

УДК 697.9/ 628.87

## Обоснование и расчет эквивалентных параметров теплового комфорта помещения

Т. В. РЯБОВА<sup>1</sup>, д-р техн. наук А. Б. СУЛИН<sup>2</sup>,  
Ю. Н. САНКИНА<sup>3</sup>

<sup>1</sup>rjabova\_tatjana@mail.ru, <sup>2</sup>miconta@rambler.ru, <sup>3</sup>ulyashka95@yandex.ru

Университет ИТМО

*Современные подходы к обоснованию комфортных параметров микроклимата жилых и производственных помещений в основном ориентированы на требования стандартов ISO 7730 и ASHRAE Standard 55. В статье описана методика расчета зависимостей требуемой температуры воздуха в функции от влажности, подвижности и радиационной разности температур при различных уровнях метаболизма и теплоизоляции одежды для помещений трех классов комфортности. Для каждого класса комфортности предварительно построены таблицы изокомфортных микроклиматических параметров, которые рассчитаны для различных уровней метаболизма человека и характеристик одежды. Полученные значения из таблиц изокомфортных микроклиматических параметров подставлены в эмпирически полученное уравнение для расчета эквивалентной температуры. Результаты в виде эквивалентной комфортной температуры аппроксимированы в функции от уровня метаболизма и характеристик одежды, в результате чего получены обобщающие расчетные выражения параметра эквивалентной комфортной температуры. Таким образом, шесть массивов данных с параметрами теплового комфорта для помещений трех классов обобщены шестью расчетными алгебраическими выражениями. Полученные расчетные выражения эквивалентной комфортной температуры могут быть использованы при проектировании систем кондиционирования воздуха и при программировании систем автоматического управления микроклиматом.*

**Ключевые слова:** микроклимат, тепловой комфорт, эквивалентная температура, системы жизнеобеспечения.

### Информация о статье:

Поступила в редакцию 20.02.2018, принята к печати 24.05.2018

DOI: 10.17586/1606-4313-2018-17-2-78-84

Язык статьи — русский

### Для цитирования:

Рябова Т. В., Сулин А. Б., Санкина Ю. Н. Обоснование и расчет эквивалентных параметров теплового комфорта помещения // Вестник Международной академии холода. 2018. № 2. С. 78–84.

## Rationale and calculation of thermal comfort equivalent parameters

T. V. RYABOVA<sup>1</sup>, D. Sc. A. B. SULIN<sup>2</sup>, Yu. N. SANKINA<sup>3</sup>

<sup>1</sup>rjabova\_tatjana@mail.ru, <sup>2</sup>miconta@rambler.ru, <sup>3</sup>ulyashka95@yandex.ru

ITMO University

*Modern approaches to the justification of comfortable microclimate parameters for residential and industrial premises are mainly focused on the requirements of ISO 7730 and ASHRAE Standard 55 standards. The article describes the procedure for calculating the dependences of the required air temperature as a function of humidity, mobility, and radiation temperature difference at the different levels of metabolism and clothing insulation for rooms of three comfort classes. For each comfort class the tables of isocomfortable microclimatic parameters, which are calculated for different levels of human metabolism and clothing characteristics, were preconstructed. The values obtained from the tables of the isocomfortable microclimatic parameters are substituted into the empirically obtained equation for calculating the equivalent comfort temperature. Thus, six data sets with parameters of thermal comfort for rooms of three classes are generalized by six calculated algebraic expressions. The resulting calculated expressions of an equivalent comfort temperature can be used in the design of air conditioning systems and in the programming of automatic climate control systems.*

**Keywords:** microclimate, thermal comfort, equivalent temperature, life support systems.

### Article info:

Received 20/02/2018, accepted 24/05/2018

DOI: 10.17586/1606-4313-2018-17-2-78-84

Article in Russian

### For citation:

Ryabova T. V., Sulin A. B., Sankina Yu. N. Rationale and calculation of thermal comfort equivalent parameters. *Vestnik Mezhdunarodnoi akademii kholoda*. 2018. No 2. p. 78–84.

## Введение

По характеру воздействия на тепловой баланс человека, микроклимат делится на умеренный (нейтральный), охлаждающий и нагревающий [1]. Для умеренного (нейтрального) микроклимата характерно такое сочетание его параметров, которые обеспечивают тепловой баланс человека с окружающей средой в диапазоне  $\pm 2$  Вт, при доле теплоотдачи от испарения пота не более 30%. При отрицательном тепловом балансе ниже  $-2$  Вт микроклимат считается охлаждающим, а при тепловом балансе выше  $2$  Вт и доли теплопотерь от испарения пота более 30% — нагревающим. Комфортный климат обычно определяется как «состояние разума, которое приносит удовлетворение термической средой» [2]. Теплоощущения человека являются следствием взаимодействия шести факторов: температуры воздуха, средней радиационной температуры, относительной подвижности воздуха, влажности, уровня активности и термических характеристик одежды.

