

УДК 629.12.06:628.84

© Ходарина К.В.\*

**АНАЛИТИЧЕСКАЯ ВЗАИМОСВЯЗЬ ПРОЦЕССОВ ЭНЕРГООБМЕНА  
ОРГАНИЗМА ЧЕЛОВЕКА С ОКРУЖАЮЩЕЙ АТМОСФЕРОЙ**

*Используя теоретические основы создания судового микроклимата для формирования алгоритмов по контролю и управлению воздушной средой помещений, автор осуществил исследования по установлению закономерности взаимосвязи между комплексным показателем теплоощущений человека PMV и комплексным показателем энергетического состояния окружающей воздушной среды PT методом многофакторного эксперимента и математического описания в виде уравнения регрессии.*

**Ключевые слова:** *результурующая температура, интегральный показатель теплоощущений, микроклимат, обитаемость.*

**Ходарина К.В. Аналітичний взаємозв'язок процесів енергообміну організму людини з навколишньою атмосферою.** Використовуючи теоретичні основи створення судового мікроклімату для формування алгоритмів з контролю та управління повітряним середовищем приміщень, автор здійснив дослідження по встановленню закономірності взаємозв'язку між комплексним показником тепловідчуття людини PMV і комплексним показником енергетичного стану навколишнього повітряного середовища PT методом багатofакторного експерименту і математичного опису у вигляді рівняння регресії.

**Ключові слова:** *результуюча температура, інтегральний показник тепловідчуття, мікроклімат, населеність.*

**K.V. Khodarina. Analytical interconnection of energy processes of the human body with the surrounding atmosphere.** Scientific research, described by the author in this article addresses the important scientific and practical issues of social ecological safety of life, which is to stabilize the performance of the RT for the passengers and crew PMV by the regulatory impact on air quality computer equipment. The problem of habitability sea and river transport vehicles associated with the creation of the microclimate in the passenger cabin, crew, production and office space remains unresolved and is located at 50 years old due to a lack of new technical means for climate control air pollution. Using the theoretical basis for the creation of the ship microclimate for the formation of algorithms for control and management of indoor air, the author carried out a study to establish the relationship between patterns of complex refractive thermal sensation human PMV and complex refractive energy state ambient air by RT multifactor experiment and mathematical description in the form of the regression equation. The results of mathematical modeling showed non-linear relationship between PMV and PT and yielded quite correct empirical formula. Nonlinear coefficients of the regression equation has a physical confirmation, since metabolism (M) and the work (W) of the human body are united by the - heart rate. Establishing the analytical relationship between the parameters of the control object in the court system and microclimate integral indicator of the environment allows to proceed to further improvement of the management systems, which is aimed at the development of optimal controllers comfortable microclimate.

**Keywords:** *the resulting temperature integral indicator of thermal sensations, microclimate, habitability.*

**Постановка проблемы.** Существенное влияние на психофизиологический статус экипажа морских судов оказывают производственные факторы. Одним из важных показателей явля-

\* канд. техн. наук, доцент, Азовский морской институт Одесской национальной морской академии, г. Мариуполь, [kkhodarina@yandex.ru](mailto:kkhodarina@yandex.ru)

ется микроклимат помещения.

Условия труда и быта на судне и берегу определяются санитарными правилами и нормами, а также требованиями к системе управления безопасностью компании и судна, изложенными в «Положении о системе управления безопасностью судоходства на морском и речном транспорте Украины» (Приказ Министерства инфраструктуры от 01.11.2011 №787).

В процессе трудовой деятельности на судне активность оператора эргатических систем зависит от рода задач управления, режима труда и отдыха, а также параметров воздушной среды его местопребывания. В связи с этим особую актуальность приобретает расчет статистических характеристик процессов энергообмена организма человека с окружающей атмосферой.

**Анализ последних исследований и публикаций.** В теории микроклимата показана количественная взаимосвязь между показателями жизненной активности физиологических функций организма, внешней работы и теплоощущений.

