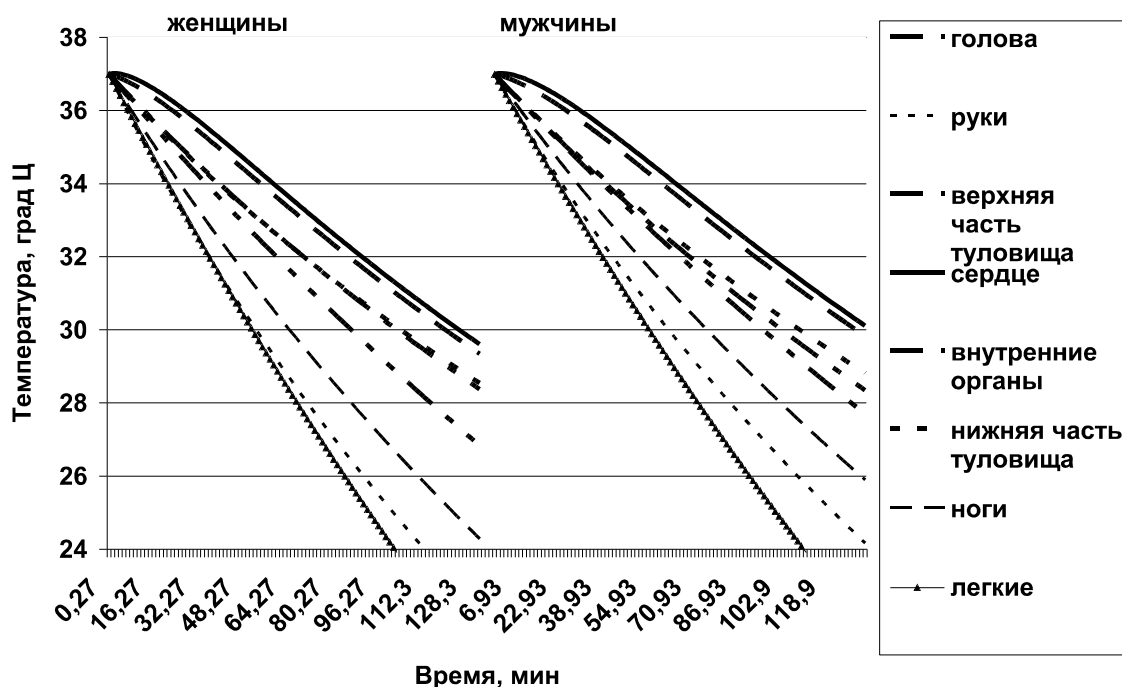


Рис. 4.12. Влияние пола на процесс охлаждения (20 лет)

На рис. 4.13 представлен график зависимости изменения температуры ядра от времени в зависимости от пола для мужчин и женщин 30 лет. Из графика видно, что женщины замерзают быстрее мужчин (в течение 108 минут в отличие от 117 минут).

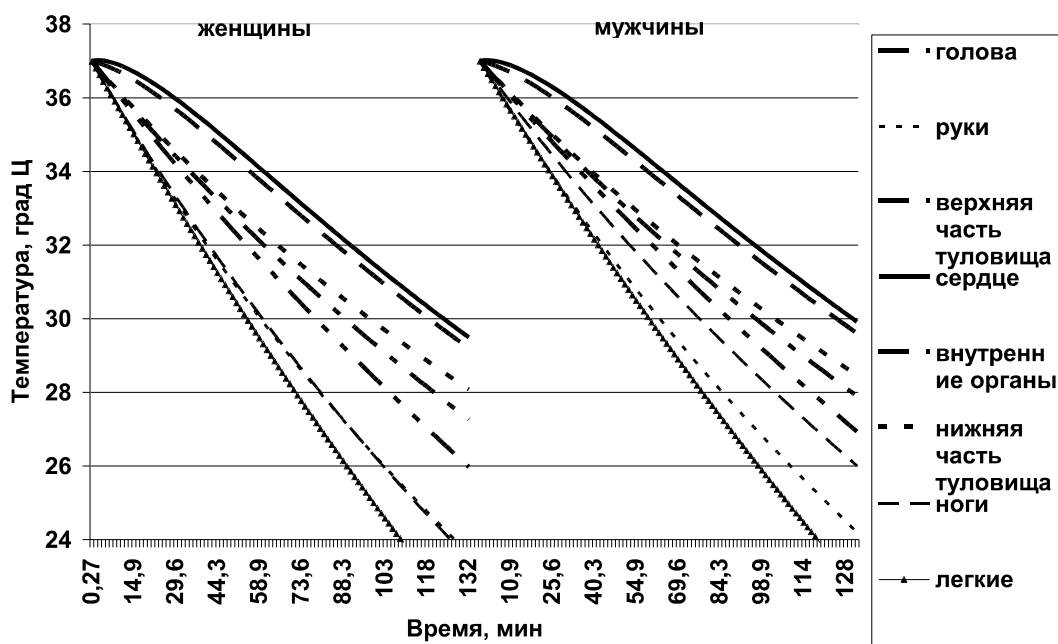


Рис. 4.13. Влияние пола на процесс охлаждения (30 лет)

На рис. 5.14 представлен график зависимости изменения температуры ядра от времени в зависимости от пола для мужчин и женщин 50 лет. Из графика видно, что мужчины замерзают быстрее женщин (в течение минут 97,6 в отличие от 104,27 минут).