Система терморегуляции человека позволяет физиологически регулировать тепловой баланс и обеспечивать тепловой комфорт тела в различных условиях. Теплота в первую очередь вырабатывается за счет метаболизма, вследствие пищеварения и мускульной активности. В состоянии покоя, примерно 56% общего производства тепла происходит во внутренних органах и около 18% в мышцах и коже. Во время физической нагрузки производство тепла мускульной работой увеличивается в несколько раз, процент тепла, выделяемого мускулами, может вырасти до 90% [3].

В нормальных условиях эти процессы приводят к средней температуре внутри тела порядка  $37^\circ\text{C}$  [4, 5]. Система терморегуляции человека стремится поддерживать это значение, когда возрастают возмущения от внутренних или внешних условий. Результирующие эффекты от изменения климатических условий продуцируют реакцию в виде автономных физиологических откликов, а также активизацию поведенческой регуляции. Автономная регуляция управляется гипоталамусом, контролирующим тепловые потоки посредством кожного кровотока, потения и аспирации. Поведенческая регуляция проявляется в изменении активности и одежды [6, 7, 8].

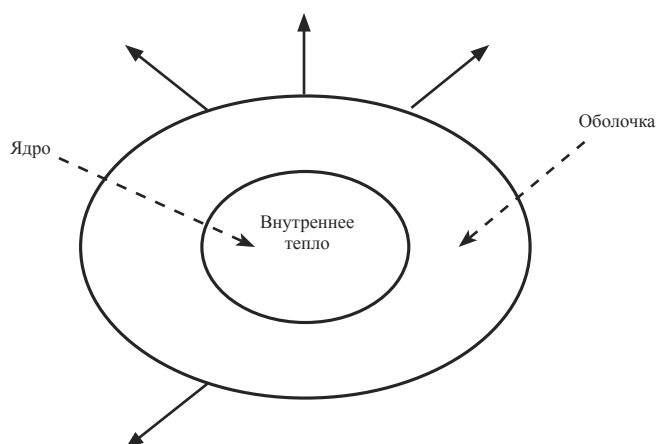


Рис. 1. Составляющие теплообмена тела человека  
Fig. 1. The components of heat exchange in human body

На рис. 1 приведены составляющие теплообмена тела человека для двухузловой модели «ядро-оболочка» [9].

## Основные расчетные параметры

Для оценки теплового состояния человека во внутренней и наружной среде широко применяются многопараметрические биометеорологические индексы.

Эффективная температура (ЭТ) — это сочетание относительной влажности воздуха и температуры, при которых эффект теплоощущения и теплоотдачи будет одинаковым. Значения данного параметра выражаются в градусах эффективной температуры, то есть в градусах температуры неподвижного воздуха, насыщенного водяными парами. При расчете эффективной температуры используется приближенная зависимость, предложенная Ф. А. Миссенардом [10]:

$$ЭТ = t - 0,4(t - 10)(1 - \frac{f}{100}),$$

где  $f$  — среднесуточная относительная влажность воздуха, %;  $t$  — среднесуточная температура воздуха,  $^\circ\text{C}$ .

Индекс эффективной температуры применяется в условиях неподвижного воздуха. Для учета эффекта от движения воздуха Б. А. Азейнштамом было введено понятие эквивалентно-эффективной температуры [11].

Эквивалентно-эффективная температура (ЭЭТ или ЕТ) определяется по зависимости:

$$ЕТ = 37 - \frac{37 - t}{0,68 - 0,0014f + \frac{1}{1,76 + 1,4v^{0,75}}} - 0,29t(1 - \frac{f}{100}),$$

где  $t$  — температура воздуха,  $^\circ\text{C}$ ;  $f$  — относительная влажность воздуха, %;  $v$  — средняя скорость ветра.

Известен индекс нормальной эквивалентно-эффективной температуры (НЭЭТ), которая используется для аналитической оценки теплоощущений одетого человека. Данный индекс был предложен И. В. Бутевой, он является показателем чувствительности с учетом влияния ветра и определяется по формуле [10]

$$НЭЭТ = 0,8 \cdot ЕТ + 7^\circ\text{C}.$$

В 2005 г. С. С. Андреевым предложен новый индекс — биологически активная температура (БАТ), которая позволяет определить комплексное воздействие на человека температуры, влажности воздуха, скорости ветра и суммарной солнечной радиации. Вычислить значения данного показателя можно по формуле [10]

$$БАТ = 0,8 \cdot НЭЭТ + 9^\circ\text{C}.$$

Е. Г. Головиной был введен еще один показатель — радиационно-эквивалентно-эффективная температура (РЭЭТ), который вычисляется по следующим зависимостям [12]:

$$РЭЭТ = 12 \lg[1 + 0,025T + 0,001(T - 8)(f - 60) - 0,45(33 - T)\sqrt{v} + 185B],$$

где  $T$  — температура воздуха,  $^\circ\text{C}$ ;  $f$  — относительная влажность воздуха, %;  $v$  — скорость ветра, м/с;  $B$  — поглощенная поверхностью тела солнечная радиация, кВт/м<sup>2</sup>.