Такую связь представляет уравнение Фангера:

$$PMV = (0,303e^{-0,036M} + 0,028) \left[ \begin{array}{l} (M - W) - 3,05 \cdot 10^{-3} \{5733 - 6,99(M - W) - p_a\} - \\ - 0,42 \{ (M - W) - 58,15 \} - 1,7 \cdot 10^5 M (5867 - p_a) - \\ - 0,014 M (34 - t_a) - 3,96 \cdot 10^{-8} f_{cl} \{ (t_{cl} + 273,15)^4 - (t_r + 273,15)^4 \} - \\ - f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a) \end{array} \right], \quad (1)$$

где

$$t_{cl} = 35,7 - 0,028(M - W) - 0,155 l_{cl} \left[ 3,96 \cdot 10^{-8} f_{cl} \{ (t_{cl} + 273,15)^4 - (t_r + 273,15)^4 \} + f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a) \right];$$

$$h_{cl} = \begin{cases} 2,38(t_{cl} - t_a)^{0,25} & 2,38(t_{cl} - t_a)^{0,25} > 12,1\sqrt{v_{ar}}, \\ 12,1\sqrt{v_{ar}} & 2,38(t_{cl} - t_a)^{0,25} < 12,1\sqrt{v_{ar}}; \end{cases}$$

$$f_{cl} = \begin{cases} 1,00 + 0,2l_{cl} & l_{cl} < 0,5clo, \\ 1,05 + 0,1l_{cl} & l_{cl} > 0,5clo. \end{cases}$$

Здесь  $PMV$  – интегральный показатель теплоощущений человека, отн. ед;

$M$  – удельный показатель метаболизма,  $met$ ;

$W$  – показатель внешней работы,  $met$ ;

$l_{cl}$  – термическое сопротивление одежды,  $clo$ ,  $1 clo = 0,155 m^2 C/Wt$ ;

$f_{cl}$  – отношение поверхности одетой части тела к поверхности тела без одежды, отн.ед;

$t_a$  – температура окружающего воздуха,  $^{\circ}C$ ;

$t_r$  – усредненная радиационная температура,  $^{\circ}C$ ;

$v_{ar}$  – скорость воздуха у поверхности тела,  $m \cdot c^{-1}$ ;

$p_a$  – давление водяных паров в воздухе,  $kPa$ ;

$h_{cl}$  – коэффициент конвективного теплообмена,  $Wt \cdot m^{-2} C^{-1}$ ;

$f_{cl}$  – температура поверхности одежды,  $^{\circ}C$ ; [1].

Показатель метаболизма и внешней работы организма зависит от частоты сердечных сокращений  $\omega$ :

$$M = f_1(\omega) \text{ и } W = f_2(\omega).$$

Величина  $M$  обычно представляется уравнением второй степени от  $\omega$ , а величина  $W$  может быть представлена линейной зависимостью от  $\omega$ . Коэффициенты уравнений определяются эмпирически в зависимости от пола, возраста и вида деятельности людей.

В зарубежной научной литературе уровень активности человека ( $M-W$ ) измеряется экстенсивной величиной « $met$ », единицей которой  $1 met = 58,15 Wt/m^2$ . Удельная тепловая и удельная физическая нагрузки отнесены к единице площади по Дюбуа.

Площадь поверхности тела по Дюбуа:

$$F_{DU} = 0,203 m_T^{0,425} \cdot l_T^{0,725},$$

где  $m_T$  – масса тела,  $kg$ ;  $l_T$  – длина тела,  $m$ .

Давление водяных паров в воздухе при известной относительной влажности может быть определено как

$$p_a = p_{н.н.} \cdot \varphi,$$

где  $p_{н.н.}$  – давление насыщенных водяных паров при текущей температуре, кПа;  $\varphi$  – относительная влажность при текущей температуре, отн. ед.

