

**МИКОЛАЇВСЬКИЙ  
ОРДЕНА ТРУДОВОГО ЧЕРВОНОГО ПРАПОРА  
КОРАБЛЕБУДІВНИЙ ІНСТИТУТ  
імені адмірала С. О. Макарова**

На правах рукопису

УДК 629 5.048.3

**ЕЛЬГАРТ Яків Леонідович**

**СУДНОВІ СИСТЕМИ КОНДИЦІОНУВАННЯ ПОВІТРЯ  
З ТЕПЛОВИДІЛЯЮЧИМИ ПАНЕЛЯМИ НА ОСНОВІ  
ЕЛЕКТРОНАГРІВАЧІВ З ПОВЕРХНЕВОРОЗПОДІЛЕНИМ  
ВИДІЛЕННЯМ ТЕПЛА**

05.08.05—Суднові енергетичні установки та їх  
елементи (головні та допоміжні)

**А в т о р е ф е р а т**  
дисертації на здобуття вченого ступеня  
кандидата технічних наук

Миколаїв — 1994



00756573 (X)

Роботу виконано в Миколаївському ордена Трудового Червоного Прапора кораблебудівному інституті ім. адмірала С.О.Макарова, на кафедрі кондиціонування і рефрієрації.

- Науковий керівник - Заслужений діяч науки України  
доктор технічних наук  
професор Ю.В.Захаров  
академік АТК
- Офіційні опоненти - доктор технічних наук  
С.С.Рижков  
- кандидат технічних наук  
В.І.Льберський

Провідна організація - Центральний науково-дослідний та проектний інститут "Тайфун", м. Миколаїв.

Захист відбудеться " 28 " червня 1994 р. о 12 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д.053.04.01 при Миколаївському кораблебудівельному інституті за адресою: 327025 м. Миколаїв, пр. Героїв Сталінграду 9, МКІ

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Інституту

Автореферат розісланий " 27 " травня 1994 р.

Вчений секретар  
Спеціалізованої ради

*Квасниця*  
доктор технічних наук  
професор В.Ф.Квасниця  
академік АН

ЛНБ ім. В. Стефаніка  
АН України

### ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність проблеми. Важливим завданням у створенні сучасних суден, які б відповідали світовому рівню, є забезпечення їх якнайкращої придатності для праці та життя. На умови праці та життя судових екіпажів впливають такі несприятливі фактори, як малі габарити приміщень, наявність крону, хитавиці, вібрацій, часта зміна кліматичних умов. При виконанні робіт, особливо зі значними фізичними і психологічними навантаженнями, вирішального значення набуває якість мікроклімату судових приміщень, як один з найважливіших фізичних чинників придатності суден для життя та праці.

Мікроклімат житлових, службових судових приміщень та робочих місць визначається в основному температурою, вологістю та швидкістю руху повітря, а також середньою радіаційною температурою огорожень. Залежно від значень цих параметрів, нормованих Санітарними правилами, формуються теплові відчуття людини, що визначають стан теплового комфорту.

Для забезпечення відповідних теплових умов, в судових приміщеннях, підтримки в них необхідної якості повітря, можливості розміщення значної кількості людей у відносно невеликих об'ємах, тобто підтримання на належному рівні здоров'я та працездатності судових екіпажів, створено багато різноманітних типів систем кондиціонування повітря (СКП).

При проєктуванні судових СКП приймають різні технічні рішення, що враховують специфіку приміщень, обслуговуваних цими системами - від застосування зональних нагрівачів повітря, розміщення автономних кондиціонерів, що здійснюють повну тепловологісну обробку повітря в режимах нагріву та охолодження. При цьому також прагнуть до скорочення площ судових приміщень, зайнятих обладнанням СКП, естетичного узгодження елементів СКП з інтер'єром приміщень, забезпечення мінімального часу на монтаж, випробування, налаштування систем, звуко- та віброізоляції обладнання, легкості переключення режимів, якнайбільших діапазонів індивідуального регулювання параметрів, тощо. Одні з основних вимог до СКП - ефективність використання, економія енергії та висока надійність.

