

Болотских Н.Н.

Харьковский национальный университет строительства и архитектуры

ФОРМИРОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО КОМФОРТА В РАБОЧИХ ЗОНАХ ПОМЕЩЕНИЙ С ИНФРАКРАСНЫМ ОБОГРЕВОМ

ВВЕДЕНИЕ. Для обогрева зданий и помещений различного назначения в настоящее время широко используются традиционные централизованные конвективные системы на базе центральных котельных. В этих системах нагретая вода по теплотрассе подается к отапливаемому объекту, а затем к теплообменникам (регистрам, радиаторам, конвекторам), установленным в помещениях. Согретый с помощью этих теплообменников воздух, распространяясь в помещении, передает тепловую энергию предметам, конструкциям и находящимся там людям, обеспечивая при этом в рабочей зоне, имеющей высоту до 2 м от уровня пола, необходимый микроклимат. Параллельно с этим во многих странах мира, в том числе и в нашей стране, успешно развиваются и используются на практике децентрализованные (автономные) системы, конкурируя с централизованными. Среди децентрализованных систем отопления достойное место занимают лучистые (инфракрасные). В этих системах передача тепла в рабочую зону осуществляется с помощью электромагнитного излучения. Инфракрасные нагреватели (излучатели), размещаемые на определенной высоте от пола помещения, излучают электромагнитные волны, которые с незначительными потерями проходят сквозь воздух и после попадания на пол, стены и предметы, частично поглощаясь, согревают их. От этих предметов нагревается воздух и в рабочей зоне помещения формируется соответствующий микроклимат.

При конвективном способе отопления температура воздуха в помещении (t_b) выше чем температура окружающих человека предметов (t_n), обогреваемых этим воздухом, т.е. $t_b > t_n$, а при инфракрасных, наоборот, температура предметов выше температуры воздуха, т.е. $t_b < t_n$. Кроме того, согласно данных компании SHULTE (Германия) [1], при конвективном отоплении

температура воздуха на уровне пола на 3°C ниже, чем на высоте 2 м, а температура у потолка помещения на 18°C выше, чем на уровне пола. При инфракрасном же способе отопления температура воздуха на уровне пола на 3°C выше, чем на высоте 2 м, а на уровне потолка на 1°C выше, чем на уровне пола. Эти данные свидетельствуют о том, что при инфракрасном способе отопления в рабочей зоне помещения для человека создаются более благоприятные тепловые условия.

Вследствие наличия этого и ряда других весьма существенных преимуществ инфракрасные системы отопления в последние десятилетия находят в мире все большее распространение. При их использовании в помещениях представляется возможность наилучшим образом обеспечивать оптимальный тепловой комфорт для работающих в них людей при минимальных расходах энергоресурсов и финансов. В данном случае под тепловым комфортом понимается субъективное ощущение человека, удовлетворенного окружающим его микроклиматом. При этом человек испытывает комфортные, приятные ощущения в отапливаемом пространстве.

Во время работы человека в его организме постоянно вырабатывается и передается окружающей среде теплота. При этом организм человека стремится поддерживать постоянную внутреннюю температуру ($36,6^\circ\text{C}$). Для этого человек имеет систему терморегуляции, позволяющую ему приспособиваться к изменениям температуры окружающей его среды в небольшом интервале.

Формирование теплового комфорта в рабочей зоне зависит от ряда факторов и прежде всего от величины параметров, характеризующих окружающую человека среду, а также от его физической активности и вида одежды.

Исследованию вопросов формирования теплового комфорта в рабочих зонах помещений, отапливаемых инфракрасным способом, посвящен ряд работ, например, [2-7]. В связи с расширением области применения инфракрасного способа обогрева помещений вопросы, связанные с дальнейшим повышением теплового комфорта и влиянием параметров потока излучения на его формирование и находящихся в рабочей зоне людей, приобретают все большую актуальность и подлежат дальнейшему изучению. Рассмотрению этих вопросов и посвящается настоящая статья.

