

## ОГРАНИЧЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛОВОЙ ОБСТАНОВКИ В РАБОЧЕЙ ЗОНЕ ЦЕХА ПРИ ИНФРАКРАСНОМ ОБОГРЕВЕ

Инж. ДМИТРИЕВ Г. М.

*Государственное научное учреждение  
«Объединенный институт энергетических и ядерных  
исследований – Сосны» НАН Беларуси*

Стремление к повышению энергоэффективности производства привело к созданию многофункциональных автоматизированных систем инфракрасного (ИК) обогрева предприятий, которые не только экономично обеспечивают в холодный период года необходимую температуру в цехах, но и за счет специфики взаимодействия ИК-излучения с веществом интенсифицируют ряд технологических процессов (химических, биохимических, массообменных и т. п.). В основу расчета таких систем положен принцип минимума затрат на их изготовление и функционирование при ограничениях параметров тепловой обстановки, обусловленных технологией производства и физиологией человека.

Существующие нормы допустимых значений потоков ИК-излучения в помещениях разработаны в 60-е гг. для систем панельно-лучистого отопления и не отражают теплоощущения человека при обогреве современными аппаратами, генерирующими инфракрасное излучение с заданными характеристиками. Данные нормы сдерживают разработку и внедрение многофункциональных ИК-систем, не позволяют в полной мере реализовать их потенциальные возможности. В связи с этим встал вопрос о пересмотре устаревшей нормативной базы.

**1. Тепловой баланс организма человека; первое ограничение параметров тепловой обстановки.** Все внутренние органы человека нормально функционируют лишь в узком температурном диапазоне. Система терморегуляции обеспечивает поддержание температуры тела в нужных пределах; она состоит из теплового центра, расположенного в гипоталамусе, термочувствительных нервных клеток, терморецепторов внутренних органов, кожи с нервными подводящими путями, потовых желез, скелетных мышц. При нахождении человека в жарком помещении механизм терморегуляции направлен на увеличение теплоотдачи путем интенсификации кровообращения и потоотделения; в охлажденной среде он увеличивает как количество вырабатываемой организмом теплоты, так и сопротивление теплопередаче тканей за счет повышения мышечного тонуса и сужения кровеносных сосудов [1].

Таким образом, система терморегуляции с целью поддержания постоянной температуры тела приводит в соответствие количество поступающей теплоты количеству теплоты, отдаваемой во внешнюю среду. Состав

вим тепловой баланс человека и определим избыток (недостаток) теплоты в его организме

$$\Delta Q = Q_g + Q_I - Q_K - Q_R - Q_W - Q_{WB} - Q_{WD} - Q_B, \quad (1)$$

где  $Q_g$  – тепловая мощность, генерируемая организмом человека;  $Q_I$  – мощность инфракрасного излучения, поглощаемая одеждой;  $Q_K$  – то же, получаемая (отдаваемая) человеком в результате конвективного теплообмена с окружающим воздухом;  $Q_R$  – то же, получаемая (отдаваемая) человеком в результате радиационного теплообмена с ограждающими конструкциями;  $Q_W$  – то же, затрачиваемая на испарение пота;  $Q_{WB}$  – то же на испарение влаги с верхних дыхательных путей;  $Q_{WD}$  – то же на диффузию влаги через кожу и ее испарение;  $Q_B$  – то же на нагрев вдыхаемого воздуха.

В статье используется ряд величин, терминов и эмпирических уравнений, применяемых в санитарии, в связи с чем приводится размерность параметров, входящих в расчетные формулы. В частности, все разновидности мощностей имеют размерность Вт, а температуры даны в градусах Кельвина.

Генерация энергии в организме человека происходит вследствие процессов биохимического синтеза белков и других органических соединений. Часть выделившейся энергии расходуется на выполнение внешней механической работы, а оставшаяся доля переходит в теплоту. Скорость производства энергии зависит от тяжести выполняемой работы; возрастание физических усилий для осуществления какой-либо деятельности требует интенсификации ее выделения, что тождественно ускорению обмена веществ. Активность деятельности определяется параметром  $X$ , равным отношению мощности энерговыделения к площади поверхности тела человека. В качестве единицы активности принята величина 1 МЕТ, соответствующая удельной мощности энерговыделения человека в сидячем положении в состоянии покоя (1 МЕТ равен  $58 \text{ Вт/м}^2$ ).

Количество производимой энергии, переходящей в теплоту за 1 с, определим из уравнения

$$Q_g = 58 X F_M (1 - \eta), \quad (2)$$

где  $\eta$  – эффективность механической работы (безразмерная величина);  $F_M$  – площадь поверхности тела человека,  $\text{м}^2$ .