Перспективним напрямом комплексного вирішення цих завдань в створення СКП нового для суднобудування типу, в яких використовують тепловідділяючі панелі з електронагрівачами з поверхневорозподіленим виділенням тепла (ЕПРВТ). Прототипом таких систем можуть бути відомі з практики цивільного будівництва системи панельно-променевого обігріву, що використовують такі носії тепла, як гаряча вода та пара.

Існує цілий ряд переваг, що підкреслюють бажаність використання такого способу обігріву. Наприклад, температура повітря в приміщенні по вертикалі в цьому випадку змінюється більш рівномірно і тепловий комфорт встановлюється при температурі приблизно на 2<sup>0</sup>С вищою, ніж при використанні конвективного обігріву. Внаслідок цього економія теплової енергії може досягати 20-30 % у порівнянні з конвективним обігрівом. Пристрої для променевого обігріву не займають корисної площі приміщення.

Застосування систем променевого обігріву в суднових приміщеннях має також позитивно відбитися на стані теплової ізоляції корпусу судна необмеженого району плавання, оскільки теплові потоки з тильних сторін панелей призведуть до підвищення температури ізоляції зовнішнього борту та запобігатимуть її відпотіванню, промерзанню та пошкодженню.

Ще однією перевагою таких систем слід вважати скорочення трудомісткості монтажу, оскільки встановлення обігрівачих панелей може провадитись на більш ранній стадії побудови судна, коли формують суднові приміщення.

В зв'язку зі сказаним вище, проведення комплексних досліджень можливості побудови ефективних суднових СКП на основі ЕПРВТ, є досить актуальним та практично важливим.

Мета роботи. Створення наукових та методичних основ, а також елементів технічного забезпечення для побудови нового типу суднових систем кондиціонування повітря з тепловідділяючими панелями на базі електронагрівачів з поверхневорозподіленим виділенням тепла.

Наукова новизна. Вперше запропоновано новий тип суднових СКП з ЕПРВТ, показано їх техніко-економічну ефективність.

На основі теорії променевого теплообміну розроблено математичну модель СКП з тепловідділяючими панелями з ЕПРВТ, а також побудовано фізичну модель цієї системи.

Створено методику розрахунку та проектування суднової СКП з ЕПРВТ і виконано експериментальні дослідження тепловіддільючих панелей з ЕПРВТ та суднової СКП на їх основі, що підтвердили основні теоретичні висновки.

На захист виносяться:

1. Доведення можливості застосування панельно-променевого обігріву для створення ефективних суднових СКП з ЕПРВТ.

2. Розроблено на основі теорії променевого теплообміну метод розрахунку теплообміну суднового приміщення, обладнаного тепловіддільючими панелями з ЕПРВТ, та математичну модель суднової СКП з ЕПРВТ.

3. Інженерні методику розрахунку та проектування суднових СКП з ЕПРВТ.

4. Принципові конструкції та технології виготовлення електронагрівачів і тепловіддільючих панелей з ЕПРВТ, а також створення на їх основі типорядів вказаних виробів.

5. Результати експериментальних досліджень розроблених електронагрівачів та тепловіддільючих панелей з ЕПРВТ, що показали їх відповідність вимогам, щодо до суднового електротермічного обладнання.

6. Результати порівняльних випробувань традиційної суднової СКП з кількісним регулюванням та СКП, у якій використано панелі з ЕПРВТ, що підтвердили основні теоретичні положення роботи та показали можливість, доцільність, ефективність та переваги СКП з ЕПРВТ.

Практична цінність роботи. Запропонований, розроблений та досліджений новий тип СКП з ЕПРВТ дає змогу підтримувати в суднових приміщеннях високий рівень теплового комфорту, забезпечує економів енергії, високий ступінь автоматизації, економів корисного об'єму приміщення, дозволяє уникнути пошкодження ізоляції корпусу судна внаслідок промерзання, дає можливість виключити допоміжні системи обігріву, прилади і труби яких розташовані в кожному судовому приміщенні, наприклад, у випадку комбінованих СКП.