Зависимость давления насыщенных водяных паров во влажном воздухе определяется зависимостью:

$$p_{н.н.} = 0,00608 \left( \frac{1,075}{1,000255} t \right)^t.$$

Показатель микроклимата воздушной среды (РТ) для раздетых людей:

$$RT = \frac{PT_c + 12,2 + [5,94 - 0,15(PT_c - t_m)]x}{2,42 - 0,032x}, \quad (2)$$

где  $PT_c = \frac{t_p + 12,2 + (1,7v_{ar}^{0,7} + 0,9)t_a}{1,7v_{ar}^{0,7} + 1,9};$

$$x = \frac{PT_c - b_0}{b_1 + 0,15(PT_c - t_m)};$$

$$b_0 = \begin{cases} 12,2v_{ar}^{0,28}, & \text{если } 0,15 \leq v_{ar} \leq 3,5 \text{ м/с,} \\ 12,75 + 3,34 \ln v_{ar}, & \text{если } 3,5 \leq v_{ar} \leq 10 \text{ м/с;} \end{cases}$$

$$b_1 = 4,52 - 0,34 \ln v_{ar};$$

$PT_c$  – сухая результирующая температура, °С;

$t_p$  – радиационная температура, °С.

Если вместо  $t_m$  задана относительная влажность воздуха [2], то в интервале  $\varphi_n \in [0,3; 0,9 \text{ отн. ед.}]$  может быть определена как

$$t_m = (0,45\varphi_n + 0,59)t_n + 4,8\varphi_n - 5.$$

**Цель статьи** – установление количественной (аналитической) взаимосвязи между показателем энергетического состояния человека и его внешней микроклиматической тепловой нагрузкой.

**Изложение материала.** Исследованию подверглись два нормируемых показателя, которые используются в технике кондиционирования воздуха и микроклимата жилых и служебных помещений судна и отдельных стационарных зданий и сооружений.

В задачу исследования входило проведение многофакторного виртуального эксперимента для установления зависимости между величинами PMV и RT в виде  $PMV = PMV(RT)$ . Для чего была разработана программа, которая по заданным параметрам окружающей среды рассчитывает соответствующие им значения PMV и RT.

Решение поставленной задачи производилось путем поочередного, а также совместного варьирования основных параметров окружающей среды, таких как:  $t_a$  – температура окружающей среды, (°С);  $v_{ar}$  – скорость движения окружающего воздуха, (м/с);  $t_r$  – радиационная температура ограждающих поверхностей, (°С) и  $\varphi_a$  – относительная влажность окружающего воздуха, (%).

Определение вспомогательных величин, входящих в выражение для определения PMV, осуществлено методом последовательных приближений.

Было проведено несколько экспериментов при различных значениях  $M-W$  для того, чтобы оценить их влияние на нормируемые показатели и получить обобщающую модель. Результаты приведены на рис. 1.

Для каждой из регрессий определялись статистические характеристики регрессионного анализа для каждого значения  $M-W$  в виде:

$$PMV(PT_i) = \sum_{i=0}^j b_i PT_i^i, \quad (3)$$

а также:

математическое ожидание:  $\overline{PMV} = \frac{\sum_i PMV_i}{n};$

дисперсия остатков: 
$$S_{ост} = \sqrt{\frac{\sum (PMV_i - \hat{PMV}(RT_i))^2}{n-2}};$$

дисперсия среднего: 
$$S_{cp} = \sqrt{\frac{\sum (PMV_i - \overline{PMV})^2}{n-1}};$$

критерий Фишера: 
$$F = \frac{S_{cp}}{S_{ост}};$$

коэффициент парной корреляции:

$$r_{PMV, PMV(RT)} = \frac{\sum_i PMV_i \cdot \hat{PMV}(RT_i) - n^{-1} \left( \sum_i \hat{PMV}(RT_i) \right) \cdot \left( \sum_i PMV_i \right)}{\sqrt{\left[ \sum_i (\hat{PMV}(RT_i))^2 - n^{-1} \left( \sum_i \hat{PMV}(RT_i) \right)^2 \right] \cdot \left[ \sum_i (PMV_i)^2 - n^{-1} \left( \sum_i PMV_i \right)^2 \right]}}$$

