

УДК 536.24

**АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФОРМУЛ  
ТЕПЛОВОГО БАЛАНСА ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО ОРГАНИЗМА  
ДЛЯ ПОСЛЕДУЮЩЕГО РАСЧЕТА  
ТЕРМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ СТЕГАНЫХ ОДЕЯЛ**

*К.Э. РАЗУМЕЕВ, А.В. РАЗБРОДИН*

**(Московский государственный текстильный университет им. А.Н. Косыгина,  
ОАО НПК "ЦНИИШерсть")**

При всем многообразии выпускаемых различными отечественными и зарубежными фирмами стеганых одеял, как показала проведенная нами их систематизация и классификация [1], основным их назначением является снижение теплопотерь человеческого организма во время сна, создание под одеялом необходимого микроклимата. Создаваемый микроклимат

должен обеспечить человеку во время сна тепловой комфорт, отвечающий определенным медико-гигиеническим требованиям [2].

Тепловое равновесие (тепловой баланс) между организмом человека во время сна и окружающей его средой соответствует условиям комфорта и зависит, в первую очередь, от температуры воздуха в помеще-

нии, где спит человек, характеристики и свойств постельных принадлежностей (одеяла, подушки, матраца), а также величины теплопродукции человека. Тепловое состояние человека во время покоя (положение лежа) и сна принимается нами в качестве основы для проектирования стеганых одеял.

Теоретически можно рассматривать одеяла как определенное подобие верхней одежды человека во время сна. Тогда к одеялам можно предъявлять определенные требования, как и к одежде. Одеяла, как и одежда, должны удовлетворять определенным характеристикам термического сопротивления для сохранения теплового баланса человека.

При этом окружающая среда, то есть температура воздуха и влажность в помещении, всегда более стабильны и изменяются в меньших пределах, чем за пределами помещения. Однако в состоянии сна человек не имеет возможности регулировать одеялом, как одеждой во время бодрствования, поэтому требования к свойствам одеял, расчет этих требований (термического сопротивления, воздухо- и паропроницаемости) должен быть более тщательным и точным, учитывающим специфику состояния спящего человека.

Величина теплового потока тела человека определяется из уравнения теплового баланса.

Уравнения теплового баланса, представленные в различных литературных источниках, хотя близки по построению, но отличаются как по отдельным элементам, так и по формулам, определяющим эти элементы.

Так, В.П. Скляльников [3] считает, что условия теплового равновесия, обеспечивающие состояние комфорта, могут быть выражены равенством:

$$M \pm R \pm C - E = \pm Q, \text{ Вт}, \quad (1)$$

где  $M$  – теплопродукция организма;  $R$  – теплопередача радиацией (теплоизлучением);  $C$  – теплопередача конвекцией (перемещением воздуха);  $E$  – теплопередача ис-

парением;  $Q$  – разница между  $M$  и суммой  $R, C, E$ .

Величины теплопередачи радиацией  $R$  и конвекцией  $C$  могут иметь как положительные, так и отрицательные значения.

Если температура наружной среды ниже температуры тела, то  $R$  и  $C$  отрицательны, то есть имеет место отдача тепла телом во внешнюю среду. Если температура среды выше температуры тела, то  $R$  и  $C$  положительны, то есть имеет место получение организмом тепла извне.

Теплоотдача испарением  $E$  всегда имеет отрицательный знак (организм отдает тепло). Тепловое равновесие имеет место только при  $Q = 0$ , если  $Q$  со знаком минус – требуется теплоизоляция, со знаком плюс – требуются меры по отведению тепла (в противном случае наступает перегревание организма).

При значениях  $+Q_1; +R_1; +C$  восстановить равновесие возможно, только увеличив теплопередачу испарением.

В зависимости от условий внешней среды соотношения между  $R, C$  и  $E$  могут быть различными, но чаще всего, если принять значение всей теплопередачи за 100 %,  $R = 44\%$ ,  $C = 33\%$ , а  $E = 23\%$ .