Запропоновані методи розрахунку та розроблені на їх основі інженерні методику розрахунку і проектування СКП з ЕПРВТ дають змогу вести практичну розробку подібних систем для суден різних класів та призначень.

Застосування СКП з панелями з ЕПРВТ в практиці суднобудування може бути здійснено без значних капіталовкладень та зміни технології будівництва суден, а виробництво тканих електронагрівачів та тепловідділяючих панелей з ЕПРВТ на їх основі може бути освоєно на серійному обладнанні.

Впровадження: З використанням електронагрівачів з ПРВТ, за конструкцією та технологією розробленими у даній роботі, на Херсонському суднобудівному заводі за кресленнями ЦКБ "Лонінська кузня" було виготовлено дослідну партію тепловідділяючих панелей з ЕПРВТ шести різних типів.

За матеріалами дисертаційної роботи в ЦКБ "Чорноморсуднопроект" було спроектовано СКП з ЕПРВТ, яку згодом було змонтовано на арктичному криголамі проекту ІОБЗІ, побудованому на Херсонському суднобудівному заводі.

Результати натурних випробувань, проведених в процесі ходових випробувань судна, повністю підтвердили правильність теоретичних положень, проектних та конструкторських рішень, а також безпечність та економічність систем такого типу.

#### Особистий внесок автора:

- запропоновано та досліджено новий тип суднових СКП з ЕПРВТ, показано їх техніко-економічну ефективність;
- розроблено конструкції двох типів тканих електронагрівачів з поверхневорозподіленим виділенням тепла (а.с.№ І585405), і на їх базі типоряд тепловідділяючих панелей (а.с.І548І07);
- на основі теорії променевого теплообміну, адаптованої автором для розрахунку теплообміну суднового приміщення, обладнаного тепловідділяючими панелями ЕПРВТ, створено інженерну методику та розроблено програму такого розрахунку на ПЕОМ.
- під керівництвом і при безпосередній участі автора, проведено експериментальні дослідження тепловідділяючих панелей з ЕПРВТ, як тепло і електротехнічних виробів, та елементів обладнання суднових приміщень;
- проведено комплексні випробування СКП з панелями ЕПРВТ та її порівняння з традиційною одноканальною СКП з кількісними регулюваннями;
- автором узагальнені результати теоретичних та експериментальних досліджень, а також створено методику проектування суднових СКП з ЕПРВТ;

- під керівництвом і при безпосередній участі автора в ЦКБ "Чорноморсуднопроект" спроектовано СКП з ЕПРВТ для арктичного криголаму проекту ІС62І, яку згодом було виготовлено і змонтовано в період будівництва судна, на Херсонському суднобудівному заводі;

- СКП з ЕПРВТ була випробувана автором в процесі ходових випробувань судна.

Апробація роботи: Основні положення роботи доповідались на науково-технічному семінарі "Судотеплотехніка" (м. Севастополь, 1991, 1992 рр.) на VIII Всесоюзному, IX Міжнародному семінарах молодих вчених та спеціалістів "Сучасні проблеми газодинаміки та тепломасообміну і шляхи підвищення ефективності енергетичних установок" (м. Москва, 1991, 1993 рр.), на конференціях "Нові прогресивні матеріали для тепловідділяючих та теплообмінних пристроїв технічного та побутового призначення" (м. Київ, 1989 р.), "Енергозберігаючі електронагрівальні пристрої на основі композиційних резистивних матеріалів" (м. Київ, 1992 р.). Розроблені технічні засоби для судових СКП захищено авторськими свідоцтвами № І548І07, І585405.

Публікації: За матеріалами дисертації опубліковано 9 робіт.

Структура та обсяг дисертації: Дисертація включає в себе вступ, п'ять розділів, висновок, список літератури з 130 найменувань, десять додатків. Матеріал дисертації викладено на 155 сторінках друкованого тексту, він містить 52 рисунки, 13 таблиць. Загальний обсяг роботи 404 сторінки.

#### ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У 1<sup>му</sup> розділі дисертації проведено аналіз сучасного стану і перспектив розвитку судових систем кондиціонування повітря, на основі якого показана доцільність використання в судових СКП панельно - променевого обігріву, оцінена його техніко-економічна ефективність та сформульовані цілі та завдання досліджень і розробок.

Аналіз різних типів СКП та систем опалення (СО) свідчить, що для вирішення проблеми підвищення комфортності умов життя екіпажів судон та енергозберігання необхідно створення та налагодження сорійного виробництва судового енергозберігаючого обладнання та його широке використання в судових системах мікроклімату. При розробці таких систем важливо визначити оптимальний розмір

теплоізоляції корпусу судна, а також на основі техніко-економічного аналізу обрати найбільш прийнятні для даного судна СКП та СО. У зв'язку з цим виникає потреба удосконалення та розробки нових енергозберігаючих моделей кондиціонерів та обігрівачого обладнання, які б забезпечили б надійну та високоєфективну роботу в широкому діапазоні теплових навантажень, відрізнялися б малими габаритами та масою, надавали б користувачу широкі можливості вибору обладнання, розробки сучасних схем СКП.

Підвищення комфортності СКП на судах вітчизняного та зарубіжного будівництва досягається за рахунок децентралізації систем і розвитку засобів індивідуального регулювання, а підвищення економічності -- за рахунок раціонального використання та економії енергії, виключаючи використання її нетрадиційних джерел, а також вторинного використання теплової енергії.

Одним з перспективних напрямів удосконалення суднових СКП є використання у їхньому складі систем панельно-променевого обігріву. СКП, що обладнані за таким типом, матимуть ряд переваг на відміну від традиційних серед яких слід згадати порівняно швидку зміну та автоматичне регулювання теплових умов, а також високий рівень теплового комфорту в суднових приміщеннях. Можна очікувати також кращого збереження теплової ізоляції корпусу судна та зменшення втрат у трубопроводах в режимі нагріву.

Оскільки електрична енергія є найбільш зручним та екологічно чистим видом енергії, саме її слід застосовувати у суднових системах кондиціонування повітря з тепловиділяючими панелями. Для реалізації поставленого завдання перспективними є електронагрівачі з поверхневорозподіленим виділенням тепла.

Проведений порівняльний техніко-економічний аналіз традиційних СКП та СКП, що обладнані тепловиділяючими панелями з ЕПРВТ, для риболовецьких суден проєктів 05025 та І3030 показав, що використання СКП з ЕПРВТ зумовило економії теплової енергії в зимовому режимі, а отже, значну економію палива, яке витрачається на нагрівання повітря (для проєкту 05025 - 13,7 т на рік, для проєкту І3030 - 17,4 т на рік).

У 2 розділі розглянуто різні типи резистивних перетворювачів електричної енергії в теплову, що застосовуються в сучасному судновому електротермічному обладнанні (ЕТО), зазначено їх позитивні якості та недоліки, показано перспективність застосування в судовому ЕТО таких нагрівачів, розроблено

конструкції та технології виготовлення нагрівальних тканин і тепловідділяючих панелей на їх основі.

Для багатьох типів суднового ЕТО потрібне рівномірно розподілене виділення тепла на порівняно великій площі, часто при відносно низьких температурах (до  $250^{\circ}\text{C}$ ). Крім того, до нагрівальних пристроїв можуть ставитися інші додаткові вимоги (наприклад, мала товщина, гнучкість і т.ін.), які можливо реалізувати за допомогою елементів суднового ЕТО, що застосовуються нині.

У зв'язку з цим все дедалі більшого розвитку набувають дослідження та розробки інших видів нагрівальних пристроїв, що використовуються в новій області нагріву - поверхнево-резистивному електронагріву.

Під поверхневим електронагрівом розуміють резистивний електронагрів, що здійснюється за рахунок тепла, виділеного при протіканні струму в провіднику, який за визначеним законом розташований на поверхні об'єкту, що нагрівається. При цьому об'єкт може мати практично будь-яку форму.