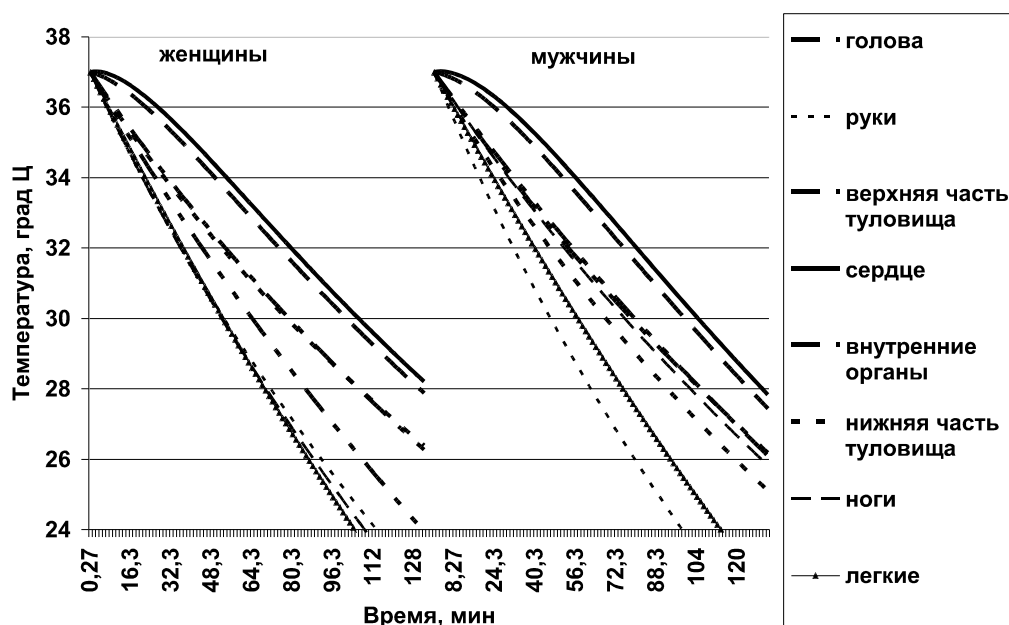


Рис. 4.14. Влияние пола на процесс охлаждения (50 лет)

Влияния возраста. На рис. 4.15 показан график зависимости температур «ядра» разных частей тела от времени для задачи охлаждения мужчины, находящегося на воздухе при температуре -18°C и скорости ветра $3,6\text{ м/с}$ и одетого в защитный костюм с тепловым сопротивлением 3 clo . На рис. 4.16 приведен график зависимости температур «ядра» разных частей тела от времени для задачи охлаждения женщины при тех же условиях. По оси x отложено время пребывания на холоде в минутах, по оси y – внутренняя температура в $^{\circ}\text{C}$. Разными линиями показаны части тела. Слева направо расположены графики для разных возрастов: 20, 30 и 50 лет. Видно, что в 30 лет человек мерзнет меньше (пороговая температура достигается за 117,6 минут в отличие от 109,6 минут в возрасте 20 лет и 97,6 минут в возрасте 50 лет у

мужчин и 108,27 минут в отличие от 101,6 минут в возрасте 20 лет и 104,27 минут в возрасте 50 лет у женщин). Интересной особенностью является то, что в зависимости от возраста разные части тела замерзают по-разному.