Применительно к расчету одеял, на наш взгляд,  $R$  и  $C$  будут отрицательны, так как температура воздуха в помещении, где спит человек, обычно от  $+10$  до  $+25$ , что ниже температуры кожи  $\sim 33^\circ\text{C}$ , и тела  $\sim 37^\circ\text{C}$ , то есть имеет место отдача тепла телом во внешнюю среду.

Формула (1) примет вид:

$$M - R - C - E = \pm Q, \text{ Вт}. \quad (2)$$

Тепловой комфорт во время сна достигим при  $Q = 0$ .

Р.Ф. Афанасьева [4] считает, что комфортные теплоощущения могут сохраняться у человека в течение длительного времени только при условии обеспечения теплового баланса организма.

В общем виде тепловой баланс может быть представлен следующим уравнением:

$$M + R = Q_{\text{рад}} + Q_{\text{конв}} + Q_{\text{исп}} + Q_{\text{дых}} + L \pm D, \quad (3)$$

где  $M$  – энергетические затраты человека, Вт;  $R$  – тепло, получаемое человеком извне (за счет солнечной радиации или иных источников лучистого тепла), Вт;  $Q_{\text{рад}}$  – потери тепла радиацией, Вт;  $Q_{\text{конв}}$  – потери тепла конвекцией, Вт;  $Q_{\text{исп}}$  – потери тепла испарением влаги, Вт;  $Q_{\text{дых}}$  – потери тепла дыханием (за счет нагревания вдыхаемого воздуха), Вт;  $L$  – затраты тепла на механическую работу, Вт;  $D$  – дефицит тепла в организме человека, Вт.

Определение теплового баланса и степени его нарушения позволяет оценить теплоизоляционные свойства одежды, а также спрогнозировать время возможного пребывания человека в условиях ее эксплуатации.

В нашем случае при расчете одеял, когда человек находится в состоянии практически абсолютного покоя (лежа; во сне), фактически вся энергия, образующаяся при обмене  $M$ , выделяется в виде тепла  $Q$ .

Кроме того, человек не получает тепла извне (за счет солнечной или другой лучистой энергии) и не затрачивает тепло на механическую работу, То есть  $R=0$  и  $L=0$ .

При  $M = Q$  уравнение запишется так:

$$Q = Q_{\text{рад}} + Q_{\text{конв}} + Q_{\text{исп}} + Q_{\text{дых}} \pm D, \text{ Вт.} \quad (4)$$

На основе исследований зарубежных авторов (Fanger P.O. Thermal Comfort. Copenhagen. 1970, 244 s.) в [4] приводятся данные энергозатрат человека при различной физической деятельности (табл. 1).

Т а б л и ц а 1

Вид физической деятельности	Энергозатраты, М/С*, Вт/м	Эффективность механической работы, п	Подвижность воздуха, вызываемая движением человека, м/с
Покой	40,6	0	0
Полулежа	46,5	0	0
Сидя	58,1	0	0
Стоя	69,7	0	0

П р и м е ч а н и е. \*S – в данном случае – поверхность тела человека, м.

Данные об энергозатратах необходимы при расчетах допустимой величины теплопотерь организма, которые являются основой расчета теплового сопротивления одежды, требующегося для обеспечения нормальных условий теплообмена организма.

При изложении основ теории приближенного теплового расчета одежды П.А. Колесников в [5] приводит формулу Бютнера (с. 208). Бютнер (Buttner K. Compendium of Meteorology. Baston, 1952) предложил расчет теплового баланса тела человека вести по следующему уравнению:

$$Q = M + JF - (S + L + B)F + A + E, \text{ Вт,} \quad (5)$$

где  $M$  – теплообразование (теплопродукция), ккал/ч;  $Q$  – накопление или потеря тепла, ккал/ч;  $J$  – тепло, поступающее с солнечной радиацией (на 1 см кожи, кал);  $F$  – поверхность тела, облучаемого солнеч-

ными лучами, м;  $S$  – теплопотери излучением, ккал/м;  $L$  – теплопотери кондукцией и конвекцией, ккал/ч;  $A$  – теплопотери, связанные с нагреванием воздуха при дыхании, ккал/ч;  $B$  – теплопотери испарением кожи, ккал/м;  $E$  – теплопотери испарением в легких, ккал/ч.