Значения величин  $X$  и  $\eta$  для различных видов деятельности приведены в монографиях [2, 3].

Лучистый поток от инфракрасных излучателей, попадающий на человека, частично отражается одеждой, а частично поглощается ею и пере-

ходит в теплоту. Доля лучистой энергии, поглощаемой за одну секунду, равна

$$Q_I = Q_M F_{Cl} a_{Cl}, \quad (3)$$

где  $Q_M$  – плотность лучистого потока от ИК-излучателей, падающего на одежду человека, Вт/м<sup>2</sup>;  $a_{Cl}$  – доля поглощенного одеждой лучистого потока;  $F_{Cl}$  – площадь поверхности одежды, м<sup>2</sup>.

Тепловую мощность, отдаваемую либо получаемую за счет конвекции, определим из выражения Ньютона

$$Q_K = \alpha_K F_{Cl} (t_{Cl} - t_0), \quad (4)$$

где  $t_{Cl}$  – температура поверхности одежды;  $t_0$  – то же воздуха в помещении;  $\alpha_K$  – коэффициент теплоотдачи с поверхности одежды человека, Вт/(м<sup>2</sup>·К); согласно [3], он рассчитывается по формуле

$$\alpha_K = 2,4 |t_{Cl} - t_0|^{0,25} + 12,1 u_{\Sigma}^{0,5}. \quad (5)$$

Интенсивность конвективной теплоотдачи зависит от подвижности воздуха, которая, в свою очередь, зависит от кратности воздухообмена в помещении, величины естественной конвекции и рода деятельности человека. Скорость воздуха  $u_{\Sigma}$ , м/с, в этом случае является суммой скоростей движения всей его массы в помещении  $u$  и локального перемещения  $u_g$  за счет выполнения человеком работы

$$u_{\Sigma} = u + u_g. \quad (6)$$

Второе слагаемое является функцией параметра  $X$  [2].

Значение теплового потока, отдаваемого или получаемого человеком от внутренних поверхностей ограждений за счет радиационного механизма теплопереноса, найдем с помощью закона Стефана – Больцмана

$$Q_R = 5,67 \cdot 10^{-8} \tilde{\epsilon} k_R F_{Cl} (t_{Cl}^4 - t_R^4). \quad (7)$$

Здесь  $\tilde{\epsilon}$  – приведенная степень черноты одежды;  $k_R$  – доля поверхности тела человека, участвующая в радиационном теплообмене с ограждающими конструкциями (в положении стоя  $k_R = 0,95$ , в положении сидя  $k_R = 0,71$ );  $t_R$  – средневзвешенная радиационная температура внутренних поверхностей ограждений.

Температура поверхности одежды  $t_{Cl}$  не является показателем теплового состояния организма человека. Определим связь между ней и темпе-

ратурой тела  $t_M$ . Процесс теплопередачи через одежду включает перенос энергии через воздушные прослойки, твердые материалы, радиационный теплообмен между слоями и волокнами тканей. Для упрощения описания этого процесса в санитарии введен суммарный коэффициент сопротивления теплопередаче одежды  $R_{Cl}$ , который измеряют в Кло. 1 Кло соответствует тепловому сопротивлению пиджачного костюма с обычным нижним бельем и равен  $0,155 \text{ (м}^2\cdot\text{К)/Вт}$ . В этом случае условие шивки тепловых потоков на внешней поверхности одежды человека имеет вид

$$\frac{1 + f_{Cl}}{0,31 f_{Cl} R_{Cl}} (t_M - t_{Cl}) = \alpha_K (t_{Cl} - t_0) + 5,67 \cdot 10^{-8} \tilde{\epsilon} k_R (t_{Cl}^4 - t_R^4) - Q_M \alpha_{Cl}, \quad (8)$$

где  $f_{Cl}$  – отношение площади поверхности одежды к площади тела человека; его значения приведены в [2].

Величина потоотделения определяется уровнем физической активности человека, метеорологическими условиями, термическим сопротивлением одежды. Часть выделяемого человеком пота впитывается материалом одежды; на его испарение расходуется не только внутренняя теплота, но и энергия окружающей среды. Величину теплотзатрат на испарение пота определим по формуле Витте [4]

$$Q_W = 17,3 (p_M - p_{\Pi}) (0,5 + \sqrt{u_{\Sigma}}) F_M. \quad (9)$$

Здесь  $p_M$ ,  $p_{\Pi}$  – парциальные давления водяного пара при температуре тела и нормируемой температуре воздуха в рабочей зоне соответственно, Па;  $(p_M - p_{\Pi})$  – физиологический дефицит насыщения.