ЦЕЛЮ настоящего исследования является повышение теплового комфорта в

рабочих зонах помещений, обогреваемых инфракрасным способом, а также исключение случаев неблагоприятного воздействия облучения на здоровье человека.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ. В настоящее время мировыми компаниями и фирмами освоен выпуск большого количества различных типов, марок и моделей инфракрасных нагревателей. Их вполне достаточно для того, чтобы надежно отапливать практически любые здания или помещения. В ХНУСА на базе тщательного анализа этих нагревателей составлена наиболее полная их классификация в виде, представленном на рис. 1.

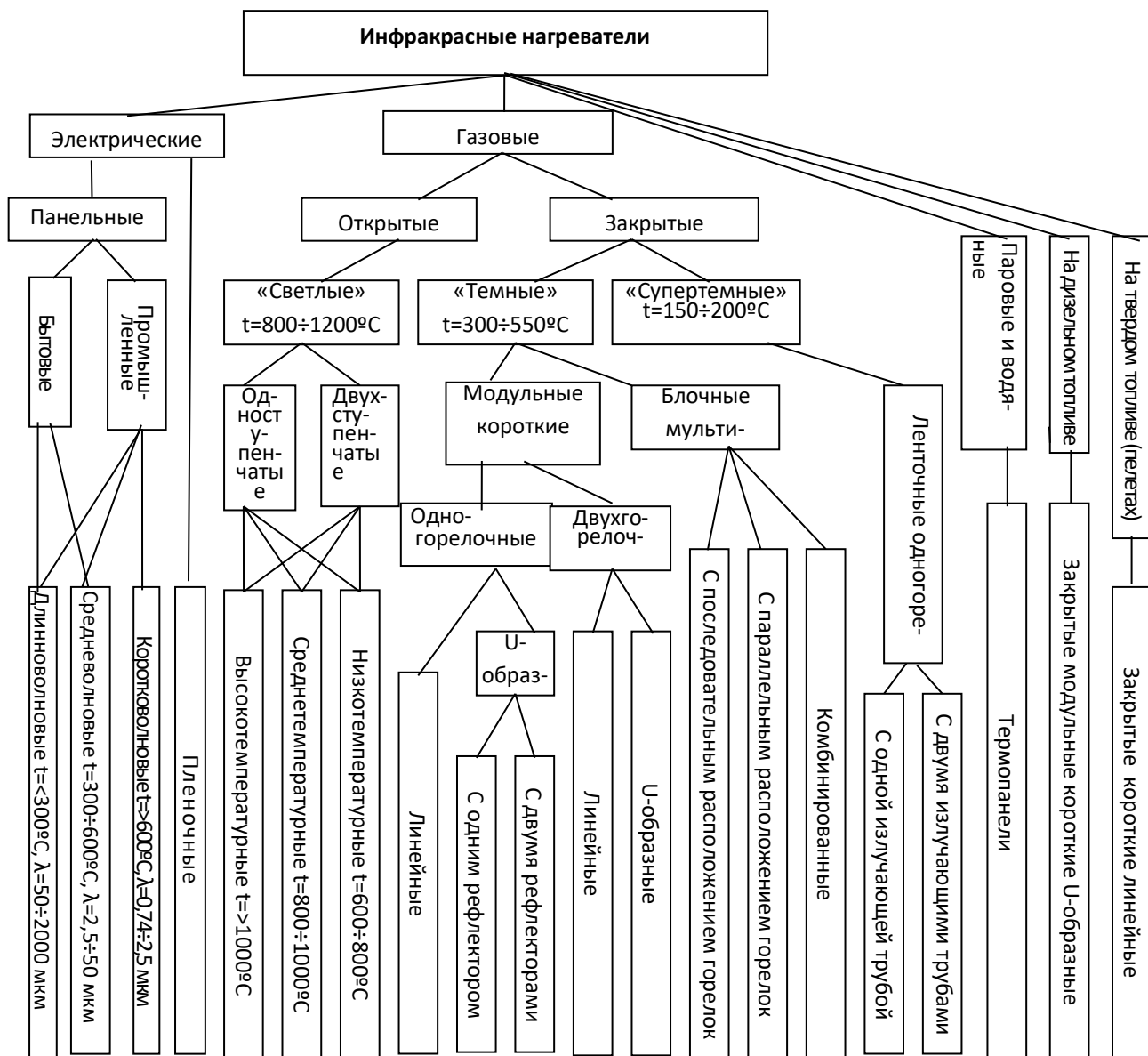


Рис. 1. Классификация инфракрасных нагревателей

На этом рисунке приняты следующие обозначения: t – температура излучающей поверхности нагревателя, °С; λ – длина волны электромагнитного излучения, мкм.