Анализируя формулу Бютнера для оценки ее применимости для расчета одеял, отмечаем, что при  $J = 0$  произведение  $JF = 0$ . Кроме того, в значении  $L$  – потерях кондукцией и конвекцией, составляющая кондукций будет отсутствовать, так как во время сна (в большинстве случаев, за исключением расположения постели на полу) человек не контактирует с твердым предметом. Остается составляющая потерь конвекцией (назовем  $L_k$ ).

Формула (5) примет вид:

$$Q = M - (S + L + B)F + A + E, \text{ Вт.} \quad (6)$$

В целом применение данной формулы, учитывающей величину  $F$ , не подходит для расчета одеял.

Н.К. Витте [6] для расчета теплообмена тела человека с внешней средой предлагает следующую формулу:

$$+/-Q = M +/- S +/- L - E, \text{ Вт}, \quad (7)$$

где  $Q$  – величина задержанного в организме или потерянного тепла, ккал/мм;  $M$  – величина теплопродукции;  $S$  – теплоотдача радиацией;  $L$  – теплоотдача конвекцией;  $E$  – теплоотдача испарением.

Формула (7) только в самом общем виде описывает тепловой баланс человека, а для расчета одеял требуется детализация по ее отдельным компонентам.

П.А. Колесников, рассматривая вопросы теплопродукции и теплоотдачи человека [5], отметил, что общее количество тепла, отдаваемого человеком в окружающую среду в течение одного часа ( $Q$  ккал/час), в общем виде может быть определено как сумма следующих отдельных видов теплоотдачи: кондукцией  $Q_1$ ; конвекцией  $Q_2$ ; излучением  $Q_3$ ; испарением пота  $Q_4$ ; испарением влаги в легких  $Q_5$ ; нагреванием воздуха при дыхании  $Q_6$ , то есть :

$$Q=Q_1+Q_2+Q_3+Q_4+Q_5+Q_6, \text{ Вт}. \quad (8)$$

При этом отмечается, что теплопродукция организма человека должна быть равной теплоотдаче, что обеспечит постоянство температуры тела. Здесь же представлены отечественные и зарубежные материалы и расчеты по вопросам теплообмена организма человека с внешней средой [5].

Формула (8) при корректировке расчетов теплоотдачи кондукцией может рассматриваться и при расчете термического сопротивления одеял.

На наш взгляд, наиболее полно тепловой баланс человека представлен Р.А. Дель и др. в [7].

Авторы работы считают, что тепловой баланс достигается координацией процессов, направленных на образование тепла в организме (теплопродукция) и на его выделение (теплоотдача).

Теплообразование (теплопродукция) в наибольшей степени зависит от физиологических факторов, теплоотдача – от физических факторов окружающей среды. Физиологический фактор регулирует передачу тепла от внутренних органов и тканей человека к поверхности кожи.

В общем виде тепловой баланс человека представлен следующим уравнением:

$$Q_{\text{т.п}} + Q_{\text{т.в}} = Q_{\text{рад}} + Q_{\text{конв}} + Q_{\text{конд}} + Q_{\text{исп.д}} + Q_{\text{исп.дых}} + Q_{\text{исп.п}} + Q_{\text{дых.н}} +/- D, \text{ Вт}, \quad (9)$$

где  $Q_{\text{т.п}}$  – теплопродукция человека;  $Q_{\text{т.в}}$  – внешняя тепловая нагрузка (например, вследствие солнечной радиации);  $Q_{\text{рад}}$  – потери тепла радиацией;  $Q_{\text{конв}}$  – потери тепла конвекцией;  $Q_{\text{конд}}$  – потери тепла кондукцией;  $Q_{\text{исп.д}}$  – потери тепла вследствие испарения диффузионной влаги с поверхности кожи;  $Q_{\text{исп.дых}}$  – потери тепла вследствие испарения дыхания;  $Q_{\text{исп.п}}$  – потери тепла вследствие испарения пота;  $Q_{\text{дых.н}}$  – потери тепла вследствие нагревания вдыхаемого воздуха;  $D$  – изменение теплосодержания организма относительно комфортного уровня (дефицит тепла).

Все слагаемые уравнения теплового баланса отнесены к единице времени и выражены в ваттах.

