

Теплофизические свойства обитаемого помещения судна при нестационарных нагрузках

Канд. техн. наук В.В. ВЫЧУЖАНИН
Одесский национальный морской университет

With unsteady loads (variable outside air temperature and solar radiation) the temperatures in the berth depend on the thermophysical parameters of enclosing surfaces . In the calculation of thermophyscal parameters of enclosing surfaces, air velocities inside and outside the berth are usually considered as constant. However, they have a significant effect on thermal resistance of walls of the room with unsteady loads. Relevant relationships have been found indicating real values of thermal resistances, which should be taken into account in the development of the system of automatic control for air conditioning.

При нестационарных нагрузках (переменной температуре наружного воздуха и интенсивности солнечной радиации) температурные параметры помещения существенно зависят от теплофизических характеристик ограждающих поверхностей, в частности от термического сопротивления наружного ограждения, а также от коэффициентов теплоотдачи. Поэтому при проектировании и эксплуатации систем кондиционирования воздуха (СКВ) необходимо учитывать влияние аккумуляционной способности помещений судна при переходных тепловых процессах. Таким образом, теплоустойчивость ограждающих конструкций является одним из главных показателей, который влияет на стабильность заданного внутреннего комфорtnого режима помещения судна, а также на затраты энергии в СКВ.

Наружные ограждения помещения судна отличаются большими массой и коэффициентом термического сопротивления. Поэтому изменение тепловой нагрузки оказывает значительное влияние на «активную» величину его тепловой емкости [5]. Характер переноса тепла через конструкции многослойных ограждающих поверхностей определяется фазовым состоянием его слоев.

Ввиду незначительных разностей температур слоев, составляющих ограждение, перенос тепловой энергии излучением в помещение может не учитываться, тепловая энергия передается за счет конвекции и теплопроводности.

При разработке конструкций ограждающих поверхностей их теплофизические параметры определяются с учетом ряда факторов, в том числе с учетом подвижности внутреннего и наружного воздуха помещений. Однако значения скоростей воздуха в таких расчетах для выбранных материалов и толщин слоев ограждающих поверхностей считаются постоянными. В реальных условиях эксплуатации СКВ на судах значения скоростей

внутреннего воздуха (0,1...0,5 м/с и более) и наружного воздуха (до 30 м/с и более) непостоянны. В результате, как показывают проведенные исследования, действительные непостоянные значения термических сопротивлений теплопередачи и коэффициентов теплоотдачи ограждающих конструкций (со стороны борта и переборок) обитаемых помещений при нестационарных нагрузках значительно расходятся с принятыми при проектировании. В силу переменности термических сопротивлений ограждений помещений судна в условиях нестационарных нагрузок значительно увеличивается суточная амплитуда колебаний температуры воздуха в помещении. Для достоверного математического описания обитаемого помещения и решения задач, связанных с автоматизацией СКВ, необходимо определить реальные зависимости термических сопротивлений прежде всего от подвижности воздуха внутри обитаемого помещения, а также за бортом судна.

Термическое сопротивление теплопередачи через многослойное ограждение помещения без учета воздушной прослойки определяется по общезвестной формуле

$$R_{\text{огр.н}} = R_n + R_k + R_b = \frac{1}{\alpha_n} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_{n,i}}{\lambda_{n,i}} + \frac{1}{\alpha_b}, \quad (1)$$

где R_n – термическое сопротивление наружной поверхности ограждения;

R_k – термическое сопротивление различных структурных компонентов ограждения, $R_k = R_{\text{об}} + R_{\text{из}} + R_{\text{опл}}$, где $R_{\text{об}}$, $R_{\text{из}}$ и $R_{\text{опл}}$ – термическое сопротивление обшивки судна, изоляции и отделки помещений судна;

R_b – термическое сопротивление на внутренней поверхности ограждения;

α_n – коэффициент теплоотдачи от воздуха к наружной обшивке судна;

α_h – коэффициент теплоотдачи от внутренней обшивки к воздуху помещения;
 $\delta_{is}, \lambda_{is}$ – толщина и коэффициент теплопроводности слоя изоляции;
 i – номер слоя изоляции;
 n – количество слоев.