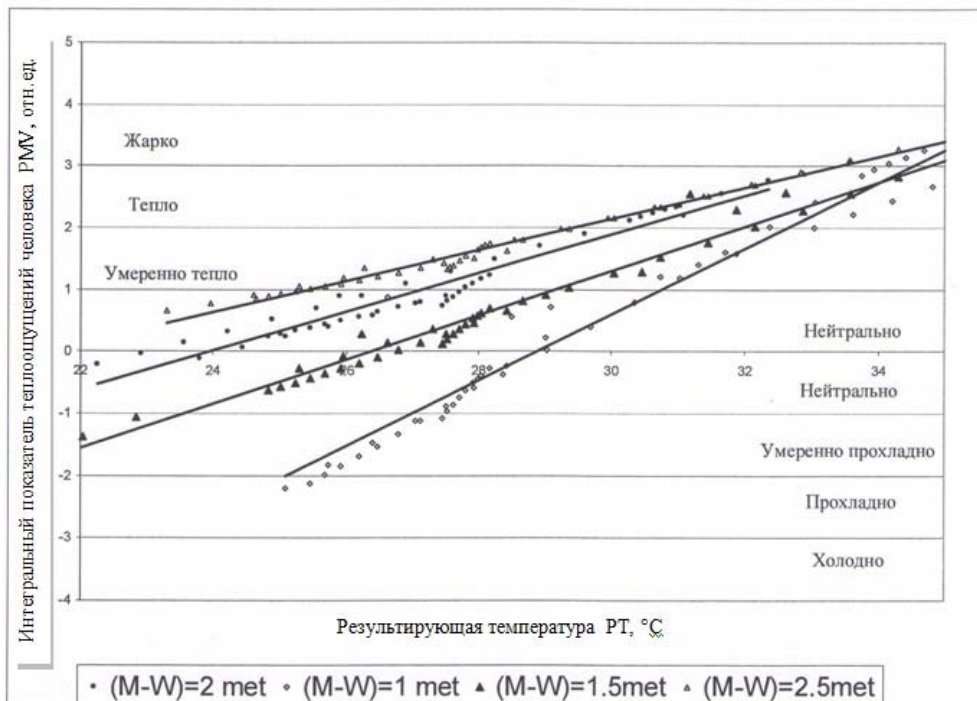


Рис. 1 – Регрессионная зависимость между величинами PMV и RT

Как видно из табл. 1 во всех случаях регрессионные модели имеют высокий коэффициент корреляции, что свидетельствует о наличии тесной прямой взаимосвязи между регрессией и исходной выборкой данных.

Таблица 1

Статистические характеристики регрессионного анализа

Хар-ка (M-W)	1 met	1,5 met	2 met	2,5 met
$b_0$	-15,3550	-9,4565	-7,4983	-5,3985
$b_1$	0,5317	0,3588	0,3131	0,2518
$\overline{PMV}$	0,3298	0,3673	1,0262	1,8132
$S_{ост}$	0,1632	0,0321	0,0349	0,0067
$S_{cp}$	0,246278	0,2043	0,1136	0,1154
$F_{0.5}$	1,509056	6,3578	3,2577	17,2834
$r_{PMV, PMV(RT)}$	0,9716	0,9920	0,9714	0,9947

Критерий Фишера превышает граничное значение при 50-ти процентном уровне значимости, что говорит о достоверности построенной модели. Причем, чем больше значение  $M-W$ , тем больше достоверность линейной регрессии [3].

Для получения обобщенной модели была построена регрессия вида:

$$PMV(P T_i) = \sum_{i=0}^1 b_i (M - W) RT^i,$$

в которой коэффициенты регрессии зависят от значения  $M-W$ .

Зависимости коэффициентов регрессии приведены на рис. 2.

