

УДК 629.12.06:628.84:517.3

**SHIP'S MICROCLIMATE SYSTEM AS A MEAN TO MAINTAIN OPERATOR WORKABILITY****СУДОВАЯ СИСТЕМА МИКРОКЛИМАТА КАК СРЕДСТВО ПОДДЕРЖАНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ОПЕРАТОРОВ**

V.I. Kapustin<sup>1</sup>, *PhD student*, P.S. Stetsenko<sup>2</sup>, *PhD student*  
В.И. Капустин<sup>1</sup>, аспирант, П.С. Стеценко<sup>2</sup>, аспирант

<sup>1</sup>*Sevastopol National Technical University, Ukraine*

<sup>1</sup>*Севастопольский национальный технический университет, Украина*

<sup>2</sup>*Odessa National Maritime Academy, Ukraine*

<sup>2</sup>*Одесская Национальная Морская Академия, Украина*

**ABSTRACT**

Options of maintaining vessel control systems of operators' workability applying dynamic climate methods are presented in the paper. Obtained analytical relation between operator's activity and his thermal condition.

Conducted joint modeling of heat and mass transfer in the room and thermoregulation of the human body in order to detect the possibility of creating dynamic climate mode by changing air temperature supply.

**Key words:** dynamic climate, operator activity, man-machine system, predicted mean vote, ship microclimate system.

**Постановка проблемы в общем виде**

Интенсификация транспортного процесса связанная с морскими перевозками привела к резкому возрастанию роли «человеческого фактора» в судовых эргатических системах. Повсеместное сокращение численности экипажей судов, значительный интервал времени необходимый для операторской деятельности при минимальной физической активности, приводит к накоплению усталости, рассеянному вниманию и другим психоэмоциональным отклонениям, снижающим надежность эксплуатации судов. Об этом свидетельствует статистика аварийности флота.

Одним из эффективных методов борьбы с данной проблемой является создание динамически меняющихся наиболее важных параметров микроклимата (температуры, подвижности и относительной влажности) в помещении оператора. Комплекс параметров воздуха, под воздействием которых средневзвешенная температура кожи человека совершает периодические отклонения от оптимальных значений с определенной частотой, называется динамическим микроклиматом. Изменение условий теплоотдачи человека, занятого легкой физической либо умственной работой, при динамическом микроклимате повышает психофизиологическую активность и работоспособность за счет

возбуждения центральной нервной системы, которое происходит вследствие активизации процессов физической (сосудистой) терморегуляции.

Для создания рассмотренных параметров воздуха в помещении необходимо использовать систему кондиционирования в режиме динамического микроклимата. Такая система должна подавать в помещение воздух с параметрами, которые непрерывно меняются во времени, при этом температура и влажность воздуха в рабочей зоне должны устанавливаться в соответствии с заданным законом. Поддержание заданных параметров микроклимата, определение характеристик приточного воздуха и нагрузок на ССМ представляет собой довольно сложную научную и техническую задачу. Для предварительного определения характеристик, которыми должна обладать данная ССМ, обеспечивающая условия динамического микроклимата, а также установления динамики тепловых ощущений оператора не обходимо провести имитационное моделирование.

### **Анализ последних исследований и публикаций**

В работе [1] проведен ряд экспериментов для установления взаимосвязи между теплоощущением оператора и температурой атмосферы помещения путем гармоничного изменения ее температуры с различной амплитудой. Также отмечается, что тепловое состояние «комфорт» соответствует состоянию активности головного мозга на уровне  $\Delta$ - или  $\theta$ -ритмов (сон, покой, отдых). Тепловым состояниям «тепло» или «прохладно» соответствует активность головного мозга на уровне  $\alpha$ - или  $\beta_1$ -ритмов (умственная, умеренная физическая работа). Тепловым состояниям «жарко» и «холодно»  $-\beta_2$  или  $\gamma$  -ритмы (бодрствование, интенсивная работа). Такое распределение тепловых ощущений характерно для показателя комфортности *PMV*. Прогнозируемая средняя оценка (*PMV*) – показатель, с помощью которого прогнозируют среднее значение чувствительности к температуре большой группы людей на основе баланса температуры тела человека по 7-балльной шкале. Баланс температуры достигается, когда вырабатываемое телом человека тепло равно потере телом тепла в окружающей среде. Динамику теплообмена организма с окружающей средой и его энергетических показателей можно определить, используя модель терморегуляции человека с окружающей средой [2], т.к. тепловая нагрузка на организм отражается на температуре кожи человека.