### Постановка задачи исследования

В данном исследовании поставлена задача обобщения изоконфортных параметров микроклимата с учетом заданного уровня комфорта для каждого класса помещений.

В основу методики комплексной оценки уровня комфортности умеренного микроклимата по стандарту ГОСТ Р ИСО 7730–2009 [13] положены определения индексов теплового комфорта PMV и PPD. Прогнозируемая средняя оценка PMV — индекс, с помощью которого определяется среднее значение чувствительности к параметрам микроклимата по 7-балльной шкале. PPD — это показатель, который устанавливает прогнозируемый процент недовольных микроклиматом людей, которым слишком тепло или слишком холодно. Функциональная зависимость  $PPD = f(PMV)$  получена на основании математической обработки результатов субъективной оценки микроклиматических условий для большой выборки испытуемых. На рис. 2 данная функциональная зависимость приведена в графической интерпретации для помещений трех классов комфортности А, В, и С [14, 15].

Данная функция, по сути, является уравнением регрессии вида

$$PPD = 100 - 95 \exp(-0,03353 \cdot PMV^4 - 0,2179 \cdot PMV^2),$$

которое соотносит теплоощущения группы людей, находящихся в определенной среде, с результатами расчета по уравнению теплового баланса [16]. Это полуэмпирическое уравнение используется для предсказания среднего рейтинга на ординарной рейтинговой шкале теплового комфорта для группы людей. Стандартом предусмотрены три класса помещений по уровню теплового комфорта.

Помещения класса комфортности А:

$$-0,2 < PMV < +0,2; (PPD < 6\%)$$

Помещения класса комфортности В:

$$-0,5 < PMV < +0,5; (PPD < 10\%)$$

Помещения класса комфортности С:

$$-0,7 < PMV < +0,7; (PPD < 15\%).$$

В работах [17, 18] описано решение обратной задачи по отношению к методике определения уровня комфортности [5]. Методом последовательных приближений выполнен расчет совокупности параметров микроклимата, обеспечивающих заданный уровень теплового комфорта (изоконфортных параметров). Целевыми функциями расчетов являлось определение требуемой температуры воздуха в зависимости от подвижности и относительной влажности при отсутствии радиационного теплового воздействия (первая серия расчетов) и определение требуемой температуры воздуха в зависимости от подвижности и радиационной разности температур при постоянной (50%) относительной влажности воздуха (вторая серия расчетов). Под радиационной разностью температур здесь понимается разность между температурой воздуха и средней радиационной температурой ограждающих поверхностей. В табл. 1 и на рис. 3 приведены расчеты изоконфортной температуры воздуха в функции от подвижности и радиационной разности температур для конкретных характеристик одежды и уровня метаболизма при заданном классе комфортности В.

### Результаты исследования

Таким образом, для каждого класса помещений получена база данных для широкого диапазона характеристик одежды (clo) и уровня метаболизма (met), состоящая из таблиц изоконфортных параметров.

Фрагмент базы данных изоконфортных параметров для помещений класса В показан на рис. 4.

На основании описанной базы данных нами получен обобщающий критерий теплового комфорта, использование которого существенно упрощает расчет изоконфортных параметров. Вывод данного критерия основан на предложенном в работе [19], эмпирически полученном уравнении для эквивалентной температуры (параметра,

Таблица 1

Зависимость температуры воздуха от подвижности и радиационной разности температур для условий PPD = 10%, термическое сопротивление одежды 1,0 кло,  $t_r = t_a$ , °C, категория работы 1а (68 Вт/м²; 1,1met)

Table 1

The dependence of air temperature on the mobility and radiation temperature difference for the following parameters: PPD = 10%, clothing thermal resistance = 1.0 clo,  $t_r = t_a$ , °C, job class — 1a (68 Вт/м²; 1,1met)

PMV = +0,49				
$\Delta t_{\text{рад}}, ^\circ\text{C}$	$v = 0,1, \text{ м/с}$	$v = 0,3, \text{ м/с}$	$v = 0,5, \text{ м/с}$	$v = 0,7, \text{ м/с}$
–8	27,60	27,63	29,27	27,65
–4	25,81	26,29	28,10	26,63
0	23,98	24,92	26,90	25,59
4	22,12	23,52	25,67	24,51
8	20,356	22,08	22,901	23,41
PMV = –0,49				
$\Delta t_{\text{рад}}, ^\circ\text{C}$	$v = 0,1, \text{ м/с}$	$v = 0,3, \text{ м/с}$	$v = 0,5, \text{ м/с}$	$v = 0,7, \text{ м/с}$
–8	23,23	23,72	23,94	24,066
–4	21,45	22,40	22,81	23,06
0	19,63	21,04	21,65	22,03
4	17,89	19,65	20,46	20,97
8	16,252	18,227	19,248	19,877