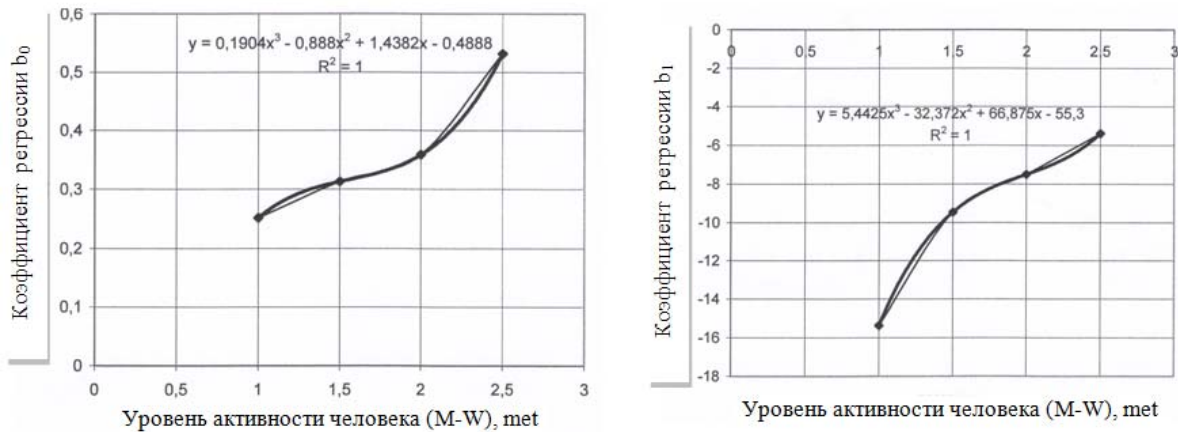


Рис. 2 - Зависимость коэффициентов линейной регрессии от  $M-W$ .

Как видно из рис. 2, коэффициенты регрессии с высокой степенью достоверности описываются полиномами третьей степени или линейно-кусочной функцией вида:

$$PMV = b_0 PT + b_1, \tag{4}$$

где

$$b_0 = \begin{cases} 0,107(M - W) + 0,145 \text{ при } (M - W) \leq 2, \\ 0,346(M - W) - 0,333 \text{ при } (M - W) > 2; \end{cases}$$

$$b_1 = \begin{cases} 11,8(M - W) - 27,15 \text{ при } (M - W) \leq 1,5, \\ 4,06(M - W) - 15,54 \text{ при } (M - W) > 1,5; \end{cases}$$

**Выводы**

Результаты математического моделирования показали нелинейную связь между  $PMV$  и  $PT$  и позволили получить достаточно корректную эмпирическую формулу (4).

Нелинейность коэффициентов уравнения регрессии (4) имеет физическое подтверждение, так как метаболизм ( $M$ ) и работа ( $W$ ) организма человека объединены общим параметром – частотой сердечных сокращений.

Установление аналитической взаимосвязи между параметрами объекта управления в системах судового микроклимата и интегральным показателем внешней среды позволяет приступить к дальнейшему совершенствованию этих систем управления, которое направлено на разработку оптимальных регуляторов комфорта микроклимата.

**Список использованных источников:**

1. Ходарина К.В. Моделирование процесса выбора оптимальных значений интегральных показателей, определяющих микроклимат судовых помещений / К.В. Ходарина // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. Володимира Даля. – 2012. – №6 (177), частина 1. – С. 23-28.
2. Голиков В.А. Научные основы управления микроклиматом судна / В.А. Голиков. – Одесса: ОГМА, 1999. – 321 с.

3. Грэхем Р. Конкретная математика. Основание информатики / Р. Грэхем, Д. Кнут, О. Паташник. – М.: Мир, 1998. – 703 с.

**Bibliography:**

1. Khodarina K.V. Simulation of the process of selecting the optimal values of integral parameters determining the microclimate areas of the vessel / K.V. Khodarina // Journal of East Ukrainian National University Vladimir Dahl - 2012. - №6 (177). Ch. 1. - P. 23-28. (Rus.)
2. Golikov V.A. Scientific basis of climate control vessel / V.A. Golikov. - Odessa: OGMA, 1999. - 321 p. (Rus.)
3. Graham R. Concrete Mathematics. Base Informatics / R. Graham, D. Knuth, O. Patashnik. - М.: Mir, 1998. - 703 p. (Rus.)

Рецензент: А.М. Берестовой  
д-р техн. наук, проф., АМИ ОНМА

Статья поступила 10.11.2014