Выбор теплоизоляционного материала и его толщины для наружного ограждения с учетом конкретных условий эксплуатации судна должен обеспечивать расчетную величину теплового потока при минимальной общей массе. При расчетах термического сопротивления борта учитывались параметры часто используемой изоляции из фенольформальдегидного пенопласта в плитах с $\delta_{is} = 0,106$ м и $\lambda_{is} = 0,058$ Вт/(м·К). Как показывают исследования [2], увеличение теплоизоляционного слоя с 0,035 до 0,110 м приводит к снижению поступления тепла через обшивку в среднем на 18 %. В результате при увеличении толщины изоляции общая масса оборудования СКВ с ее ходильной установкой снижается примерно на 180 кг. Кроме того, снижается холодопроизводительность установки, что приводит к уменьшению расхода топлива на 15 %. Иногда [2, 6] в судовых изоляционных конструкциях оставляют воздушные прослойки в пределах 50...150 мм. Однако это должны быть только герметически закрытые прослойки. На судах же невозможно обеспечить полную герметичность воздушных прослоек из-за вибраций, деформаций корпуса и наличия различных деталей, прорезающих изоляцию (подвесок, труб и т.д.). То есть неизбежно продувание прослоек воздухом. Кроме того, увеличение толщины прослойки сверх 50 мм почти не повышает ее термического сопротивления [1]. Так как изоляционные свойства воздушной прослойки низки или практически отсутствуют, то в расчетах ее термическим сопротивлением часто пренебрегают. При проведении расчетов термическими сопротивлениями металлической обшивки корпуса R_{ob} и относительно тонкого слоя декоративной отделки R_{opt} помещения из-за их малой величины также можно пренебречь.

Зависимость термических сопротивлений от подвижности воздуха внутри обитаемого помещения и за бортом судна проявляется в коэффициентах теплоотдачи α_h и α_b , входящих в формулу (1).

Расчетные значения коэффициентов теплоотдачи для различных скоростей наружного и внутреннего воздуха

| $\omega_n, \text{м/с}$ | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 |
|---|--------|-------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|--------|--------|
| $\alpha_h, \text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ | 18,876 | 24,32 | 29,264 | 33,432 | 37,105 | 40,425 | 43,48 | 46,32 | 48,919 | 51,513 |
| $\omega_b, \text{м/с}$ | 0,1 | 0,15 | 0,2 | 0,25 | 0,3 | 0,35 | 0,4 | 0,45 | 0,5 | 0,55 |
| $\alpha_b, \text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К}), \text{при отрывных струях воздуха}$ | 2,131 | 2,433 | 2,945 | 3,265 | 3,559 | 3,825 | 4,071 | 4,3 | 4,517 | 4,722 |
| $\alpha_b, \text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К}), \text{при настильных струях воздуха}$ | 4,262 | 4,866 | 5,89 | 6,529 | 7,117 | 7,649 | 8,141 | 8,6 | 9,034 | 9,444 |

Коэффициент теплоотдачи от воздуха к наружной обшивке судна с учетом подвижности судна может быть определен по формуле

$$\alpha_h = \text{Re} c_f c_b \rho_b \omega_h, \quad (2)$$

где Re – коэффициент аналогии Рейнольдса;

c_f – коэффициент трения в пограничном слое воздуха;

c_b, ρ_b – соответственно удельная теплоемкость и плотность воздуха, обтекающего борт судна;

ω_h – скорость движения судна.

Коэффициент трения в пограничном слое воздуха согласно [1] определяется:

$$\text{для } 10^5 \leq \text{Re} \leq 10^7 \quad c_f = 0,0592 \text{ Re}^{-0.2};$$

$$\text{для } \text{Re} > 10^7 \quad c_f = 0,37 / (\lg \text{Re})^{2.584}.$$

Коэффициент теплоотдачи от внутреннего ограждения к воздуху в помещении с учетом [3] вычисляется следующим образом:

$$\alpha_b = (1...2) \{ 2,16 \cdot 10^5 F_0 \sqrt{(m/M)} / V \omega_b \}^{0.49}, \quad (3)$$

где 1 и 2 – коэффициенты соответственно при отрывных и настильных струях воздуха из каютного воздухораспределителя;

F_0 – площадь живого сечения выпускного отверстия каютного воздухораспределителя;

m – секундное поступление воздуха в помещение;

M – масса воздуха в помещении;

V – объем воздуха в помещении;

ω_b – средняя скорость воздуха, выходящего из воздухораспределителя.