Из этой классификации видно, что в настоящее время для инфракрасного отопления конкретного здания или помещения весьма велик выбор отопительных приборов и в этом многообразии возможных вариантов необходимо всегда останавливаться только на одном более эффективном с энергетической, экономической и экологической точек зрения.

Перед рассмотрением проблемы формирования теплового комфорта в рабочих зонах помещений с помощью этих нагревателей, для более глубокого ее понимания, напомним читателю о наиболее важных преимуществах, которые имеют инфракрасные системы отопления по сравнению с конвективными. Главными из них являются: возможность обеспечения оптимального теплового комфорта в рабочих зонах, отапливаемых помещений; малый градиент температуры, равный $0,1 \div 0,3^\circ\text{C}/\text{м}$ (при конвективном отоплении он составляет до $1,5^\circ\text{C}/\text{м}$); низкая инерционность (быстрота запуска и выхода на заданный режим работы); возможность обогрева не только помещения в целом, но и отдельно рабочего места или определенных зон; возможность снижения расходов энергоресурсов (до 50%), сокращения эксплуатационных затрат в 3-5 раз, уменьшения металлоемкости систем отопления в 4-5 раз и сокращения стоимости отопления в 4-6 раз [7]. Инфракрасные нагреватели позволяют: направлять тепло туда, где оно необходимо, без использования промежуточных теплоносителей; создавать в рабочих зонах помещений комфортный микроклимат (сравнимый с природным); обогревать в помещении прежде всего людей и предметы, а не воздух (отсюда существенная экономия энергоресурсов и денежных средств).

Основным их недостатком является то, что для ряда типов и моделей нагревателей установлены запреты или ограничения в применении в помещениях специального назначения. Например, инфракрасные газовые нагреватели нельзя применять в помещениях, где есть опасность возникновения взрыва или пожара (категории «А» и «Б»), а в помещениях категории «В» их применение необходимо

согласовывать в соответствующих органах. Что касается других возможных недостатков инфракрасных нагревателей, то на практике они чаще всего проявляются вследствие неправильного их выбора и проектирования, иначе говоря, из-за несоответствия выбранной системы инфракрасного отопления конкретному объекту с заданными параметрами. Несмотря на это, инфракрасные нагреватели имеют хорошие перспективы дальнейшего применения (особенно для отопления больших по объемам и высоким помещений).

Как указывалось выше, комфортное состояние человека, находящегося в рабочей зоне помещения, обогреваемого инфракрасными нагревателями, в значительной степени зависит от создаваемого в них микроклимата (метеорологических условий). Основным документом, нормирующим этот микроклимат, в настоящее время в Украине является ДСН 3.3.6.042-99 «Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень» [8]. Согласно этих норм микроклимат в рабочей зоне характеризуется: температурой ($t_{\text{в}}, ^\circ\text{C}$), относительной влажностью ($\phi_{\text{в}}, \%$) и скоростью движения воздуха на рабочем месте ($V_{\text{в}}, \text{м/с}$), а также интенсивностью теплового (инфракрасного) излучения ($q, \text{Вт/м}^2$) и температурой внутренних поверхностей в рабочей зоне (стен, пола, потолка, экранов и т.д.) ($t_{\text{п}}, ^\circ\text{C}$). В санитарных нормах указаны оптимальные и допустимые значения $t_{\text{в}}$, $\phi_{\text{в}}$ и $V_{\text{в}}$, а также допустимые значения интенсивности теплового облучения работающих (q) в зависимости от величины облучаемой поверхности их тела (не более 25%, от 25 до 50%, 50% и более). К оптимальным отнесены параметры микроклимата, которые при длительном и систематическом воздействии на человека обеспечивают нормальное тепловое состояние организма без напряжения и нарушения механизмов терморегуляции. Они создают ощущение теплового комфорта. К допустимым отнесены показатели микроклимата, которые при длительном и систематическом воздействии на человека могут привести до дискомфорта теплоощущения. При этом может появиться некоторое снижение трудоспособности, но вреда или нарушений здоровья у человека при этом не происходит.