Рассмотрим более подробно данное уравнение применительно к состоянию человека во время покоя (лежа) или комфортного сна.

Левая часть уравнения описывает теплопродукцию человека  $Q_{\text{т.п}}$  с возможной дополнительной тепловой нагрузкой  $Q_{\text{т.в}}$ . Что касается  $Q_{\text{т.в}}$ , то для рассматриваемого нами случая, оно отсутствует. В нашем случае вся энергия, вырабатываемая в теле человека  $Q_{\text{т.п}}$  – превращается полностью в тепловую  $Q_{\text{э.т}}$ , так как отсутствует внешняя механическая работа.

Тепловая энергия образуется в организме человека в результате биологического обмена веществ путем химических реакций с выделением тепла. Количество энергии, расходуемое организмом в состоянии покоя, соответствующей минимальной активности механизма терморегу-

ляции, называется основным (стандартным) обменом  $Q_0$ .

Таким образом, в левой части уравнения имеем:

$$Q_{т.п} + Q_{т.в} = Q_{э.т} + 0 = Q_0, \text{ Вт, (10),}$$

то есть теплопродукция человека в состоянии покоя (сна) равна основному обмену организма человека:

$$Q_{т.п} = Q_0.$$

В правой части уравнения (9), при нахождении человека в постели в состоянии сна или покоя, величиной  $Q_{конд}$  можно пренебречь, если постель не соприкасается непосредственно с твердым предметом (полом, землей и др.).

В современной кровати (диване, тахте) матрац, на котором спит человек, не соприкасается непосредственно с полом. Если матрац или то, что его заменяет, соприкасается с полом (частный случай), величина  $Q_{конд}$  учитывается в расчетах.

Кроме того, в обычных условиях в состоянии комфортного сна или покоя (лежа) с тела человека выделяется пар (так называемое сухое охлаждение), но не пот (так называемое мокрое охлаждение), то есть величину  $Q_{п}$  – потери тепла вследствие испарения пота, можно исключить.

Что касается дефицита тепла в организме в состоянии покоя (лежа) или сна, то его величина  $D$  – равна 0, если средства защиты человека во время сна (в нашем случае стеганые одеяла с наполнителем) обеспечивают тепловой баланс организма.

С этой целью, учитывая, что во время сна может иметь место постепенное понижение температуры окружающего воздуха, тепловое сопротивление стеганых одеял в дальнейшем рекомендуется рассчитывать

при наиболее низкой во время сна температуре в помещении, где спит человек.

Таким образом, уравнение теплового баланса организма человека во время покоя (лежа) или сна при комфортных теплоощущениях окончательно примет вид:

$$Q_0 = Q_{рад} + Q_{конв} + Q_{исп.д} + Q_{исп.дых} + Q_{дых.п}, \text{ Вт. (11)}$$

## ВЫВОДЫ

На базе аналитического исследования формул, предлагаемых различными авторами, найдено уравнение теплового баланса организма человека во время покоя (лежа) или сна при комфортных теплоощущениях.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Разбродин А.В.* Систематизация и классификация стеганых одеял с различными видами наполнителей // *Текстильная промышленность*. – 2003, № 7-8.
2. *Разбродин А.В.* Медико-гигиенические аспекты требований к созданию стеганых одеял. Здоровье населения и среда обитания. Информационный бюллетень. Ноябрь 2004, №11 (140). Федеральный центр Госсанэпиднадзора Минздрава России.
3. *Склянный В.П.* Потребительские свойства текстильных товаров. – М.: Экономика, 1982.
4. *Афанасьева Р.Ф.* Гигиенические основы проектирования одежды для защиты от холода. – М.: Легкая индустрия, 1977.
5. *Колесников П.А.* Теплозащитные свойства одежды. – М.: Легкая индустрия, 1965.
6. *Витте Н.К.* Тепловой обмен человека и его гигиеническое значение. – Киев: Госмедиздат, 1956.
7. *Дель Р.А., Афанасьева Р.Ф., Чубарова З.С.* Гигиена одежды. – М.: Легкая индустрия, 1979.

Рекомендована кафедрой технологии шерсти.  
Поступила 25.01.06.