Результаты расчетов значений коэффициентов теплоотдачи α_h и α_b по (2) и (3), приведенные в табл. I, в дальнейшем использовались при определении термических сопротивлений ограждающих конструкций помещений.

Из результатов расчетов следует, что при изменении скорости воздуха в помещении ω_b от 0,1 до 0,6 м/с термическое сопротивление борта $R_{opt,n}$ уменьшается в 1,24 раза в зависимости от воздухораспределения в помещении при незначительном влиянии скорости воздушного потока за бортом. При изменениях скорости воздуха, обтекающего наружную поверхность, ω_h от 2 до 30 м/с $R_{opt,n}$ уменьшается в 1,23 раза (в зависимости от скорости воздуха в помещении и способа воздухораспределения

Таблица I

ния). Наиболее существенно влияние изменения скорости воздушного потока за бортом на $R_{\text{опр},\text{н}}$ в диапазоне ее изменения от 2 до 14 м/с. Существенно влияет на термическое сопротивление теплопередаче толщина изоляции (возможные ее значения лежат в диапазоне от 0,1 до 0,5 м). Как следует из результатов расчетов, термическое сопротивление $R_{\text{опр},\text{н}}$ растет при увеличении $\delta_{\text{из}}$ в этих пределах в 4,76 раза.

Полученные расчетные значения термических сопротивлений ограждающих поверхностей каюты могут быть использованы для ослабления влияния окружающей среды на микроклимат воздушной среды помещения. Один из путей в этом направлении – возможность обоснованного выбора способа подачи и скорости воздуха в помещении в условиях нестационарной скорости воздуха за бортом судна при обоснованном выборе толщины изоляции борта. Переменный характер теплофизических параметров ограждающих конструкций должен учитываться и при разработке системы автоматического управления СКВ, а именно при определении ее постоянных времени, коэффициентов усиления, при определении переходного процесса в кондиционируемом помещении.

Для летних расчетных условий суточные изменения наружной температуры и интенсивности солнечной радиации (как составляющие нагрузки) следует рассматривать как нестационарные. Для описания их применим аппарат гармонического анализа.

Гармонические колебания температуры наружного воздуха вызывают периодические колебания тепловых потоков и температуры на поверхностях и в толщине ограждения. Поступая в помещение через ограждающие поверхности судна, они претерпевают следующие изменения: амплитуда гармоник уменьшается; увеличивается фазовый угол гармоники, период гармоники при этом не меняется. В результате в помещении также возникает близкое к гармоническому изменению температуры внутреннего воздуха [3].

В любой момент времени в течение летних суток гармонические колебания температуры наружного воздуха для обитаемого помещения судна можно описать выражением вида

$$t_{\text{н}}(T) = t_{\text{н,ср},\Sigma} + \sum_{i=1}^{\infty} A_{\text{нн},i} \cos[15i(\tau - \tau_{\text{t,max}}) - \varepsilon_{i,t}], \quad (4)$$

где $t_{\text{н,ср},\Sigma}$ – средняя суммарная температура наружного воздуха;

$A_{\text{нн},i}$ – амплитуда колебаний температуры наружного воздуха i -й гармоники;

τ – текущий час суток;

$\tau_{\text{t,max}}$ – час суток, когда температура наружного воздуха максимальна;

$\varepsilon_{i,t}$ – угол сдвига по фазе i -й гармоники температуры.