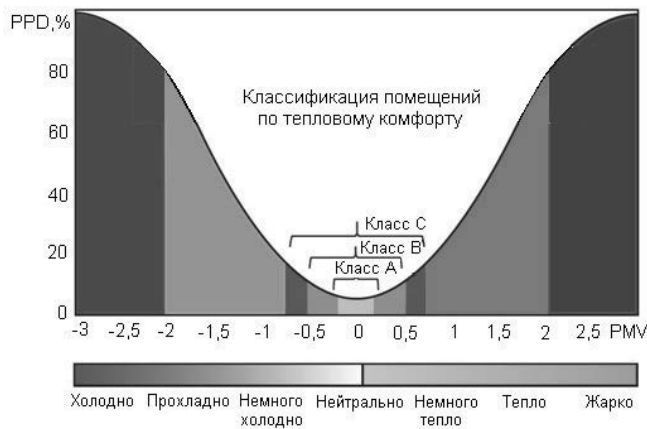


Рис. 2. Функциональная зависимость  $PPD = f(PMV)$   
Fig. 2. Functional dependency  $PPD = f(PMV)$

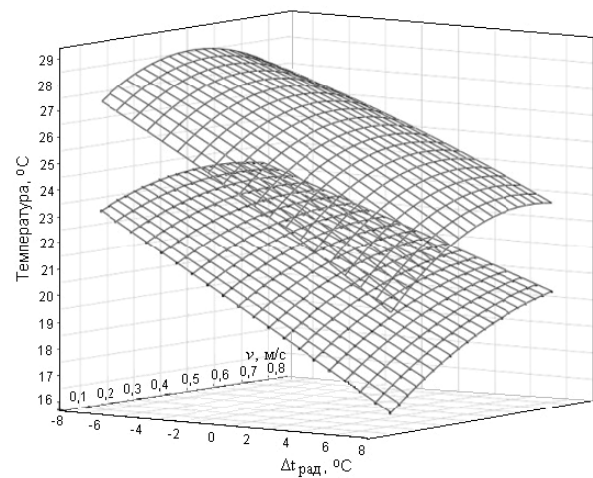


Рис. 3. Поверхности изокомфортных температур в координатах «подвижность — радиационная разность температур»  
Fig. 3. The surfaces of isocomfort temperatures in the coordinates of mobility — radiation temperature difference

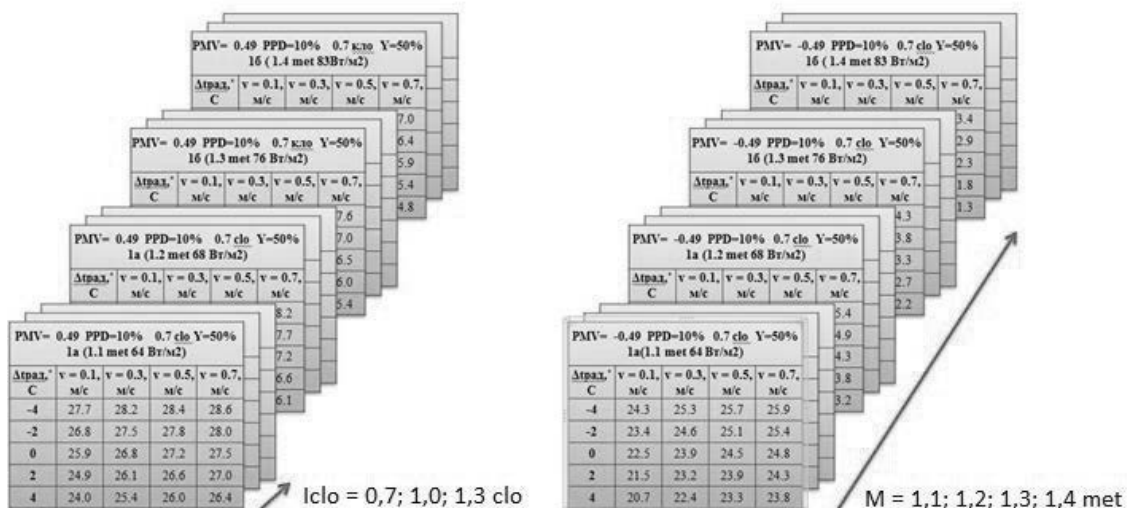


Рис. 4. Фрагмент базы данных изокомфортных параметров  
Fig. 4. Database of isomorph parameters. A fragment

соответствующего одинаковым теплоощущениям). Данное уравнение представляет собой функцию температуры воздуха, средней радиационной температуры, подвижности, и характеристик одежды:

$$t_{eq} = 0,55t_a + 0,45\bar{t}_r + \frac{0,24 - 0,75\sqrt{v_a}}{1 + I_{cl}}(36,5 - t_a),$$

где  $t_{eq}$  — эквивалентная температура, °C;  $t_a$  — температура воздуха, °C;  $\bar{t}_r$  — средняя радиационная температура, °C;  $v_a$  — скорость воздуха, м/с;  $I_{cl}$  — термическое сопротивление одежды, clo.