Залежно від вимог об'єктів нагріву, створено велику кількість типів нагрівальних пристроїв, які використовують нагрівачі з поверхневорозподіленим виділенням тепла (ПРВТ). У роботі наведено класифікацію електронагрівачів в залежності від конструкції, матеріалу, способу з'єднання з об'єктом, тощо. В загальному випадку такий нагрівач включає в себе нагрівальний елемент з резистивного матеріалу та діелектричні шари, що забезпечують електричну ізоляцію окремих частин нагрівального елемента між собою, від об'єкта нагріву та від зовнішнього середовища.

Найширшого застосування в техніці промислового та побутового електрообігріву набули текстильні, зокрема, ткани електронагрівачі, на основі яких розроблений та випускається промисловістю широкий асортимент електронагрівальних пристроїв.

Тканий електронагрівач являє собою відрізок тканини або стрічки, виготовленої з ізоляційних та струмопровідних ниток. За нагрівальний елемент править дріт з різних металів та їх сплавів, а за ізоляцію основу - різноманітні теплостійкі матеріали: скляні, базальтові, кремнеземні та інші волокна, а при низьких температурах нагріву (до  $420\text{ K}$ ) - різні натуральні та штучні волокна.

Ткані електронагрівачі в технологічних у виробництві та при монтажі, відзначаються низькою матеріаломісткістю, не потребують дефіцитних матеріалів, мають високу механічну міцність, характеризуються стабільністю параметрів, забезпечують рівномірний нагрів мають широкий діапазон питомих потужностей, напруг живлення та робочих температур. Завдяки цьому вони є найбільш перспективні для застосування в судювих СКП на основі панелей з ЕПРВТ. Нині налагоджено промисловий випуск нагрівальної тканини ЕТТС-УХЛ4, що використовується для виготовлення побутових електрогрілок, проте її структура є такою, що дві уточни нагрівального елемента розташовані поряд та ізольовані одна від одної тільки нитками основи, що порохресуються між собою. Необхідно відстань між попарно розташованими нитками струмопровідного утоку досягається за допомогою ниток заповнювального утоку, кількість яких завжди є парною. Таке розташування уточни нагрівального елемента призводить до нерівномірності нагріву на великій площі та не виключає можливості замикання сусідніх струмопровідних ниток, а отже, не може забезпечити вимог, що до надійності та електробезпеки судювого ЕТО.

Завдання по створенню тканого нагрівача для судювих тепловідляччих панелей з ЕПРВТ, що відповідав би всім вимогам, які ставляться до судювого ЕТО, було успішно розв'язане шляхом виготовлення нагрівальної тканини "книжок" на серійних автоматичних двочовникових ткацьких верстатах АТЗ-60-ЛБ.

Тканина виробляється з поліфірних комплексних ниток лінійної щільності III текс, з кручених термофіксованих поліфірних комплексних ниток структури III текс x 2 або адгезійних поліфірних комплексних ниток з малю усадков структури III текс x 2. За струмопровідний уток прапуть ніхромовий провід марки ХЗОНВО або ХЗОНВО-П.

Ткацтво "книжок" у два рази зменшує продуктивність ткацького верстата та ускладнює технологічний процес. Проте саме такий спосіб було обрано при виготовленні тканини для судювих панелей з ЕПРВТ, оскільки він дає змогу створити тканину, що відповідає висунутим до неї жорстким вимогам щодо рівномірності нагріву та надійності.

На один з варіантів такої тканини було отримано авторське свідоцтво. Для зазначеної тканини розроблено технологічний режим її виготовлення, технічні умови ТУ І7-04015249-89 програма та

методика випробувань. Результати випробувань показали відповідність фізико-механічних та електричних характеристик тканини технічному завданню.

Було також виготовлено електронагрівальну тканину, в якій резистивним елементом був ніхромовий провід у фторопластовій оболонці. Така тканина витримує без пробою напругу близька 7000 В і, таким чином, забезпечує високий рівень електробезпеки.