Бесконечные ряды суточных изменений температур наружного и внутреннего воздуха, представленные суммой гармонических колебаний (т.е. разложенные в ряд Фурье), можно, как и принято в инженерной практике

проектирования аналогичных систем, описывать основной гармоникой или первыми двумя (тремя) [4]. Тогда для расчетных летних суток гармонические колебания температур наружного и внутреннего воздуха с учетом нестационарного характера поступления тепла в помещение следует представить в виде следующих гармонических рядов:

$$\begin{aligned} t_{\text{н}}(T) = & t_{\text{н,ср},\Sigma} + A_{\text{нн},1} \cos[15(\tau - \tau_{\text{нн}}) - \varepsilon_{\text{нн},1}] + \\ & + A_{\text{нн},2} \cos[30(\tau - \tau_{\text{нн}}) - \varepsilon_{\text{нн},2}]; \\ t_{\text{y,2}}(T) = & t_{\text{y,ср},\Sigma} + [A_{\text{нн},1} \cos[15(\tau - \tau_{\text{нн}}) - \varepsilon_{\text{нн},1} - \varepsilon_{\text{1н}}]]/v_{\text{опр},1} + \\ & + [A_{\text{нн},2} \cos[30(\tau - \tau_{\text{нн}}) - \varepsilon_{\text{нн},2} - \varepsilon_{\text{2н}}]]/v_{\text{опр},2} + \\ & + [A_{\text{q1}} \varepsilon/(\alpha_{\text{н}} v_{\text{опр},1})] \cos[15(\tau - \tau_{\text{q}}) - \varepsilon_{\text{q1}} - \varepsilon_{\text{1н}}] + \\ & + [A_{\text{q2}} \varepsilon/(\alpha_{\text{н}} v_{\text{опр},2})] \cos[30(\tau - \tau_{\text{q}}) - \varepsilon_{\text{q2}} - \varepsilon_{\text{2н}}] + \\ & + [A_{\text{нн},1} \cos[15(\tau - \tau_{\text{нн}}) - \varepsilon_{\text{нн},1} - \varepsilon_{\text{1н}}]]/v_{\text{ост},1} + \\ & + [A_{\text{нн},2} \cos[30(\tau - \tau_{\text{нн}}) - \varepsilon_{\text{нн},2} - \varepsilon_{\text{2н}}]]/v_{\text{ост},2} + \\ & + A_{\text{q1}} \beta_s \cos[15(\tau - \tau_{\text{q}}) - \varepsilon_{\text{q1}} - \varepsilon_{\text{1н}}] + \\ & + A_{\text{q2}} \beta_s \cos[30(\tau - \tau_{\text{q}}) - \varepsilon_{\text{q2}} - \varepsilon_{\text{2н}}] + \\ & + [A_{\text{k1}} \cos[15(\tau - \tau_{\text{t,max}}) - \varepsilon_{\text{t1}} - \varepsilon_{\text{1н}}]]/v'_{\text{опр},1} + \\ & + [A_{\text{k2}} \cos[30(\tau - \tau_{\text{t,max}}) - \varepsilon_{\text{t2}} - \varepsilon_{\text{2н}}]]/v'_{\text{опр},2}, \end{aligned} \quad (5)$$

где $t_{\text{y,ср},\Sigma}$ – средняя суммарная температура воздуха в помещении с учетом наружной температуры, солнечной радиации через наружные ограждения;

A_{qi} – амплитуда i -й гармоники изменения интенсивности солнечной радиации;

A_{ki} – амплитуда i -й гармоники колебания температуры поверхности ограждения переборки под действием колебаний температуры наружного воздуха;

$v_{\text{опр},i}$ – коэффициент затухания i -й гармоники температурных колебаний в ограждении,

$$v_{\text{опр},i} = 2^{e_{i,\text{н}}} \left(0,83i + \frac{3,49R_{\text{опр}}}{\varepsilon_{i,\text{н}}} \right), \quad \varepsilon_{i,\text{н}} = \sum_{i=1}^m R_i S_i,$$

$R_{\text{опр}}$ – термическое сопротивление теплопередачи наружного ограждения;

R_i – термическое сопротивление i -го слоя однородной ограждающей конструкции;

S_i – расчетный коэффициент теплоусвоения материалов i -го слоя ограждения конструкции;

m – число слоев ограждающей конструкции;

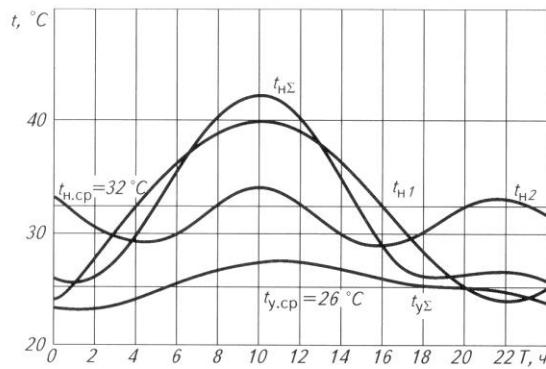
$\varepsilon_{i,\text{н}}, \varepsilon_{qi}$ – запаздывание температурных колебаний и интенсивности солнечной радиации i -й гармоники;