Вдыхаемый человеком воздух, проходя по дыхательным путям, увлажняется за счет испарения влаги со слизистой оболочки. Затраты теплоты в этом случае описываются уравнением [2]

$$Q_{WB} = \frac{1,72 \cdot 10^{-5} Q_g (5800 - p_{\Pi}) F_M}{1 - \eta}. \quad (10)$$

Потери теплоты на испарение диффузионной влаги с поверхности кожи также зависят от разности парциальных давлений и определяются из выражения

$$Q_{WD} = 2,6 \cdot 10^{-3} (256 t_M - 73258 - p_{\Pi}) F_M. \quad (11)$$

Затраты на нагрев вдыхаемого воздуха относительно невелики по сравнению с другими слагаемыми уравнения (1), однако с увеличением активности деятельности человека и снижением температуры окружающего

воздуха их следует уже учитывать в тепловом балансе. Величина этих затрат теплоты находится по формуле [2]

$$Q_B = \frac{0,0014 Q_g (307 - t_0) F_M}{1 - \eta}. \quad (12)$$

Таким образом, определены все слагаемые в (1). Входящие в него параметры, которые влияют на тепловое состояние человека, разделим на пять групп: 1) характеристики одежды  $f_{Cl}$ ,  $a_{Cl}$ ,  $R_{Cl}$ ; 2) характеристики деятельности человека  $\eta$ ,  $u_g$ ; 3) характеристики окружающей среды  $t_0$ ,  $p_{п}$ ,  $u$ ,  $t_R$ ; 4) характеристики инфракрасного излучения  $Q_M$ ; 5) физиологические характеристики человека  $X$ ,  $t_M$ ,  $p_M$ . Только при определенных соотношениях между перечисленными величинами соблюдается тепловой баланс организма ( $\Delta Q = 0$ ), в противном случае в нем имеет место либо накопление теплоты, вызывающее повышение температуры, либо его нехватка, приводящая к переохлаждению. Система терморегуляции в узком диапазоне параметров микроклимата позволяет поддерживать тепловой баланс организма за счет интенсификации деятельности внутренних органов и, в первую очередь, сердечно-сосудистой системы. Выход за пределы этого диапазона приводит к ухудшению самочувствия человека. Исследования показали [5], что допустимые отклонения температуры тела находятся в пределах от  $-0,4$  до  $+1,1$  К, что соответствует следующему дисбалансу теплоты у среднестатистического человека (масса 70 кг, теплоемкость тела 3,48 кДж/(кг·К)):

$$\Delta U \in [-97,5; 268] \text{ (кДж)}. \quad (13)$$

Условия, при которых сохраняется нормальное функциональное и тепловое состояние организма без напряжения системы терморегуляции, воспринимаются как комфортные. Сочетание параметров окружающей среды, обеспечивающее удовлетворение индивидуумом тепловой обстановкой, соответствует оптимальному микроклимату в помещении. В тех случаях, когда по ряду технических причин нет возможности создать такие условия, следует придерживаться сочетания параметров тепловой обстановки в рабочей зоне, при котором не возникает нарушений здоровья. В соответствии с (13) найдем диапазоны изменения этих параметров

$$-\frac{97,5 \cdot 10^3}{t} < \Delta Q < \frac{268 \cdot 10^3}{t}, \quad (14)$$

где  $t$  – время нахождения человека в рабочей зоне, с.

Физиологические изменения в организме отражают три независимые переменные – температуру кожи  $t_M$ , количество потовыделения и интенсивность обмена веществ, зависящие от активности деятельности  $X$ . В со-

стоянии, определяемом выражением (14), диапазон допустимых вариаций этих величин невелик; связь между ними установим посредством следующих выражений [6]:

$$t_M = 308,7 - \frac{0,0276 Q_g}{F_M}; \quad (15)$$

$$Q_w = 0,42(Q_g - 58F_M). \quad (16)$$

Подставив (2), (3), (8), (10)–(12), (15), (16) в выражение (14), учтя при этом уравнение (1), получим соотношение между параметрами тепловой обстановки, активностью деятельности человека и типом одежды

$$-\frac{97,5 \cdot 10^3}{t} < X \left[ 3,1 \cdot 10^{-4} p_{\Pi} + 0,25t_0 - 10,7 \eta + \frac{1,6(1-\eta)(1+f_{Cl})}{f_{Cl} R_{Cl}} - 33,6 \right] + \\ + 0,31 Q_M a_{Cl} - \frac{(308,7 - t_{Cl})(1+f_{Cl})}{f_{Cl} R_{Cl}} < \frac{268 \cdot 10^3}{t}, \quad (17)$$

определяющее первоначальный комплекс условий (ограничений), при котором не возникают нарушения здоровья человека.