Розроблено методику розрахунку структурних параметрів нагрівальної тканини. Питома потужність секційного нагрівача визначалась в виразі:

$$P^* = \frac{U^2}{\rho^* l_c^2 \left[ 1 + \left( 1 + \frac{\alpha}{100} \right) \Pi_{н.а.} b_a \right]} \quad (I)$$

де  $l_c$  - довжина нагрівальної секції (відстань по довжині нагрівача від точки контакту нагрівального елемента з однією струмоносучою шиною до точки контакту його з іншою струмоконесучою шиною), см;

$b_a$  - ширина активної частини, см.

$\rho$  - питомий електричний опір нагрівального елемента, Ом/м;

$U$  - робоча напруга, В;

$\alpha$  - уривітка нагрівального елемента, %;

$\Pi_{н.а.}$  - щільність нагрівального елемента, см<sup>-1</sup>.

Одержані в результаті розрахунку технічні характеристики нагрівальних тканин наведено в таблиці I.

Таблиця I.

Характеристика тканини	чисельні значення для панелей	
	підножочних	стінових
I	2	3
Число ниток на 10 см		
по основі	110 ± 2	
по утку	90 ± 2	60 ± 2
Число струмопровідних ниток на 10 см	не менше 15	
Необхідна ширина тканини, мм		
загальна	500 ± 5	
активна	470 ± 5	
Прийнята ширина пруту, мм	10 ± 1 і 20 ± 1	
Довжина секцій, мм		

Продовження таблиці І.

I	2	3
загальна	$200 \pm 5$	$150 \pm 5$
активна	$180 \pm 5$	$130 \pm 5$
Число ниток в основі	520	520
Опір секції, Ом	$3300 \pm 200$	$1600 \pm 200$

Запропоновані нагрівальні тканини стали основою для створення тепловідляючих панелей з поверхневорозподіленим виділенням тепла для суднових СКП, для яких розроблено технологічний режим виготовлення і технічні умови ТУ МЛТИ 0665148-90. Суднову зашивку з тепловідляючих панелей захищено авторським свідоцтвом.

Панелі з ЕПРВТ в композитній конструкції, що складається з оболонки з прикріпленим нагрівальним пакетом, а також теплоізоляційним матеріалом. Улаштування панелі зображено на рис І.

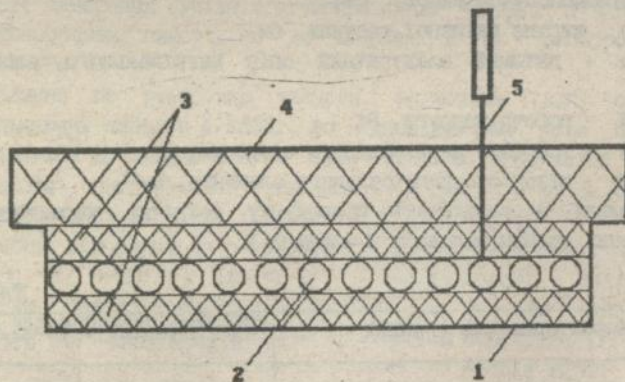


Рис І. Улаштування тепловідляючої панелі

І - металопластикові оболонка; 2 - електронагрівальна тканина;  
3 - електроізоляційні пари; 4 - теплова ізоляція; 5 - кабель

При використанні в тепловіддільних панелях електро-нагрівальної тканини з резистивним елементом у фторопластовій ізоляції потреба у електроізоляційних шарах відпадає, що до суттєво спрощує технологію та знижує трудомісткість. Тому зазначений спосіб має стати основним при масовому виробництві панелей.

У розділі 3 викладено теплофізичні та гігієнічні основи побудови зимової суднової СКП, обладнаної тепловіддільними панелями з ЕПРВТ, розроблено методику розрахунку теплообміну судових приміщень з такими панелями.