При подстановке в данное уравнение значений параметров, соответствующих заданному уровню теплового комфорта из базы данных изокомфортных параметров, вычисляется эквивалентная комфортная температура. Данный параметр соответствует не только одинаковым (эквивалентным) теплоощущениям, но

и удовлетворяет требуемому уровню теплового комфорта.

Рассмотрим пример расчета эквивалентной комфортной температуры. В табл. 2 приведены изокомфортные параметры для помещений класса В при заданном значении метаболизма 1,1 met и термическим сопротивлением одежды 1 clo.

Значения изокомфортных параметров (температура воздуха, подвижность воздуха, средняя радиационная температура) и термическое сопротивление одежды подставляем в формулу эквивалентной температуры и рассчитываем эквивалентную комфортную температуру  $t_{eqc}$

$$t_{eqc} = 0,55t_{ac} + 0,45\bar{t}_{rc} + \frac{0,24 - 0,75\sqrt{v_{ac}}}{1 + I_{cl}}(36,5 - t_{ac}), \quad (1)$$

где  $t_{ac}$  — температура воздуха комфортная, °C;  $\bar{t}_{rc}$  — средняя радиационная температура комфортная, °C;

Таблица 2

**Зависимость температуры воздуха от подвижности и радиационной разности температур для условий: термическое сопротивление одежды 1,0 clo, уровень метаболизма 1,1 met**

Table 2

**The dependence of air temperature on the mobility and radiation temperature difference for the following parameters: clothing thermal resistance — 1.0 clo, metabolism level — 1.1 met**

PMV = +0,49				
$\Delta t_{\text{рад}}, ^\circ\text{C}$	$v=0,05, \text{ м/с}$	$v=0,1, \text{ м/с}$	$v=0,15, \text{ м/с}$	$v=0,2, \text{ м/с}$
-4	26,03	26,26	26,43	26,54
-2	25,12	25,35	25,60	25,78
0	24,22	24,43	24,76	25,00
2	23,35	23,49	23,92	24,22
4	22,48	22,55	23,06	23,42
PMV = -0,49				
$\Delta t_{\text{рад}}, ^\circ\text{C}$	$v=0,05, \text{ м/с}$	$v=0,1, \text{ м/с}$	$v=0,15, \text{ м/с}$	$v=0,2, \text{ м/с}$
-4	21,98	22,20	22,53	22,76
-2	21,12	21,29	21,71	22,00
0	20,27	20,37	20,87	21,23
2	19,44	19,44	20,03	20,45
4	18,60	18,60	19,19	19,66

Таблица 3

**Эквивалентная комфортная температура для условий: термическое сопротивление одежды 1,0 clo, уровень метаболизма 1,1 met**

Table 3

**Equivalent comfort temperature for the following parameters: clothing thermal resistance — 1.0 clo, metabolism level 1.1 met**

PMV = +0,49				
$\Delta t_{\text{рад}}, ^\circ\text{C}$	$v=0,05 \text{ м/с}$	$v=0,1 \text{ м/с}$	$v=0,15 \text{ м/с}$	$v=0,2 \text{ м/с}$
-4	24,61	24,47	24,38	24,26
-2	24,63	24,47	24,42	24,37
0	24,66	24,45	24,46	24,45
2	24,73	24,41	24,50	24,53
4	24,79	24,37	24,52	24,60
Эквивалентная комфортная температура 24,61 °C				
PMV = -0,49				
$\Delta t_{\text{рад}}, ^\circ\text{C}$	$v=0,05 \text{ м/с}$	$v=0,1 \text{ м/с}$	$v=0,15 \text{ м/с}$	$v=0,2 \text{ м/с}$
-4	20,70	20,42	20,38	20,30
-2	20,78	20,41	20,44	20,41
0	20,86	20,39	20,48	20,50
2	20,96	20,36	20,51	20,58
4	21,05	20,43	20,55	20,66
Эквивалентная комфортная температура 20,65 °C				

$v_{ac}$  — скорость воздуха комфортная, м/с;  $I_{cl}$  — термическое сопротивление одежды, clo.

В результате, на основе данных табл. 2 определяем значения эквивалентной комфортной температуры при термическом сопротивлении одежды равным 1,0 clo и уровне метаболизма — 1,1 met (табл. 3).