**Цель исследования** – обоснование возможности влияния на степень активности оператора тепловым гармоническим воздействием.

### **Изложение основного материала исследования**

Процесс терморегуляции в организме человека и выполнение им физической работы характеризуется интенсивностью сердечных сокращений. В состоянии покоя и ощущение человеком теплового комфорта частота сердечных сокращений минимальна и равна в среднем 1 Гц. Как уже упоминалось это состояние соответствует  $\Delta$ -ритму активности головного мозга.

Определим степень активности человека при различных тепловых ощущениях, для человека не выполняющего физической работы ( $W_T=0$ ). Интенсивность сердечных сокращений определяется зависимостью:

$$\omega_c = \frac{|PMV|+3}{3} + \frac{W_T}{W_{T(2,83)}} \left( \frac{11-2|PMV|}{6} \right), \quad (1)$$

где  $W_{T(2,83)}$  — максимальная мощность физической работы при  $\omega_c = 2,83 \text{ с}^{-1}$  (170 мин<sup>-1</sup>), Вт, {У моряков  $W_{T(2,83)} \in [110, 120 \text{ Вт}]$ }, Вт;  
 $PMV$  — теплоощущение, ед.

Из формулы (1) можно видеть, что для таких психофизиологических ощущений: «комфорт», «прохладно/тепло», «холодно/жарко», «очень холодно/очень жарко» частота сердечных сокращений принимает значения 1; 1,33; 1,67; 2 Гц.

Организм человека характеризуется общей внутренней мощностью, которая в состоянии теплового комфорта может быть определена по следующей зависимости:

$$P_T = 20 \cdot 2,5^{\omega_c}, \quad (2)$$

В состоянии покоя внутренняя мощность составляет  $P_{T0} = 50$  Вт.

При выполнении физической работы формулу (2) можно представить в следующем виде:

$$P_T = P_{T0} + W_T,$$

$$W_T = P_T - 50.$$

$W_T$  зависит от рода трудовой деятельности:

- В случае покоя(отдыха)  $W_T \approx 0$ ;
- В случае легкой работы  $0 < W_T \leq 30$ ;
- В случае работы средней тяжести  $30 < W_T \leq 50$ ;
- В случае тяжелой работы  $W_T > 50$ ;

Зависимость  $W_T = f(\omega_c)$  в интервале  $\omega_c \in [1; 2,83]$  Гц принята линейной [3]. Для номинальной частоты сердечных сокращений  $\omega_c = 2,83$ , характерной для тяжелой физической работы, примем механическую мощность, развиваемую организмом человека, равную 110 Вт.

В результате, зависимость тяжести физической работы от частоты пульса человека примет вид:

$$W_T = 60(\omega_c - 1) = \left( \frac{|PMV|+3}{3} - 1 \right) = 20|PMV|$$

Точки *A*, *B*, *C* на графике, изображенном на рис. 1, соответствуют степеням активности человека при различном теплоощущении, которые в свою очередь находятся в интервалах, характерных для легкой, средней и тяжелой физической

работе. При тепловых нагрузках на организм человека включается процесс терморегуляции, который активизирует сердечно-сосудистую систему, что неизбежно ведет к повышению активности мозга (изменению частоты его собственных колебаний). В результате установлена линейная взаимосвязь между степенью активности человека и его теплоощущения:

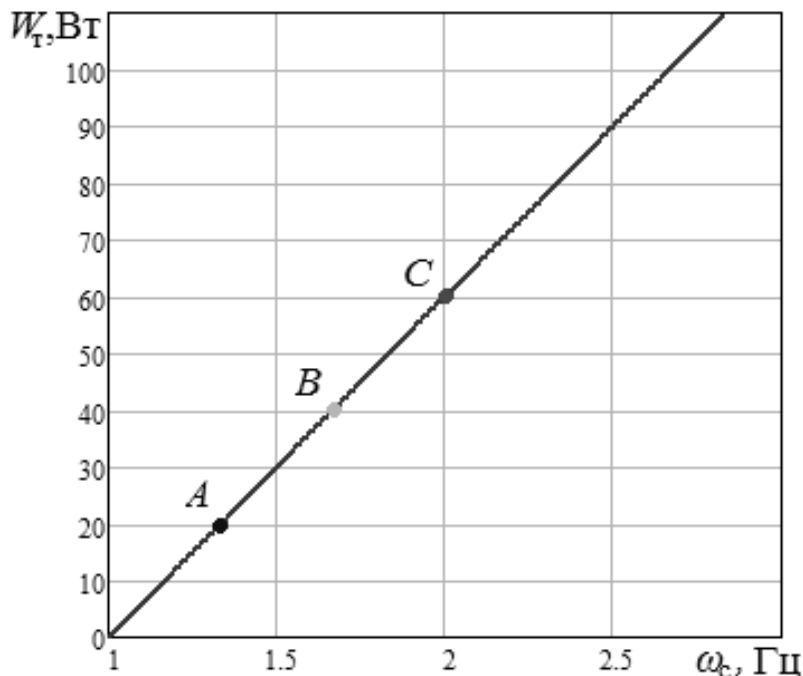


Рис.1. Механическая мощность, развиваемая организмом человека при выполнении физической работы.

$$W_T = 20|PMV|.$$

Основными средствами обеспечения микроклимата в помещениях судна являются системы вентиляции, отопления и кондиционирования воздуха. Наиболее функциональными являются системы судового микроклимата (ССМ). Для поддержания оперативной готовности оператора путем теплового воздействия на его организм возможно посредством изменения термодинамических параметров воздуха в помещении, обеспечивающих ССМ. В частности, регулирующим воздействием на температуру воздуха в помещении является температура приточного воздуха при стабилизации других параметров. В целях проверки возможности поддержания активности оператора, с помощью управления температурой приточного воздуха в помещении, следует разработать математическую модель ССМ и, используя математическую модель терморегуляции организма [2], позволяющей получить динамику энергетических характеристик (самочувствия), в зависимости от микроклиматических параметров внешней среды, провести имитационное моделирование эксперимента [1].

В систему дифференциальных уравнений (1) входят: математическая модель терморегуляции организма и теплообмена с окружающей средой, математическая модель процессов теплообмена в кондиционируемом помещении, уравнение динамики температуры приточного воздуха, составленное

на основании ПИ-закона управления и гармоничного характера изменения задания на АСР температуры воздуха в помещении.

$$\left\{ \begin{array}{l} c_{\text{я}} d(m_{\text{я}} t_{\text{я}}) = (M_{\text{я}} - Q_{\text{д}} - Q_{\text{об}}) d\tau, \\ c_{\text{к}} d(m_{\text{к}} t_{\text{об}}) = (Q_{\text{об}} + M_{\text{об}} - Q_{\text{об}}^{\text{в}} - Q_{\text{об}}^{\text{ол}}) d\tau, \\ c_{\text{од}} d(m_{\text{од}} t_{\text{од}}) = (Q_{\text{об}}^{\text{ол}} - Q_{\text{од}}^{\text{в}} - Q_{\text{од}}^{\text{н}}) d\tau, \\ c_{\text{р}} \rho_{\text{в}} V_{\text{п}} dt_{\text{п}} = (dQ_{\text{пр}} + dQ_{\text{вн}} + dQ_{\text{чел}} + dQ_{\text{огр}} - dQ_{\text{ух}}) d\tau, \\ \rho_{\text{в}} V_{\text{п}} dd_{\text{п}} = (dG_{\text{пр}} + dG_{\text{вн}} + dG_{\text{чел}} - dG_{\text{ух}}) d\tau, \\ dt_{\text{пр}} = \left[ \begin{array}{l} K_{\text{р}} \left( \frac{dt_{\text{п}}}{d\tau} - B \cdot \frac{\pi}{T} \cdot \cos \left( \frac{2\pi}{T} \tau + \frac{\pi}{2} \right) \right) + \\ + \frac{K_{\text{р}}}{T_{\text{и}}} \left( t_{\text{п}} - \left( t_{\text{н}} + \frac{B}{2} + \frac{B}{2} \sin \left( \frac{2\pi}{T} \cdot \tau + \frac{\pi}{2} \right) \right) \right) \right] d\tau, \end{array} \right. \quad (3)$$

где  $t_{\text{я}}, t_{\text{к}}, t_{\text{од}}$  - температура ядра, кожи и одежды;

$dQ_{\text{пр}} = I_{\text{пр}} G d\tau, dG_{\text{пр}} = d_{\text{пр}} G d\tau$  - количество теплоты и влаги, внесенных приточным воздухом за время  $d\tau$ ;

$dQ_{\text{ух}} = I_{\text{ух}} G d\tau, dG_{\text{ух}} = d_{\text{ух}} G d\tau$  - количество теплоты и влаги, удаляемых из помещения за время  $d\tau$ ;