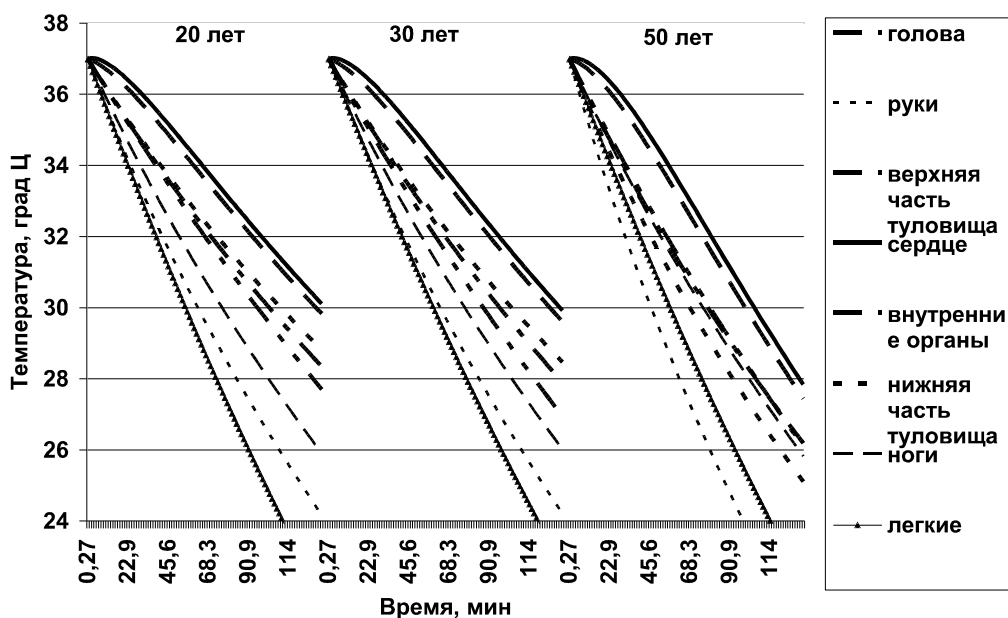


Рис. 4.15. Зависимость внутренних температур от времени для мужчин разного возраста

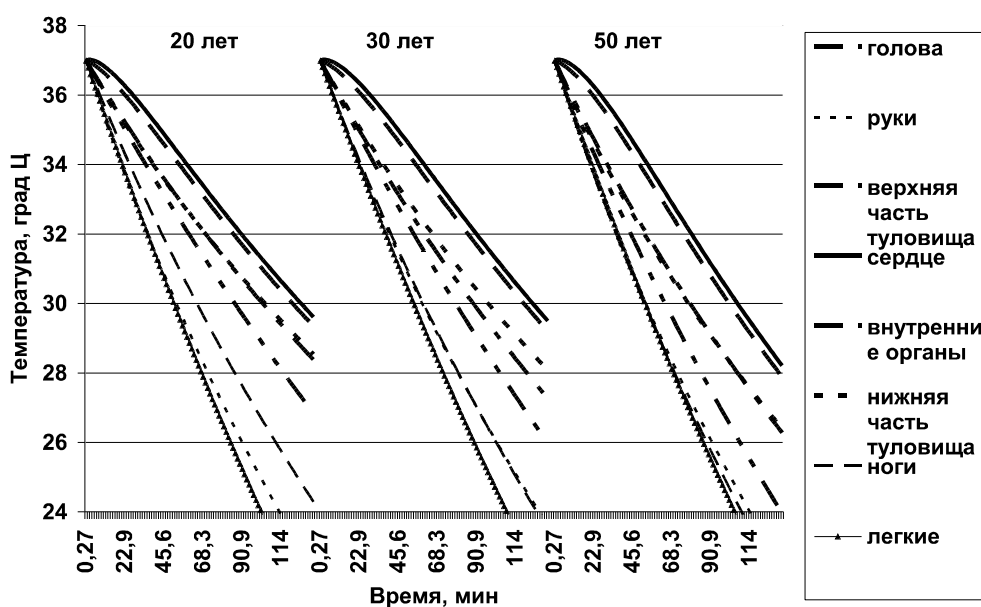


Рис. 4.16. Зависимость внутренних температур от времени для женщин разного возраста

Влияние индивидуального типа конституции. Для расчета процесса охлаждения конкретного человека требуется учесть индивидуальные параметры его организма. С этой целью измеряются его рост, вес, окружности грудной клетки, талии, бедер, рук, ног, шеи и головы. Далее происходит расчет процентного содержания жира в организме.

На рис. 4.17 представлен график зависимости внутренней температуры от времени охлаждения при температуре окружающей среды -40°C . Исследования проводятся для индивидуальных параметров организма без защитной одежды. По оси x отложено время пребывания на холоде в минутах, по оси y – внутренняя температура в $^{\circ}\text{C}$. Разными линиями показаны части тела. Видно, что для большинства частей тела разница в процессе охлаждения незначительна (разница во времени охлаждения не превышает 5 минут).

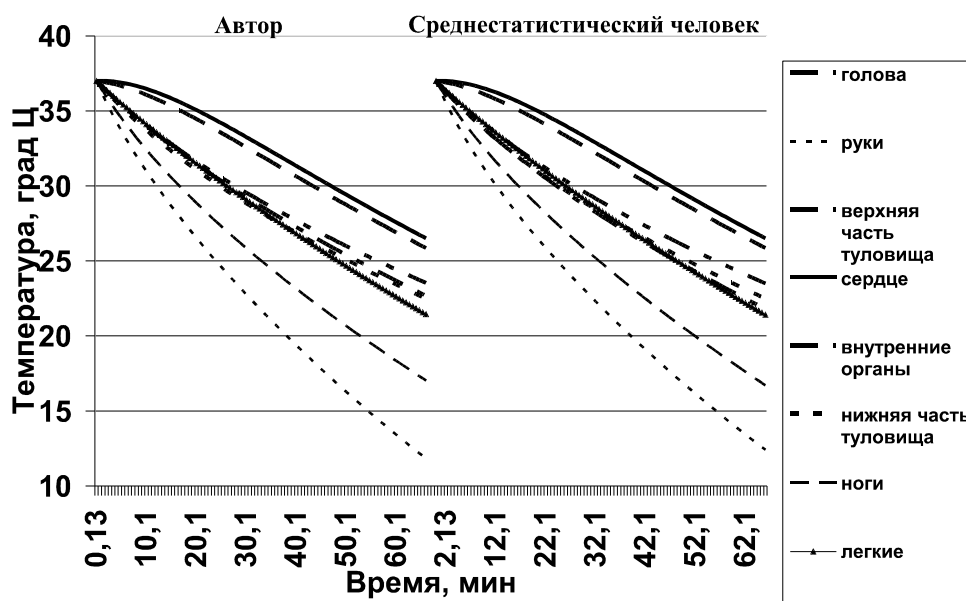


Рис. 4.17. Зависимость внутренней температуры от времени охлаждения при 0°C

На рис. 4.18 в том же виде представлен график зависимости внутренней температуры от времени охлаждения при температуре окружающей среды -40°C .