Согласно санитарных норм [8] тепловой комфорт в рабочей зоне возможен только в случае обеспечения в ней оптимальных значений параметров воздуха и допустимой величины интенсивности облучения, т.е. при выполнении следующих условий.

$$t_{\text{в}} = t_{\text{в}}^{\text{opt}}, \varphi_{\text{в}} = \varphi_{\text{в}}^{\text{opt}}, \\ V_{\text{в}} = V_{\text{в}}^{\text{opt}} \text{ и } q \leq [q]$$

где $t_{\text{в}}^{\text{opt}}$, $\varphi_{\text{в}}^{\text{opt}}$ и $V_{\text{в}}^{\text{opt}}$ – оптимальные значения температуры, относительной влажности и скорости движения воздуха, °С, % и м/с; $[q]$ – допустимое значение интенсивности облучения, Вт/м².

Температура внутренних поверхностей рабочей зоны ($t_{\text{п}}$) при этом не должна превышать более чем на 2°С оптимальные значения температуры воздуха для данной категории работ, установленных санитарными нормами.

Необходимость учета основных параметров микроклимата при формировании теплового комфорта в рабочей зоне может быть объяснена на основании рассмотрения теплового баланса между организмом человека и окружающей средой в рабочей зоне производственного помещения. Нормальное тепловое самочувствие человека в комфортных условиях, соответствующее данному виду работы, обеспечивается при соблюдении теплового баланса

$$Q = Q_{\text{т}} + Q_{\text{к}} + Q_{\text{и}} + Q_{\text{исп.}} + Q_{\text{в}}, \quad (2)$$

где Q – теплота, переданная человеческому организму в рабочей зоне системой отопления; $Q_{\text{т}}$ – отдача теплоты организмом человека путем теплопроводности (кондукции) через одежду; $Q_{\text{к}}$ – отдача теплоты в результате конвекции у тела; $Q_{\text{и}}$ – отдача теплоты организмом человека путем излучения на окружающие поверхности; $Q_{\text{исп.}}$ – отдача теплоты вследствие испарения влаги с поверхности кожи (пота); $Q_{\text{в}}$ – затраты теплоты на нагрев вдыхаемого человеком воздуха.

Доля кондуктивных потерь ($Q_{\text{т}}$) небольшая, ее можно рассматривать вместе с конвективными потерями. Затраты $Q_{\text{в}}$ также невелики.

На рис. 2 представлены графики теплотерь организмом человека, находящегося

в рабочей зоне отапливаемого помещения в спокойном состоянии при различных значениях температуры воздуха.

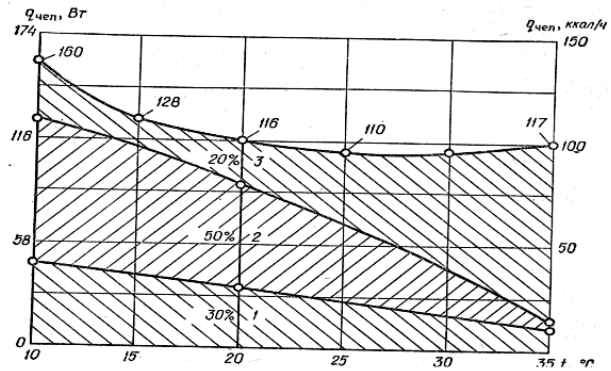


Рис. 2. Графики теплотерь человека, находящегося в помещении в спокойном состоянии, путем: 1 – конвекции; 2 – излучения; 3 – испарения влаги (пота).

Из рассмотрения графиков видно, что при температуре воздуха в отапливаемом пространстве равной 20°С соотношение этих способов отдачи тепла организмом человека выглядит следующим образом: конвекция (30-35%), излучение (45-50%) и испарение влаги (20-25%). Наиболее существенными при этом являются потери тепла излучением. Эти теплотери происходят когда окружающая среда имеет температуру воздуха ниже, чем тело человека.

За счет прямого поглощения энергии человек, находящийся в рабочей зоне помещения, обогреваемого с помощью инфракрасных нагревателей, ощущает более высокую температуру в сравнении с температурой окружающего его воздуха. Эту температуру ощущения в технической литературе называют по разному (эффективной температурой, результирующей температурой, температурой теплоощущения, температурой комфорта). При дальнейшем изложении материала в настоящей статье принимаем термин «эффективная температура».