**2. Особенности воздействия ИК-излучения на человека и технологические процессы; второе ограничение параметров тепловой обстановки.** Из (17) следует, что одинаковое состояние человека может быть реализовано множеством комбинаций относительных вкладов различных видов теплопереноса. Например, тепловой баланс человека останется неизменным, если снизить температуру окружающего воздуха и одновременно увеличить уровень ИК-облучения. Эта неоднозначность породила потребность в дифференцированных исследованиях влияния инфракрасных лучей на жизнедеятельность человека. Было установлено, что ИК-излучение обладает биологическим действием [7, 8]; оно повышает уровень свободных радикалов в крови, клетках кожи и внутренних тканей, меняет течение биохимических процессов в различных частях организма, вызывает сдвиги в молекулярных структурах клеток и функциональной деятельности тканей. При воздействии на организм ИК-лучами образуются биологически активные вещества, в том числе и пирогенные. Пирогены, поступая в общий круг кровообращения, вызывают усиление обмена веществ в отдаленных от места облучения органах. Несмотря на то, что биологическое действие ИК-излучения в целом благотворно влияет на организм человека (укрепляет его иммунную систему, ускоряет регенерацию здоровых клеток), очевидно, что существуют пороговые значения интенсивности излучения, которые не следует превышать.

Основная трудность санитарно-гигиенических исследований заключается в том, что действие ИК-радиации происходит на фоне множества определяющих факторов, основными из которых являются тип источника из-

лучения, климатические условия и форма одежды. Поскольку в одной серии исследований невозможно перебрать все комбинации этих факторов, сумма накопленных знаний представляет собой огромный массив фрагментарных данных, ориентированных на конкретные частные задачи влияния ИК-излучения на человека.

На основе этих данных были установлены нормативы, регулирующие допустимый уровень ИК-радиации, которым придан универсальный статус [9]. Согласно этим нормам и при соблюдении условия (17) человек может находиться сколь угодно долго без вреда для здоровья под воздействием ИК-излучения с плотностью потока до  $560 \text{ Вт/м}^2$ . Примем это значение за верхнюю границу

$$E < 560 \text{ Вт/м}^2. \quad (18)$$

Затем при определенной плотности потока

$$A_1 < E < A_2 \quad (19)$$

инфракрасные лучи оказывают положительное воздействие на многие технологические процессы [10]. Из них рассмотрим только те, для которых

$$A_1 < 560 \text{ Вт/м}^2. \quad (20)$$

Связав между собой три неравенства (18)–(20), получим второе ограничение параметров тепловой обстановки в рабочей зоне

$$A_1 < E < \begin{cases} A_2, \forall A_2 < 560; \\ 560, \forall A_2 > 560. \end{cases} \quad (21)$$

**3. Локальные теплоощущения человека; третье ограничение параметров тепловой обстановки.** Температура кожи, при которой у человека начинаются дискомфортные локальные теплоощущения, неодинакова на различных участках тела. Например, теплоощущение «прохладно» в области стоп появляется (в зависимости от активности деятельности) при температуре их поверхности  $31,0 \dots 25,5 \text{ }^\circ\text{C}$ , а в области туловища – при  $34 \dots 29 \text{ }^\circ\text{C}$  [11].

Эти различия, вызванные особенностями кровообращения, терморепторного аппарата и теплопроводности тканей, свидетельствуют о том, что средневзвешенная температура кожи не является достаточно информативным показателем теплового состояния человека и для определения комфортности требуются дополнительные условия [12].

В производственной обстановке тело человека не обогревается или охлаждается одинаково и симметрично. Тип одежды, размещение оборудования, расположение источников теплоты, движение воздуха и сама форма

тела обуславливают различную интенсивность теплообмена на отдельных его участках; поэтому температура кожи человека зависит не только от температуры поверхности пола и окружающего воздуха, но и от распределения температуры воздуха по высоте помещения. Установлено, что при температуре пола 15...17 °С и перепаде температуры воздуха по вертикали 6,8 °С температура пальцев ног за 3 ч снижается на 7 °С. Когда же этот перепад составляет 3 °С, температура пальцев ног при указанных температурах пола не снижается.

Таким образом, для создания комфортных условий дополнительно необходимо, чтобы разность температуры воздуха на уровне пола цеха и головы рабочего не превышала 3 К

$$(t_H - t_f) \leq 3, \quad (22)$$

где  $t_H$  и  $t_f$  – температура воздуха на уровне головы и ног соответственно.