Следовательно, значения эквивалентной комфортной температуры для условий термического сопротивления одежды 1,0 clo и уровня метаболизма 1,1 met для помещений класса комфортности В составляют:

$$t_{eqc} = 24,61 ^\circ\text{C} \text{ при } PMV = +0,49;$$

$$t_{eqc} = 20,65 ^\circ\text{C} \text{ при } PMV = -0,49.$$

Таким образом, приведенные в табл. 2 изоконфортные параметры, обобщены одним значением эквивалентной комфортной температуры.

В табл. 4 приведены результаты расчетов эквивалентной комфортной температуры для помещений класса комфортности В.

Для удобства практического применения результаты расчетов аппроксимированы с использованием встроенных подпрограмм табличного редактора Excel в виде показательных функций:

$$\text{для } PMV = +0,49, t_{eqc} = 40,23 \cdot 0,77^{\text{met}} \cdot 0,82^{\text{clo}};$$

$$\text{для } PMV = -0,49, t_{eqc} = 53,60 \cdot 0,58^{\text{met}} \cdot 0,70^{\text{clo}}.$$

Данные, обобщающие расчетные выражения параметра эквивалентной комфортной температуры, соответствуют требуемому уровню теплового комфорта в помещении класса комфортности В. Таким образом получен единый обобщающий критерий для определения параметров теплового комфорта.

В табл. 5 приведены полученные расчетные выражения эквивалентной комфортной температуры для помещений всех классов комфортности по стандарту [13].

Расчетные выражения комфортных параметров микроклимата с использованием эквивалентной комфортной температуры, полученные из формулы (1), имеют вид:

— комфортная температура воздуха

$$t_{ac} = \frac{t_{eqc} - 0,45\Delta\bar{t}_{rc} - \frac{0,24 - 0,75\sqrt{v_{ac}}}{1 + I_{cl}} \cdot 36,5}{1 - \frac{0,24 - 0,75\sqrt{v_{ac}}}{1 + I_{cl}}}; \quad (2)$$

— комфортная средняя радиационная температура

$$\Delta\bar{t}_{rc} = \frac{t_{eqc} - t_{ac} - \frac{0,24 - 0,75\sqrt{v_{ac}}}{1 + I_{cl}} (36,5 - t_{ac})}{0,45}; \quad (3)$$

— комфортная скорость воздуха

$$v_{ac} = \left[ \frac{0,24 - \frac{t_{eqc} - t_{ac} - 0,45\Delta\bar{t}_{rc}}{36,5 - t_{ac}} (1 + I_{clo})}{0,75} \right]^2. \quad (4)$$

В качестве апробации, предложенного в данной работе параметра эквивалентной комфортной температуры, определим необходимую среднюю радиационную температуру в помещении класса комфортности В.

Таблица 4  
Эквивалентные комфортные температуры для помещений класса комфортности В

Table 4

Equivalent comfort temperatures for the premises of B comfort class

PMV = +0,49			
	0,7 clo	1,0 clo	1,3 clo
1,1 met	26,66	25,28	23,93
1,2 met	26,07	24,61	23,19
1,3 met	25,69	24,18	22,71
1,4 met	24,92	23,31	21,75
PMV = -0,49			
	0,7 clo	1,0 clo	1,3 clo
1,1 met	23,73	21,77	19,85
1,2 met	22,76	20,65	18,58
1,3 met	22,13	19,91	17,75
1,4 met	20,86	18,45	16,09

Система жизнеобеспечения поддерживает в данном помещении температуру воздуха 25 °С, подвижность воздуха составляет 0,3 м/с, одежда персонала имеет характеристику 1,1 clo, уровень метаболизма при выполнении работ — 1,15 met.

Из выражений для эквивалентной комфортной температуры для помещений класса комфортности В (табл. 5) рассчитываем эквивалентную комфортную температуру:

$$\text{для } PMV = +0,49, t_{eqc} = 40,23 \cdot 0,77^{1,15} \cdot 0,82^{1,1} = 23,83;$$

$$\text{для } PMV = -0,49, t_{eqc} = 53,60 \cdot 0,58^{1,15} \cdot 0,70^{1,1} = 19,39.$$

В результате расчета по формуле (3) получены значения для искомой средней радиационной температуры:

$$\text{для } PMV = +0,49, \bar{t}_{rc} = 24,49 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$\text{для } PMV = -0,49, \bar{t}_{rc} = 14,60 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Таким образом, для обеспечения состояния комфорта соответствующего помещениям класса В, при задан-

## Литература

1. Измеров Н. Ф., Суворов Г. А., Куралесин Н. А и др. Физические факторы. Эколого-гигиеническая оценка и контроль. Практическое руководство, том 2. — Москва: Медицина, 1999. 440 с.
2. ANSI/ASHRAE Standard 55. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. 2010. P. 41.
3. Despopoulos A., Silbernagl S. Color Atlas of Physiology. 2003. P. 449.
4. Campbell I. Body Temperature and its Regulation. // *Anaesthesia & Intensive Care Medicine*, 2008. Vol. 9, No. 6, pp. 259–263.
5. Zolfaghari A. & Maerefat M. A New Simplified Thermoregulatory Bioheat Model for Evaluating Thermal Response of the Human Body to Transient Environment. // *Building and Environment*. 2010. Vol. 45. No. 10, pp. 2068–2076.
6. DuBois D. & DuBois E. F. A Formula to Estimate Approximate Surface Area, if Height and Weight are Known. // *Archives of Internal Medicine*, 1916. Vol. 17, pp. 863–871.