$v_{\text{ост},i}$ – коэффициент затухания i -й гармоники температурных колебаний в остеклении иллюминатора;

β_s – коэффициент, зависящий от прозрачности стекол, наличия штор и т. д.

Коэффициент затухания i -й гармоники температурных колебаний в ограждении $v_{\text{опр},i}$ определяется с учетом термического сопротивления теплопередачи наружного ограждения $R_{\text{опр}}$, термического сопротивление i -го слоя однородной ограждающей конструкции R_i , зависящих согласно (1), (2) и (3) от подвижности воздуха и способа воздухораспределения.

Знание закономерности изменения температуры воздуха в помещении при гармонических колебаниях температуры наружного воздуха (5) позволяет обосновать



Изменение температур наружного воздуха $t_{H\Sigma}$ и воздуха в помещении $t_{y\Sigma}$ для условий $t_{H, cp} = 32^{\circ}\text{C}$ (индексы 1 и 2 – первая и вторая гармоники; Σ – результирующая температура)

расчетную температуру наружного воздуха $t_{H, \text{ср.расч.}}$. В качестве примера на рисунке показаны полученные по результатам расчетов графики гармонических функций, отражающие закономерности изменения во времени наружной t_H и внутренней $t_{y\Sigma}$ температур для наиболее напряженного в тепловом отношении режима при $t_{H, \text{ср.}} = 32^{\circ}\text{C}$. При проведении расчетов использовались расчетные значения амплитудных значений колебаний интенсивности солнечной радиации и температуры наружного воздуха: $A_{q1} = 300 \text{ Bt/m}^2$; $A_{q2} = 124 \text{ Bt/m}^2$; $A_{n1} = 8,04^{\circ}\text{C}$;

$A_{n2} = 3,05^{\circ}\text{C}$. При этом в расчетах учитывались переменные коэффициенты теплоотдачи, зависящие от скоростей потока воздуха, обтекающего борт, и скорости воздуха в самом помещении. Для обоснованно выбранной величины расчетной температуры наружного воздуха $t_{H, \text{ср.расч.}}$, учитывая закономерности нестационарных нагрузок кондиционируемого помещения судна, были получены представленные в табл. 2 результаты. При проведении расчетов температура наружного воздуха выбиралась не по максимуму, а по предложенной формуле (5) с учетом периодического характера изменения температуры и интенсивности солнечной радиации, что позволяет уменьшить расчетную величину температуры наружного воздуха. Представленные в табл. 2 результаты сравнивались с расчетными данными, полученными с использованием применяемого стандарта [5] для $t_H = 32^{\circ}\text{C}$. Из сопоставления следует, что учет в расчетах нестационарного характера изменения нагрузки на помещение позволяет использовать более экономичную СКВ.

Таким образом, если в помещение периодически поступает тепло от солнечного излучения и изменения температуры наружного воздуха, то возникают колебания внутренней температуры около среднесуточного значения. Как следует из полученных закономерностей, кривые изменений $t_{H\Sigma}(T)$ и $t_{y\Sigma}(T)$ близки к синусоидальным,

Таблица 2

Результаты расчетов теплопоступлений и расхода приточного воздуха в кондиционируемые помещения