Видно, что для большинства частей тела разница в процессе охлаждения незначительна (разница во времени охлаждения не превышает 5 минут).

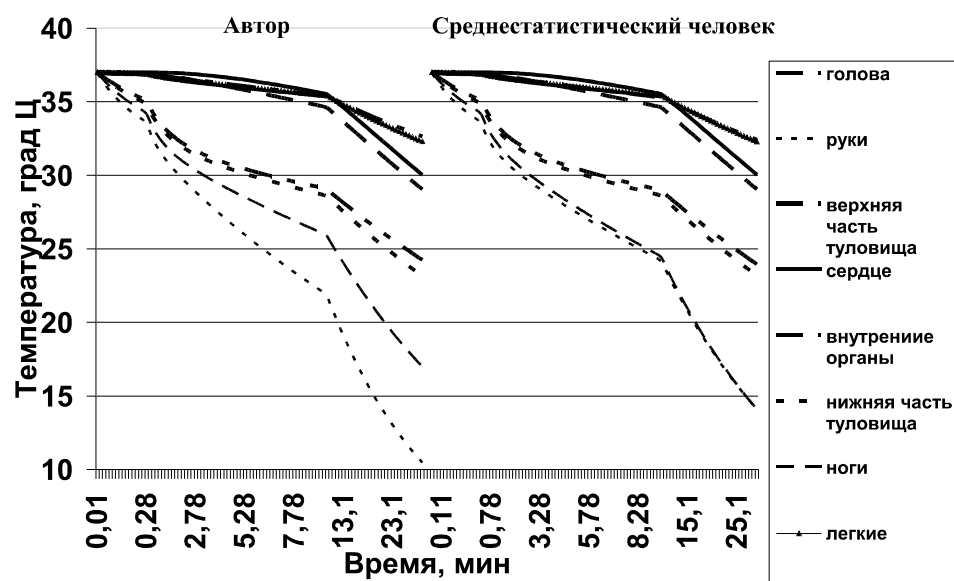


Рис. 4.18. Зависимость внутренней температуры от времени охлаждения при -40°C

Влияние психо-морфологических особенностей. На графиках представлены задача охлаждения мужчин 30 лет, экстраверта и интроверта. Находящихся в воде и в воздухе без защитного костюма и в костюме с различным термическим сопротивлением clo). Температура воды $+4^{\circ}\text{C}$, воздуха -40°C . Нагрузки в воде 500 Вт, в воздухе 200 Вт. На графиках (рис. 4.19, рис. 4.20) показана задача охлаждения человека в воздухе без защитного костюма и в защитном костюме с термическим сопротивлением 1, 2 и 3 clo .

Пребывание человека на воздухе без защитного костюма. Пороговое значение ректальной температуры 24°C . Этого значения у экстравертов кожа рук достигает за 4,5 минуты, ног за 6 мин., туловища за 8-10 минут, причём сначала остывает нижняя часть туловища. Кожа головы пересекает пороговое значение температуры за 8 минут. Общее время нахождения на воздухе, без угрозы для жизни, для человека без защитного костюма составляет 4-6 минут. У



интровертов кожа рук достигает порогового значения температуры за 4 минуты, ног за 5 мин., туловища за 8-9 минут, кожа головы пересекает пороговое значение температуры за 8 минут. Общее время нахождения на воздухе, без угрозы для жизни, для человека без защитного костюма составляет 4-5 минут.

Применение защитного костюма с термическим сопротивлением 1 clo позволяет увеличить пребывание на воздухе, без угрозы для жизни: для экстравертов до 12-15 минут (пороговое значение ректальной температуры кожа рук пересекает за 12 минут, ног за 15 минут, туловища за 18-20 мин., головы за 22 мин.); для интровертов до 11-14 минут (пороговое значение ректальной температуры кожа рук пересекает за 11 минут, ног за 14 минут, туловища за 17-20 мин., головы за 20 мин.).

Применение защитного костюма с термическим сопротивлением 2 clo позволяет увеличить пребывание на воздухе, без угрозы для жизни: для экстравертов до 20-25 минут; для интровертов до 18-24 минут.

Применение защитного костюма с термическим сопротивлением 3 clo позволяет увеличить пребывание на воздухе: для экстравертов до 28-36 минут; для интровертов до 26-33 минуты.