Ноги человека особенно чувствительны к переохлаждению поверхности пола и холодным потокам воздуха вдоль него. При этом потери теплоты зависят не только от температуры поверхности пола, но и от его теплофизических свойств. Строительными нормами [13] предписывается выбирать покрытия с таким показателем теплоусвоения, чтобы температурный перепад между поверхностью пола и воздухом не превышал 2,5 °С. Данное ограничение учитывается при проектировании промышленных корпусов и поэтому при создании системы ИК-обогрева не принимается во внимание.

Показатель комфортности – разность температур кожи туловища и стоп – тесно коррелирует с теплоощущением только у лиц, находящихся в состоянии относительного покоя в положении стоя или сидя или выполняющих легкую физическую работу. При тяжелом труде с большими энергозатратами этот показатель, вследствие иной топографии температуры кожи, не отражает теплового состояния человека и условие (22) при проектировании систем ИК-обогрева может не учитываться.

Впервые в Беларуси автоматизированные многофункциональные системы ИК-обогрева, спроектированные с учетом полученных ограничений параметров тепловой обстановки, были изготовлены и установлены в конце 90-х гг. в цехах ведущих столичных предприятий – НПО «Интеграл», ЗАО «Атлант», БелОМО, РУП «Горизонт». Эксплуатация систем подтвердила их высокую эффективность – расход условного топлива, связанный с обогревом производственных участков, снизился в 1,5...1,7 раза, уменьшился брак выпускаемой продукции, повысилась ее сортность. Отрицательного влияния излучения на самочувствие рабочих не выявлено.

## ВЫВОД

В отличие от действующих нормативных документов, в которых установлены функционально не связанные между собой допустимые значения параметров тепловой обстановки в цехах, в статье предложены условия,

в комплексе учитывающие основные факторы, влияющие на теплоощущения человека. Такой подход к определению характеристик микроклимата на производстве дает большую степень свободы при проектировании систем ИК-обогрева и тем самым позволяет увеличить эффективность от их внедрения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Р у к о в о д с т в о по физиологии: Физиология и терморегуляция / К. П. Иванов, О. П. Микут-Сорохтина, Е. В. Майстрах и др. – Л.: Наука, 1984. – 470 с.
2. F ä n g e r Р. О. Thermal comfort: Analysis and application in Environmental Engineering. – N.Y.: McGraw-Hill Book Company, 1973. – 271 p.
3. Б а н х и д и Л. Тепловой микроклимат помещений: Расчет комфортных параметров по теплоощущениям человека. – М.: Стройиздат, 1981. – 248 с.
4. В и т т е Н. К. Тепловой обмен человека и его гигиеническое значение. – Киев: Госмедиздат УССР, 1956. – 148 с.
5. Г о р о м о с о в М. С. Микроклимат жилища и его гигиеническое нормирование. – М.; Л.: Медгиз, 1963. – 134 с.
6. М а р к у с Т. А., М о р р и с Э. Н. Здания, климат, энергия. – М.: Гидрометеиздат, 1985. – 543 с.
7. У к в о л ь б е р г Л. Я., Я щ у м о в а Э. Я. О влиянии разных интервалов длин волн инфракрасной радиации на организм человека // Физические факторы производственной среды и их влияние на состояние здоровья работающих. – М., 1973. – С. 122–129.
8. Д у л ь д н е р А. М. Влияние инфракрасной радиации на иммуно-биологическую реактивность организма // Гигиена и санитария. – 1965. – № 5. – С. 27–29.
9. Д о л и н П. А. Справочник по технике безопасности. – М.: Энергоиздат, 1982. – 800 с.
10. Д е р и б е р е М. Практическое применение инфракрасных лучей. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1959. – 440 с.
11. К р и т е р и и оценки теплового состояния человека для обоснования нормативных требований к производственному микроклимату / Р. Ф. Афанасьева, Г. Н. Репин, Л. В. Павлухин и др. // Гигиена и санитария. – 1983. – № 7. – С. 79–81.
12. Ш а х б а з я н Г. Х., Ш л е й ф м а н Ф. М. Гигиена производственного микроклимата. – Киев: Здоровья, 1977. – 136 с.
13. С Н Б 2.01.01–93. Строительная теплофизика. – Мн.: Минсктиппроект, 1994. – 30 с.
14. С Н и П 2.04.05–86. Отопление, вентиляция и кондиционирование. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1988. – 64 с.
15. С а н П и Н 9–80 РБ 98. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений. 2.2.4: Физические факторы производственной среды. – Мн.: Минздрав РБ. – С. 181–202.

Представлена Ученым советом

Поступила 30.12.2002