Эффективная температура ($t_{\text{эф}}$) в рабочей зоне помещения формируется за счет температур воздуха и лучистой добавки, т.е.

$$t_{\text{эф}} = t_{\text{в}} + t_{\text{л}}, \quad (3)$$

где $t_{\text{л}}$ – добавочная температура, образуемая лучистым (инфракрасным) потоком, °С.

В связи с этим обстоятельством в выражениях (1) вместо t_b запишем $t_{\text{эф}}$, т.е.

$$t_{\text{эф}} = t_b^{\text{opt}}, \varphi_b = \varphi_b^{\text{opt}},$$

$$V_b = V_b^{\text{opt}} \text{ и } q \leq [q]$$

Лучистая добавочная температура (t_l) определяет увеличение ощущения тепла человеком за счет инфракрасного облучения.

Западногерманской фирмой «Шванк» [9] на основании экспериментальных исследований и расчетов для определения добавочной температуры, образуемой инфракрасным потоком, предложена эмпирическая зависимость

$$t_l = 0,0716 \cdot q, \quad (5)$$

где 0,0716 – эмпирический (переводной) коэффициент, $\text{м}^2 \cdot \text{С} / \text{Вт}$.

С учетом этой зависимости формула для определения эффективной температуры принимает вид:

$$t_{\text{эф}} = t_b + 0,0716 \cdot q \quad (6)$$

Величина интенсивности облучения при инфракрасном отоплении с помощью электрических панельных и открытых (светлых) газовых нагревателей (рис. 1) определяется по формуле [10]

$$q = \frac{1,8 \Delta x^2 F_1}{R^4} \left[\left(\frac{t_1 + 273}{100} \right)^4 - 92 \right], \quad (7)$$

где Δx – продольное расстояние от головы человека до середины излучающей поверхности нагревателя, м; F_1 – площадь поверхности излучения нагревателя, м^2 ; t_1 – температура излучающей поверхности нагревателя, $^{\circ}\text{С}$; R – расстояние между центрами излучающей поверхности и головы человека, м.

При использовании для целей отопления закрытых инфракрасных газовых трубчатых нагревателей (рис. 1) величина интенсивности облучения в рабочей зоне описывается интегралом в виде [11]

$$q = \int_0^{x'} \frac{1,8 \cdot S^x \cdot L \left[\left(\frac{t_1(X') + 273}{100} \right)^4 - 92 \right]}{\left[h^2 + \Delta V + (\Delta X - LX')^2 \right]^2} \cdot h(h \cdot \cos \alpha + \Delta V \cdot \sin \alpha) \cdot dx' \quad (8)$$

где $X'=l/L$ – относительная текущая координата; l – текущая координата вдоль оси нагревателя, м; L – длина излучающей трубы нагревателя, м; S^x – ширина отражателя, м; h – высота подвески нагревателя, отсчитываемая от уровня головы человека, м; α –

угол наклона нагревателя, град; ΔX – продольное расстояние от головы человека до точки подсоединения горелки к излучающей трубе нагревателя, м; ΔV – поперечное отклонение головы человека от оси нагревателя, м. Решение этого интеграла с использованием пакета программ численного интегрирования по методу Симпсона в системе MATLAB 7 позволило ХНУСА разработать соответствующую компьютерную программу для расчета интенсивности облучения и нахождения ее максимального значения на уровне головы человека в рабочей зоне вдоль оси нагревателя.

При наличии в системе отопления помещения нескольких инфракрасных нагревателей интенсивность облучения головы человека, находящегося в рабочей зоне, рассчитывается по формулам (7) и (8) отдельно от каждого нагревателя, а затем с использованием метода суперпозиции эти полученные значения суммируются.