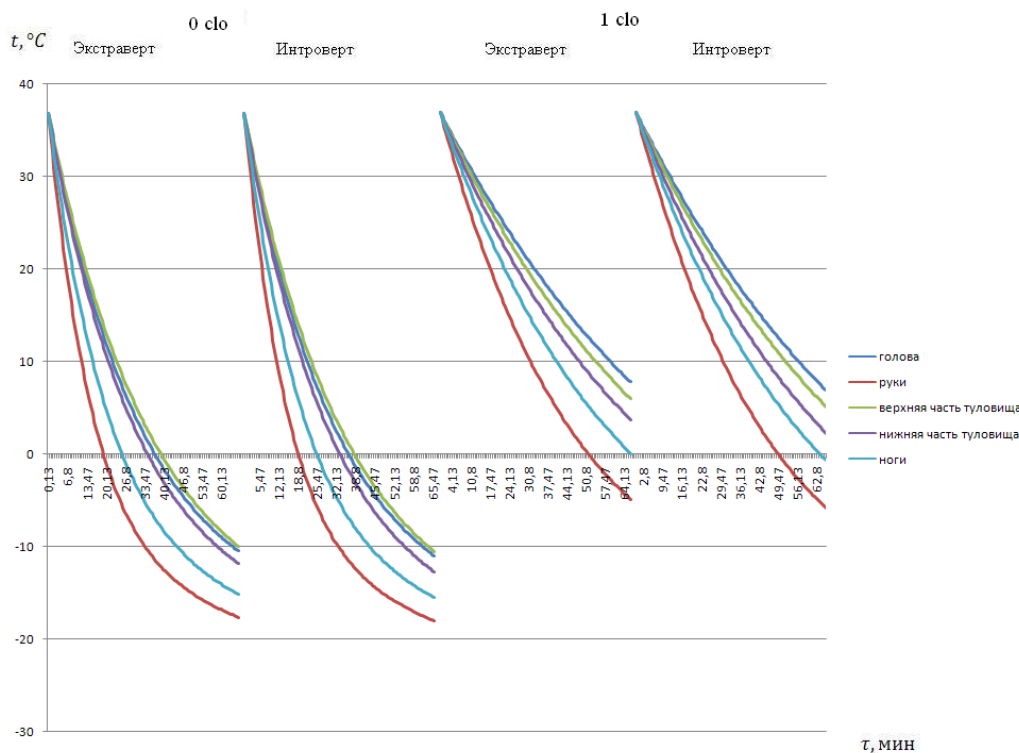


Рис. 4.20. График зависимости температуры кожи от времени охлаждения в воздухе без защитного костюма и с защитным костюмом термическим сопротивлением 1 clo.

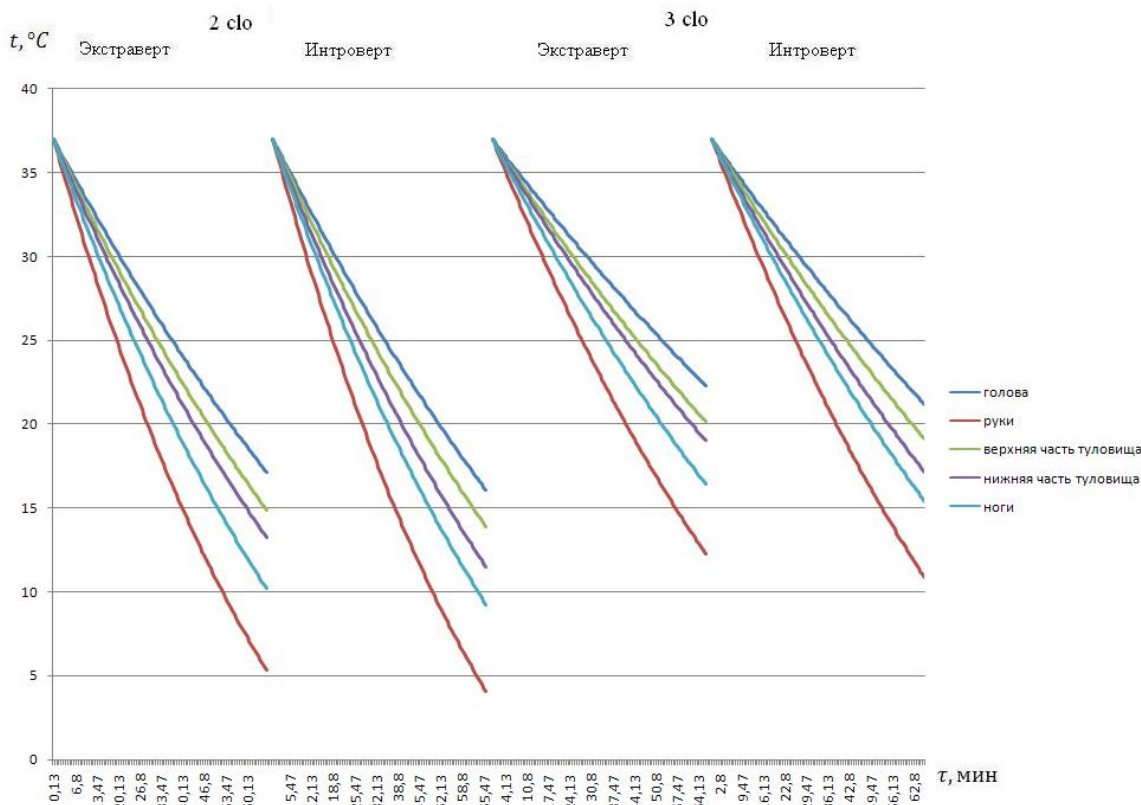


Рис. 4.19. График зависимости температуры кожи от времени охлаждения в воздухе с защитным костюмом термическим сопротивлением 2 и 3 clo.