$c_{\text{р}} \rho_{\text{в}} V_{\text{п}} dt_{\text{п}}, \rho_{\text{в}} V_{\text{п}} dd_{\text{п}}$  - изменение теплоты и влаги накапливаемых в помещении за время  $d\tau$

$t_{\text{пр}}$  - температура приточного воздуха;

$t_{\text{п}}$  - температура воздуха в кондиционируемом помещении;

$K_{\text{р}}$  - коэффициент усиления регулятора;

$T_{\text{и}}$  - время интегрирования;

$t_{\text{н}}$  - начальная (комфортная) температура в помещении;

$B$  - максимальный температурный градиент;

$T$  - заданный период колебаний температуры в помещении;

$t_{\text{н}} + \frac{B}{2} + \frac{B}{2} \sin \left( \frac{2\pi}{T} \cdot \tau + \frac{\pi}{2} \right)$  - задание на регулятор.

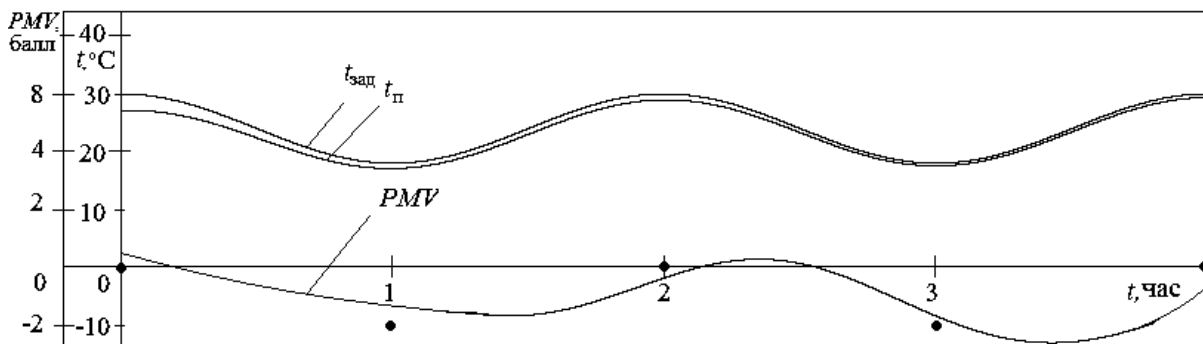


Рис.2. Результаты моделирования переходных процессов в ССМ, работающей в режиме «оперативная готовность». PMV- индекс тепловой нагрузки на организм человека по семизначной шкале;  $t_{\text{зад}}$  - задание на АСР температуры в кондиционируемом помещении;  $t_{\text{п}}$  - температура в помещении. Точками на графике обозначены результаты эксперимента [1].

Имитационное моделирование процессов в ССМ и терморегуляции человека (рис.2) было проведено для случая, когда максимальный дефицит тепла в помещении составлял  $12^{\circ}\text{C}$  и изменялся по синусоидальному закону с периодом 120 мин.

### **Выводы**

Результаты моделирования указывают на возможность не только применения динамического микроклимата в помещениях оператора с целью повышения его активности, а и на возможность создания системы управления ССМ, где регулируемым параметром будут выступать непосредственно тепловые ощущения человека и соответственно его активность. Относительная погрешность между результатом моделирования и экспериментом составляет от 8% до 20% в узловых точках, которая может быть вызвана как и допущениями принятыми в моделях так и технологией проведения эксперимента, а также нечеткостью оценки тепловых ощущений человека, основанные на шкале *PMV*. Концепция динамического микроклимата возник в 50-х годах, однако реализация данной ССМ вызывает ряд трудностей. Для создания динамического микроклимата в помещении система воздухоподготовки должна обладать достаточным быстродействием, со значительными диапазонами изменения регулирующего воздействия (температура либо расход приточного воздуха), необходимыми регулирующими органами и системой управления.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Голиков В.А. Способы повышения надежности операторов судовых эргатических систем / Голиков В.А., Капустин В.И. // Судовые энергетические установки. – 2010. – Вып. 25. – Одесса: ОНМА. – С. 49-60.
2. Голиков В.А. Математическое моделирование процессов теплообмена организма человека с окружающей средой / Голиков В.А., Бурденко А.Ф., Цюпко Ю.М. // Судовые энергетические установки. – 2003. – Вып. 8. – Одесса: ОНМА. – С. 104-115.
3. Голиков В.А. Научные основы управления микроклиматом судна / В.А.Голиков. – Одесса: ОГМА, 1999. – 321 с.