В виду того, что интенсивность облучения в различных точках рабочей зоны отапливаемого помещения может быть неодинаковой необходимо при расчетах эффективной температуры принимать ее максимальные значения. С учетом этого обстоятельства выражения (4) принимают вид:

$$t_{\text{эф}} = t_b + 0,0716 q_{\text{сум}}^{\text{max}} = t_b^{\text{opt}}, \quad (9)$$

$$\varphi_b = \varphi_b^{\text{opt}}, V_b = V_b^{\text{opt}} \quad q = q_{\text{сум}}^{\text{max}} \leq [q]$$

При значениях эффективной температуры, относительной влажности и скорости движения воздуха, близких к оптимальным, а максимальной суммарной облученности – меньших или равных допустимым, в соответствии с санитарными нормами ДСН 3.3.6.042-99 в рабочих зонах помещений, отапливаемых с помощью инфракрасных нагревателей, может быть сформирован оптимальный тепловой комфорт.

Наблюдения за длительной эксплуатацией различных инфракрасных систем отопления, проведенные в последнее десятилетие, показали, что из-за неправильного выбора или использования нагревательных приборов, даже при оптимальных и допустимых значениях параметров, характеризующих микроклимат в рабочих зонах отапливаемых помещений, имеют место случаи негативного воздействия облучения на организм человека [7].

Например, при неправильном использовании нагревателей с коротковолновым инфракрасным излучением с длиной волны 1,5 мкм (от 0,76 до 2,4 мкм) возможны случаи появления у людей катаракты глаз либо конъюнктивитов. Кроме того, следует иметь в виду и то, что порогом проходимости лучей для кожи человека является 2,4 мкм. Поэтому лучи с более короткой длиной волны могут проникать под кожу и воздействовать на белковые соединения в организме человека, что может также приводить к различным заболеваниям. Это обстоятельство свидетельствует о том, что в действующих отечественных санитарных нормах инфракрасное излучение рассматривается только как фактор, который принимает участие в формировании микроклимата в рабочей зоне. Этот фактор в нормах учитывается одним параметром – интенсивностью облучения. Влияние же других параметров, например, длины волны, на организм человека не учитывается.

Институтом медицины труда АМН Украины [6] проведены фундаментальные исследования, посвященные изучению вопросов влияния инфракрасного излучения на здоровье человека. При этом установлено, что инфракрасное облучение обуславливает специфические особенности формирования реакций организма. Эти реакции в значительной степени связаны с особенностями физической природы самого излучения, которое характеризуется прежде всего двумя параметрами: интенсивностью (плотностью) потока (q) и длиной волны электромагнитного излучения (λ).

Проведенные исследования показали, что влияние инфракрасного облучения на организм человека определяется не только интенсивностью потока энергии, но и его спектральным составом, характеризуемым прежде всего длиной волны. Эти исследования позволили выделить три этапа реакций организма в зависимости от интенсивности и спектра (длины волны) действующего излучения: «оптимальные» (реакции адаптации), «допустимые» (компенсаторные) и «повреждающие». Повреждающие реакции сопровождаются снижением антимикробной резистентности организма, активности антиоксидантных систем, нарушением сокра-

тительной функции миокарда и сосудистого тонуса. Установлено, что для излучения с длиной волны: а) $\lambda_{\text{макс}} = 1,5$ мкм – порог повреждающего действия находится на уровне 50 Вт/м^2 ; б) $\lambda_{\text{макс}} = 3$ мкм и $\lambda_{\text{макс}} = 6$ мкм – порог повреждающего действия находится на уровне 100 Вт/м^2 ; в) $\lambda_{\text{макс}} = 4,5$ мкм порог повреждающего действия находится на уровне 150 Вт/м^2 . Приведенные величины интенсивности облучения устанавливались с учетом защитных свойств тканей, используемых для изготовления спецодежды.

С учетом этих результатов исследований разработаны рекомендации для выбора допустимых значений интенсивности облучения в зависимости от длины волны с учетом теплозащиты используемой спецодежды, при облучении передней части поверхности тела человека (25-50%), с максимумом энергии облучения на его груди. Эти рекомендации приведены ниже в табл. 1.

Таблица 1 - Рекомендуемые величины допустимой интенсивности облучения (q) в зависимости от длины волны (λ) и теплозащиты одежды

$\lambda_{\text{макс}}$	Интенсивность облучения (Вт/м^2) при теплозащите одежды (кло) 0,6-0,8	Интенсивность облучения (Вт/м^2) при теплозащите одежды (кло) >1
1,5	35	65
3,0	50	100
4,5	75	140
6,0	100	120

Эти рекомендации, безусловно, необходимо использовать на практике как при выборе и расчете, так и при эксплуатации систем отопления с помощью инфракрасных нагревателей.