На графиках (рис. 4.21, рис. 4.22) показана задача охлаждения человека в воде без защитного костюма и в защитном костюме с термическим сопротивлением 1, 2 и 3 clo.

Пребывание человека в воде без защитного костюма. Пороговое значение ректальной температуры 24°C . Этого значения у экстравертов кожа рук достигает за 16 секунд, ноги за 22 сек., туловище за 30-40 сек., причём сначала остывает нижняя часть туловища. Общее время нахождения на воде, без угрозы для жизни, для человека без защитного костюма составляет 10-30 секунд. У интровертов кожа рук достигает пороговое значение за 20 секунд, ноги за 22 сек., туловище за 25-30 сек., причём сначала остывает нижняя часть туловища.

Общее время нахождения на воде, без угрозы для жизни, для человека без защитного костюма составляет 10-25 секунд.

Применение защитного костюма с термическим сопротивлением 1 *clo* позволяет увеличить пребывание в воде, без угрозы для жизни: для экстравертов до 10 минут ; для интровертов до 15 минут.

Применение защитного костюма с термическим сопротивлением 2 *clo* позволяет увеличить пребывание в воде, без угрозы для жизни: для экстравертов до 20 минут; для интровертов до 18 минут .

Применение защитного костюма с термическим сопротивлением 3 *clo* позволяет увеличить пребывание в воде: для экстравертов до 28 минут; для интровертов до 26 минуты .

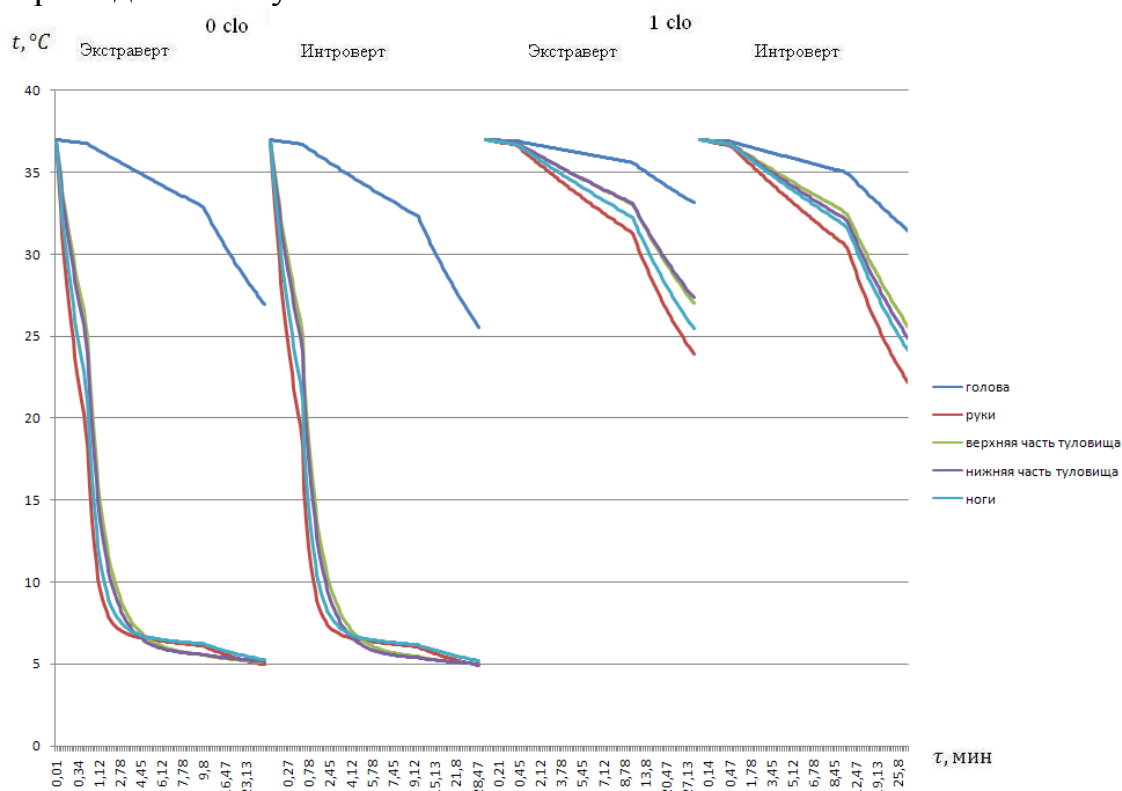


Рис. 4.21. График зависимости температуры кожи от времени охлаждения в воде без защитного костюма и с защитным костюмом термическим сопротивлением 1 *clo*.