Таблица 5  
Параметр эквивалентной комфортной температуры

Table 5

The parameter of equivalent comfort temperature

Класс помещения по ГОСТ Р ИСО 7730	Прогнозируемая средняя оценка PMV, балл	Эквивалентная комфортная температура, °С
А	+0,19	$t_{eqc} = 43,04 \cdot 0,72^{met} \cdot 0,79^{clo}$
	-0,19	$t_{eqc} = 48,32 \cdot 0,64^{met} \cdot 0,73^{clo}$
В	+0,49	$t_{eqc} = 40,23 \cdot 0,77^{met} \cdot 0,82^{clo}$
	-0,49	$t_{eqc} = 53,60 \cdot 0,58^{met} \cdot 0,70^{clo}$
С	+0,69	$t_{eqc} = 38,63 \cdot 0,80^{met} \cdot 0,84^{clo}$
	-0,69	$t_{eqc} = 44,25 \cdot 0,65^{met} \cdot 0,72^{clo}$

ных исходных данных, средняя радиационная температура должна находиться в пределах от 14,6 °С до 24,5 °С.

## Закключение

Рассмотрена методика определения необходимых сочетаний параметров микроклимата и личностных параметров, обеспечивающих требуемый уровень теплового комфорта в соответствии со стандартом ISO 7730. Предложено использовать эмпирически полученное расчетное выражение для эквивалентной температуры, на основе которого получен обобщающий параметр эквивалентной комфортной температуры, который соответствует требуемому уровню теплового комфорта в помещении. Шесть рассчитанных массивов данных с параметрами теплового комфорта для помещений классов А, В и С обобщены шестью алгебраическими выражениями. Данные расчетные выражения эквивалентной комфортной температуры могут быть использованы при проектировании систем кондиционирования воздуха и при программировании систем автоматического управления микроклиматом.

## References

1. Izmerov N. F., Suvorov G. A., Kuralessin N. A et al. Physical factor. Ecological and hygienic assessment and control. A practical guide. Vol. 2. Moscow: Meditsina, 1999. 440 p. (in Russian)
2. ANSI/ASHRAE Standard 55. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. 2010. P. 41.
3. Despopoulos A., Silbernagl S. Color Atlas of Physiology. 2003. P. 449.
4. Campbell I. Body Temperature and its Regulation. *Anaesthesia & Intensive Care Medicine*, 2008. Vol. 9, No. 6, pp. 259–263.
5. Zolfaghari A. & Maerefat M. A New Simplified Thermoregulatory Bioheat Model for Evaluating Thermal Response of the Human Body to Transient Environment. *Building and Environment*. 2010. Vol. 45. No. 10, pp. 2068–2076.
6. DuBois D. & DuBois E. F. A Formula to Estimate Approximate Surface Area, if Height and Weight are Known. *Archives of Internal Medicine*, 1916. Vol. 17, pp. 863–871.