При этом принимаемые параметры микроклимата в рабочих зонах отапливаемых помещений должны полностью соответствовать требованиям санитарных норм ДСН 3.3.6.042-99 [8] и не противоречить приведенным выше рекомендациям.

ВЫВОДЫ. 1. Для целей отопления различных зданий и помещений, особенно больших по размерам, наиболее эффективными и перспективными с экономической, энергетической и экологической точек зрения в настоящее время являются децентрализованные инфракрасные системы, позволяющие обеспечивать для людей, находящихся в рабочих зонах, оптимальный тепловой комфорт.

2. В соответствии с санитарными нормами [8], принятыми в нашей стране, микроклимат в рабочих зонах помещений, обогреваемых с помощью инфракрасных нагревателей, характеризуется: температурой, относительной влажностью и скоростью движения воздуха, а также интенсивностью теплового (инфракрасного) облучения. При оптимальных параметрах воздуха и допустимой интенсивности облучения люди в рабочей зоне помещений должны ощущать тепловой комфорт.

3. Установлено [6], что при инфракрасном отоплении на организм человека, находящегося в рабочей зоне, оказывает влияние не только интенсивность, но и длина волны электромагнитного излучения. Для исключения случаев негативного воздействия на здоровье человека инфракрасного излучения рекомендуется при расчетах допустимую интенсивность облучения принимать с учетом длины волны. Такой рекомендацией целесообразно дополнить действующие в стране санитарные нормы.

4. С целью реализации в полном объеме на практике больших преимуществ, которые имеют инфракрасные системы отопления, для обеспечения формирования стабильного оптимального теплового комфорта в рабочих зонах отапливаемых помещений, для исключения случаев негативного воздействия облучения на организм человека необходимо всегда тщательно подходить к выбору, расчету и эксплуатации инфракрасных нагревателей. Принятое для обогрева инфракрасное отопительное оборудование должно всегда соответствовать назначению и типу здания или помещения, характеру осуществляемых в них деятельности

или производственного процесса, а также принятым в нашей стране санитарно-гигиеническим нормам.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Болотских Н.Н. Мультигорелочные модульные системы газового инфракрасного отопления производственных помещений больших размеров./Н.Н. Болотских//. Науковий вісник будівництва: ХДТУБА, ХОТВ АБУ, вип. 60, 2010. – с. 101-115.
2. Болотских Н.Н. Тепловой комфорт при инфракрасном отоплении помещений./Н.Н. Болотских//. Науковий вісник будівництва: ХНУБА, ХОТВ АБУ, вип. 74, 2013. – с. 286-296.
3. Сканава А.И. Отопление. – 2-е изд. – М.: Стройиздат, 1988. – 416 с.
4. Fanger P.O. Calculation of thermal comfort: introduction of a basic comfort equation.// ASHRAE Transaction, vol. 73, 1967.
5. Fanger P.O. Thermal comfort. Mc Grow Hill Book Co. New York, 244, p. 1973.
6. Гвозденко Л.А. Обоснование допустимых нормативов облученности инфракрасным излучением в зависимости от его спектрального состава. Институт медицины труда АМН Украины, г. Киев, «Медицина труда и промышленная экология», № 12, 1999 г.
7. Молька В. Инфраизлучатели. Три «Э» в отоплении промышленных помещений. Словакия, 2005 г. – 127 с.
8. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень ДСН 3.3.6.042-99. Постанова Державного санітарного лікаря України від 1 грудня 1999 р., № 42. – 11 с.
9. Родин А.К. Газовое лучистое отопление. – Л.: Изд «Недра», 1987 г. – 197 с.
10. Шумилов Р.Н., Толстова Ю.И., Поммер А.А. Совершенствование методики расчета лучистого отопления. Материалы международной научно-технической конференции «Теоретические основы теплогазоснабжения и вентиляции». – М.: Изд. МГСУ, 2005. – с. 107-112.
11. Болотских Н.Н. Совершенствование методики расчета систем отопления газовыми трубчатыми инфракрасными нагревателями./Н.Н. Болотских//. Науковий вісник будівництва: ХДТУБА, ХОТВ АБУ, вип. 54, 2009. – с. 76-91.