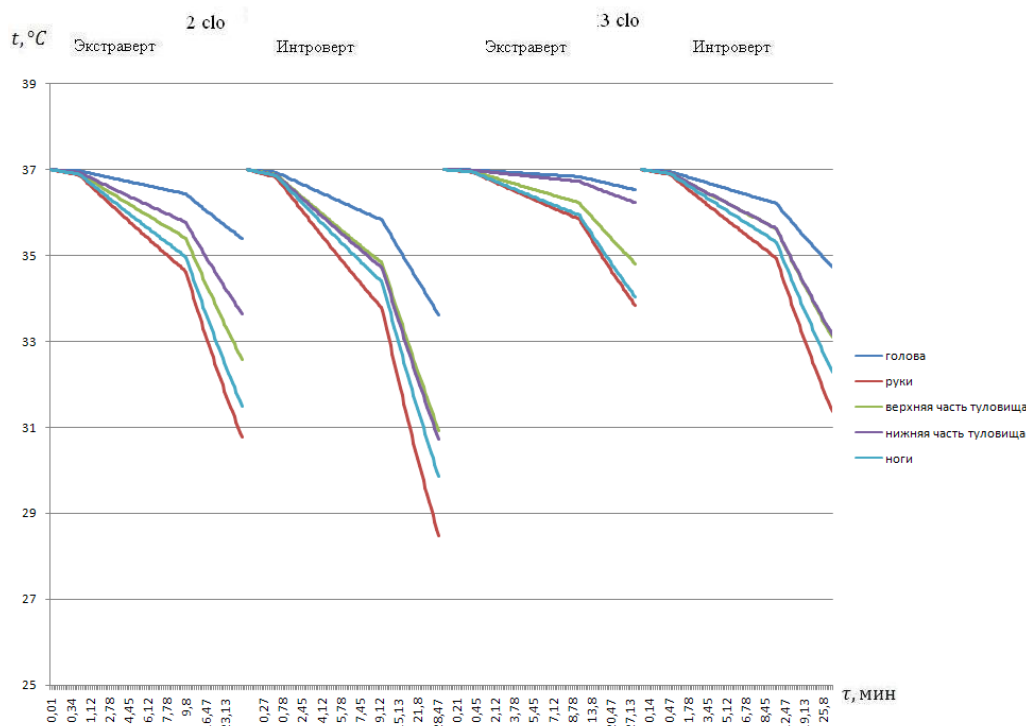


Рис. 4.22. График зависимости температуры кожи от времени охлаждения в воде с защитным костюмом термическим сопротивлением 2 и 3 clo.

Установлено, что разные части тела охлаждаются с разной скоростью, причём быстрее всего остывает кожа рук и ног, затем туловища и головы. Применение защитного костюма позволяет значительно увеличить время пребывания человека в холодной среде на 10-60 %. Охлаждение в воде происходит гораздо быстрее, чем в воздухе. Экстраверты и интроверты реагируют на охлаждение по-разному. В целом экстраверт может находиться в холодной среде на 10-20% дольше, чем интроверт. Это обусловлено тем, что в экстремальных условиях у интровертов система термостабилизации сильнее срабатывает на обогрев внутренних органов, а у экстравертов наоборот. Поэтому для интровертов и экстравертов должны применяться разные виды защитных костюмов.

4.5. Особенности влияния невесомости и гиподинамии на перераспределение тепла между расчетными элементами системы

Отдельное исследование посвящено вопросам проектирования специализированной одежды, в том числе из высокоэластичных мембран, используемых для конструирования высотно-компенсирующих костюмов летчиков, костюмов постоянного ношения для космонавтов, спортивной одежды, в том числе горнолыжников паралимпийцев.

Первоначально мембранные ткани использовались для комплектации скафандров – тепло удерживают, извне влагу не пропускают, а от тела успешно отводят ее. Сегодня в сшитые из дышащих материалов куртки, комбинезоны и прочее экипируются спортсмены, альпинисты и просто туристы. Мембрана представляет собой либо тончайшую пленку, ламинированную к верхней ткани, либо горячую прпитку, нанесенную на материал. В пленке могут быть микроскопические поры, через которые не проникнуть внутрь каплям дождя, но которые способны испарить водяной пар изнутри (нагреваясь при физических нагрузках, тело начинает потеть, и в результате возникает разница давления паров под мембраной и снаружи) (рис. 4.23). Есть мембраны гидрофильные (без пор), они работают за счет открытых связей специальных химических соединений.



Рис. 4.23. Структура мембранного материала.



Аналогично мембранам, термобелье так же разрабатывали изначально для космонавтов. Оно представляет собой нательную одежду из синтетических (полиэстер, полипропилен) или полусинтетических (с шерстью и хлопком) тканей, структура которых позволяет отводить от тела образующуюся на нем влагу по принципу мембран. В зависимости от предназначения, термобелье создают из тканей с различным удельным весом.