7. Holopainen R., Tuomaala P., Hernandez P., Häkkinen T., Piira K., Piippo J. Comfort assessment in the context of sustainable buildings: Comparison of simplified and detailed human thermal sensation Methods. // *Building and Environment*. 2014. Vol. 71. P. 60–70.
8. Halawa E, Van Hoof J. The adaptive approach to thermal comfort: a critical overview. // *Energy and Buildings*. 2012. Vol. 51. P. 101–110.
9. Gagge A. P., Stolwijk J. A. and Nishi Y. An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory response. *ASHRAE Transactions* 77 Part I: 1971. P. 247–262.
10. Исаев А. А. Экологическая климатология. — М.: Научный мир, 2001, 458 с.
11. Айзенштадт Б. А. Метод расчета некоторых биоклиматических показателей // *Метеорология и гидрология*. 1964. № 12. с. 9–16.
12. Головина Е. Г., Трубина М. А. Методика расчетов биометеорологических параметров (индексов). — СПб.: Гидрометеиздат, 1997. 110 с.
13. ГОСТ Р ИСО 7730–2009. Аналитическое определение и интерпретация комфортности теплового режима с использованием расчета показателей PMV и PPD и критериев локального теплового комфорта. — М.: Стандартинформ, 2011. 38 с.
14. Syed Ihtsham-ul-Haq Gilani, Muhammad Hammad Khan, Muzaffar Ali. Revisiting Fanger's thermal comfort model using mean blood pressure as a bio-marker: An experimental investigation // *Applied Thermal Engineering*, Vol. 109, Part A, 25 October 2016, P. 35–43.
15. Arens E, Humphreys M. A., De Dear R., Zhang H. Are 'class A' temperature requirements realistic or desirable. // *Build Environ*. 2010. Vol. 45. P. 4–10.
16. Fanger P. O. Thermal Comfort Analysis and Applications in Environmental Engineering. McGraw-Hill, New York, 1970. 244 p.
17. Поддубный Р. А., Рябова Т. В., Сулин А. Б. Построение матриц изоконфортных значений параметров микроклимата. // *Вестник ДГТУ. Технические науки*. 2016. 41 (2). с. 68–74.
18. Сулин А. Б., Рябова Т. В., Иванов С. В., Поддубный Р. А. Расчетное обоснование параметров микроклимата с заданным уровнем теплового комфорта // *Холодильная техника*. 2017. № 4. С. 37–41.
19. Madsen T., Olesen B. & Kristensen N. Comparison between operative and equivalent temperature under typical indoor conditions. *ASHRAE Transactions*, 1984. Vol. 90, part 1, pp. 1077–1090.
7. Holopainen R., Tuomaala P., Hernandez P., Häkkinen T., Piira K., Piippo J. Comfort assessment in the context of sustainable buildings: Comparison of simplified and detailed human thermal sensation Methods. *Building and Environment*. 2014. Vol. 71. P. 60–70.
8. Halawa E, Van Hoof J. The adaptive approach to thermal comfort: a critical overview. *Energy and Buildings*. 2012. Vol. 51. P. 101–110.
9. Gagge A. P., Stolwijk J. A. and Nishi Y. An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory response. *ASHRAE Transactions* 77. Part I: 1971. P. 247–262.
10. Isaev A. A. Ecological climatology. Moscow, Nauchnyi mir, 2001, 458 p. (in Russian)
11. Aizenshtadt B. A. Method of calculation of some bioclimatic indices. *Meteorologiya i gidrologiya*. 1964. No 12. p. 9–16. (in Russian)
12. Golovina E. G., Trubina M. A. Methods of calculation of biometeorological parameters (indices). — SPb.: Gidrometeoizdat, 1997. 110 p. (in Russian)
13. State Standard R ISO 7730–2009. Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal criteria of comfort. Moscow, Standartinform, 2011. 38 p. (in Russian)
14. Syed Ihtsham-ul-Haq Gilani, Muhammad Hammad Khan, Muzaffar Ali. Revisiting Fanger's thermal comfort model using mean blood pressure as a bio-marker: An experimental investigation. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 109, Part A, 25 October 2016, P. 35–43.
15. Arens E, Humphreys M. A., De Dear R., Zhang H. Are 'class A' temperature requirements realistic or desirable. *Build Environ*. 2010. Vol. 45. P. 4–10.
16. Fanger P. O. Thermal Comfort Analysis and Applications in Environmental Engineering. McGraw-Hill, New York, 1970. 244 p.
17. Poddubnyi R. A., Ryabova T. V., Sulin A. B. Construction of matrices from comfortable values of microclimate parameters. *Vestnik DGTU. Tekhnicheskie nauki*. 2016. 41 (2). p. 68–74. (in Russian)
18. Sulin A. B., Ryabova T. V., Ivanov S. V., Poddubnyi R. A. Calculation substantiation of microclimate parameters with a given level of thermal comfort. *Kholodil'naya tekhnika*. 2017. No 4. p. 37–41. (in Russian)
19. Madsen T., Olesen B. & Kristensen N. Comparison between operative and equivalent temperature under typical indoor conditions. *ASHRAE Transactions*, 1984. Vol. 90, part 1, pp. 1077–1090.

### Сведения об авторах

#### Рябова Татьяна Владимировна

аспирант кафедры инженерного проектирования систем жизнеобеспечения Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, rjabova\_tatjana@mail.ru

#### Сулин Александр Борисович

д.т. н., профессор кафедры инженерного проектирования систем жизнеобеспечения Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, miconta@rambler.ru

#### Санкина Юлия Николаевна

магистрант кафедры инженерного проектирования систем жизнеобеспечения Университета ИТМО, 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9, ulyashka95@yandex.ru

### Information about authors

#### Ryabova Tatyana Vladimirovna

postgraduate student of the Department of engineering design of life support systems of ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, rjabova\_tatjana@mail.ru

#### Sulin Aleksander Borisovich

D. Sc., professor of the Department of engineering design of life support systems of ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, miconta@rambler.ru

#### Sankina Yuliya Nikolaevna

undergraduate of the Department of engineering design of life support systems of ITMO University, 191002, Russia, St. Petersburg, Lomonosov str., 9, ulyashka95@yandex.ru