| Характеристики | Формула | Расчетное значение параметра | |
|--|--|------------------------------|---|
| | | по стандарту [5] | с использова- нием предложен- ной формулы (5) |
| Теплопритоки через борт, Вт | $Q_{\text{орп}} = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n F_{\text{орп},i} (t_{H, \text{расч.}} - t_y)$ | 85,3 | 43,8 |
| Теплопритоки через иллюминатор, Вт | $Q_{\text{ил}} = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n F_{\text{ил},i} (t_{H, \text{расч.}} - t_y)$ | 11,8 | 11,8 |
| Теплопритоки от солнечной радиации через иллюминатор, Вт | $Q_{\text{ил.р}} = 10^{-3} \sum_{i=1}^n F_{\text{ил}} (q_{\text{н}} \varepsilon \tau F_{\text{ил}})$ | 93,8 | 25,1 |
| Тепловыделение от людей, Вт | $Q_{\text{л}} = 10^{-3} n q_{\text{я.л}}$ | 57,5 | 57,5 |
| Общее количество тепла, Вт | $Q_{\Sigma} = Q_{\text{орп}} + Q_{\text{ил}} + Q_{\text{ил.р}} + Q_{\text{л}}$ | 248,4 | 137,2 |
| Расход приточного воздуха в помещение, $\text{м}^3/\text{с}$ | $V = 3,16 Q_{\Sigma} c_{\text{в}} \gamma_{\text{в}} (t_y - t_{\text{н}})$ | 0,094 | 0,061 |

к_i – коэффициент теплопередачи i-й поверхности ограждения; $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$;
 $F_{\text{орп},i}$ – площадь i-й поверхности ограждения, м^2 ;
 $q_{\text{н}}$ – плотность солнечной радиации, $\text{Вт}/\text{м}^2$;
 τ – коэффициент пропускания солнечной радиации;
 n – число людей в помещении;
 $q_{\text{я.л}}$ – теплопритоки от одного человека, $\text{Вт}/\text{чел.}$;
 $c_{\text{в}}$ – теплоемкость воздуха, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$;
 $\gamma_{\text{в}}$ – удельная масса воздуха, $\text{кг}/\text{м}^3$;
 $t_{\text{н}}$ – температура приточного воздуха, $^{\circ}\text{C}$.

поэтому соответствующие гармонические ряды определения этих параметров быстро сходятся.

Предлагаемая методика, исходящая из результатов гармонического анализа температурных параметров и определенных средних значений температурных параметров, позволяет проверять, насколько температура воздуха в помещении превышает заданную температуру. Амплитудные значения колебаний температуры внутреннего воздуха в помещении следует сравнивать с регламентной величиной (1...2 К или $\pm 1^{\circ}\text{C}$). Как следует из рисунка, наибольшее отклонение температуры воздуха в помещении от среднего значения $t_{y,cr} = 26^{\circ}\text{C}$ не превышает допустимых пределов и составляет 1 $^{\circ}\text{C}$. По времени это изменение соответствует $[(18 - 9)/24] \cdot 100\% = 37\%$, что не противоречит нормативным требованиям. Средние значения температурных параметров рекомендуется использовать как исходные при проектировании и эксплуатации СКВ для определения объема кондиционируемого воздуха, количества тепла и холода при воздухообработке в системе.

Определение и поддержание необходимой скорости воздуха в помещении, обеспечивающей оптимальные значения термических сопротивлений теплопередачи ограждающих поверхностей, возможно с помощью системы автоматического управления СКВ.

Принятый гармонический закон изменения наружной температуры позволяет учесть нестационарный характер

нагрузки во времени от наружной температуры и интенсивности солнечной радиации.

Так как при нестационарной нагрузке возникают колебания внутренней температуры около среднесуточного значения, то установленные нормами максимальные и минимальные значения внутренней температуры не должны использоваться как исходные при проектировании и эксплуатации СКВ (для определения объема кондиционируемого воздуха, количества тепла и холода при воздухообработке в системе).

Список литературы

1. Кутателадзе С.С., Боршинский В.М. Справочник по теплопередаче. – М.: Госэнергоиздат, 1958.
2. Несторов Ю.Ф. Теория и расчет судовой тепловой изоляции – Л.: Судостроение , 1973.
3. Сотников А.Г. Системы кондиционирования и вентиляции с переменным расходом воздуха. – Л.: Стройиздат, 1984.
4. Шкловер А.М. Теплопередача периодических тепловых воздействий. – М.;Л.: Госэнергоиздат, 1961.
5. ISO 7547:2002. Ships and marine technology – Air-conditioning and ventilation of accommodation spaces – Design conditions and basis of calculations.
6. Wong H.Y. Handbook of Essential Formulae and Data of Heat Transfer for Engineers, Longman London and New York, 1972.