Для оценки теплотерь человека в условиях невесомости (космонавт) и гиподинамии (горнолыжник-паралимпиец) в настоящей работе проведен расчет массового расхода крови (теплоносителя). Суммарный объем крови и у космонавта (на 37%) и у паралимпийца (на 8%) меньше нормы (рис. 5.24), что приводит к уменьшению интенсивности конвективного теплообмена с током крови между «ядром» к «оболочкой». Кроме того, наблюдается значительное перераспределение крови между частями тела (расчетными элементами). У космонавта значительно (на 9%) увеличивается расход крови на голову и снижается на 5% и 7% на туловище и ноги соответственно (рис. 4.25 – 4.27). При этом картина отклонений от нормы для космонавта и паралимпийца имеет общую качественную тенденцию (рис. 4.28).

Исходя из полученных результатов, следует применять утепляющие элементы на тех частях, где кровоснабжение ухудшено: ноги, спина, грудная клетка (рис. 4.29 – 4.30).



Рис. 4.24. Суммарный минутный объем крови (МОК) в %



Рис. 4.25. Распределение крови по тканям для нормы в %



Рис. 4.26. Распределение крови по тканям для космонавта в %



Рис. 4.27. Соотношение МОК, % для частей тела.



Рис. 4.28. Отклонение МОК от нормы для космонавта и паралимпийца.

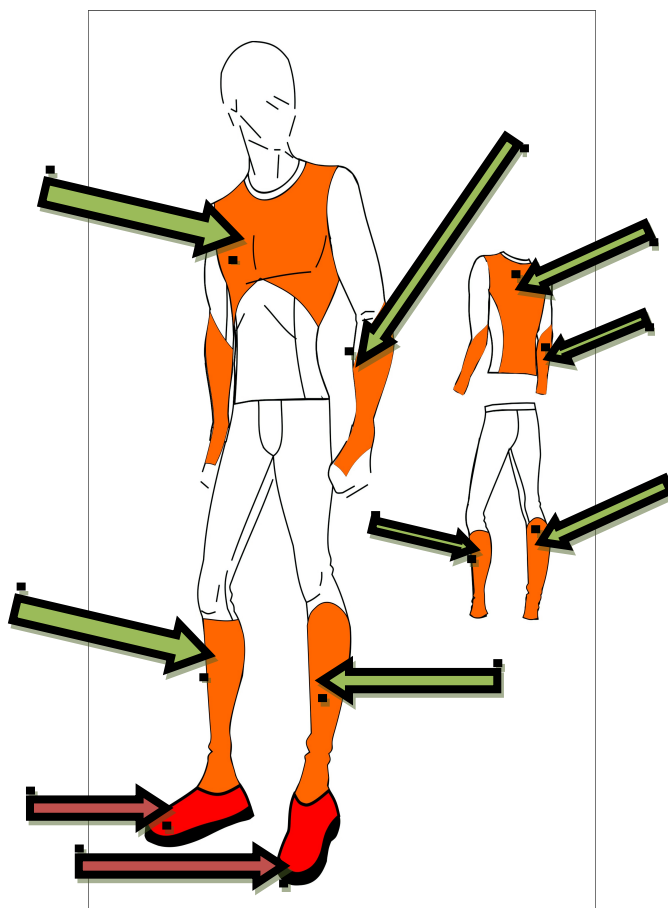


Рис. 4.29. Утепляющие конструктивные элементы в конструкции термобелья для космонавтов на МКС (в невесомости).



Рис. 4.30. Ветрозащитный костюм для космонавтов, предназначенный для аварийной посадки в зимнее время ()утепляющие конструктивные элементы.

Выводы

1. Представлены результаты исследований основных закономерностей теплообмена в системе «человек – тепловая защита окружающая среда» в условиях низких температур. Исследовано влияние параметров окружающей среды, мощности внутренних источников тепла, индивидуальных параметров организма, а так же влияние термического сопротивления теплоизоляции защитных костюмов.

2. 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.

3. 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



4. Применение защитного костюма позволяет значительно увеличить время пребывания человека в холодной среде на 10-60 %. Охлаждение в воде происходит гораздо быстрее, чем в воздухе. Большое влияние на процесс охлаждения оказывают индивидуальные параметры организма: пол, возраст, тип конституции, псих-морфологическое состояние. Экстраверты и интроверты реагируют на охлаждение по-разному. В целом экстраверт может находиться в холодной среде на 10-20% дольше, чем интроверт. Это обусловлено тем, что в экстремальных условиях у интровертов система термостабилизации сильнее срабатывает на обогрев внутренних органов, а у экстравертов наоборот.

5. Установлено значительное перераспределение крови между частями тела в зависимости от таких факторов как невесомость и гиподинамия.. У космонавта значительно (на 9%) увеличивается расход крови на голову и снижается на 5% и 7% на туловище и ноги соответственно. При этом картина отклонений от нормы для космонавта и горнолыжника паралимпийца имеет общую качественную тенденцию. Исходя из полученных результатов, следует применять утепляющие элементы на тех частях, где кровоснабжение ухудшено: ноги, спина, грудная клетка.