Розглянуто вплив на самопочуття людини таких параметрів мікроклімату як температура повітря у приміщенні  $t_{an}$  та її розподіл, середня радіаційна температура навколишніх поверхонь  $t_a$ , відносна вологість повітря, швидкість його руху (рухливість), розміри та розташування нагрітих та охолоджених поверхонь. На підставі літературних даних показано переваги променевого обігріву у порівнянні з конвективним - більш рівномірний розподіл температури повітря по висоті приміщення, збільшення конвективної та зменшення променевої складової у тепловіддачі людини, що дозволяє знизити температуру повітря приблизно на 2 °C при тих же тепловідчуттях, відносно низька температура гріючих поверхонь, що не призводить до підгорання та розкладання шкури, менша рухливість повітря в помешканні.

Відмічено, що тепловідчуття людини, яка перебуває в судновому приміщенні, можуть характеризуватись двома умовами комфортності, які введєні В.М.Богословським для цивільних будівель. Перша встановлює температуру приміщення  $t_n$ , тобто сполучення  $t_{an}$  та  $t_a$ , при якому людина, що знаходиться в середині приміщення, відчуває тепловий комфорт.

Для холодного періоду року першу умову записують у вигляді:

$$t_n = 1,57t_n(H) - 0,57t_{an} \pm 1,5, \quad (2)$$

где  $t_n(H)$  - нормоване значення  $t_n$ , що відповідає комфортним умовам при різній інтенсивності виконуваної фізичної праці. При спокійному стані людини  $t_n(H)$  дорівнює приблизно 23 °C, при легкій роботі - 21 °C, при роботі середньої важкості - 18,5 °C, при важкій роботі - 16 °C.

Друга умова комфортності визначає припустимі температури нагрітих та охолоджених поверхонь при знаходженні людини в безпосередній близькості від них. Для того, щоб не допустити

радіаційного перегріву людини, поверхні столі та стін можуть бути нагрітими до припустимої температури

$$t_{\text{наг}}^{\text{доп}} \leq 19,2 \pm \frac{8,7}{\varphi} \quad (3)$$

где  $\varphi$  - коефіцієнт опроміненості з поверхні найбільш не вигідно розташованої елементарної площини на голові людини в напрямі нагрітої поверхні.

Для створення методу розрахунку та можливості його практичного застосування В.М.Богословський запропонував спосіб, в якому система алгебраїчних рівнянь, з описуванням теплообміну в приміщенні, обладнаному теплоізолюючими панелями, зводиться до одного рівняння, що визначає теплообмін між нагрітою поверхню, рештою поверхонь та повітрям приміщення. Студи, при потребі може додаватися рівняння теплового балансу для повітря, що надходить з кондиціонера.

Для створення інженерної методики розрахунку теплообміну в судновому приміщенні, що обладнане теплоізолюючими панелями було обрано один з способів розрахунку, при якому розглядається теплообмін між обігрівачою панеллю та усередненою зовнішньою поверхню приміщення, вважаючи внутрішні поверхні відбивачими. При цьому в роботі враховувалась специфіка теплообміну суднових приміщень, на який впливають конструкція суднового корпусу, наявність прошарку повітря між зовнішніми огороженнями приміщень та бортом судна, а також наявність шару теплової ізоляції на зовнішньому борті судна.

Рівняння теплового балансу суднового приміщення має вигляд:

$$k' F_{\text{но}} (t_{\text{но}} - t_{\text{ин}}) = \alpha_{\text{н}} F_{\text{пан}} (t_{\text{пан}} - t_{\text{н}}) + \alpha_{\text{н}} F_{\text{пан}} (t_{\text{пан}} - t_{\text{сп}}) \quad (4)$$

Ліва частина рівняння (4) описує тепловий потік від внутрішніх поверхонь зовнішніх огорожень загальною площею  $F_{\text{но}}$ , з неповним коефіцієнтом теплопередачі  $k'$  (без коефіцієнта тепловіддачі від повітря приміщення до внутрішньої поверхні зовнішнього огороження) та середньою температурою  $t_{\text{но}}$  до зовнішнього повітря, що має температуру  $t_{\text{ин}}$ . Цей тепловий потік фактично являє собою втрати тепла приміщенням через зовнішні огороження.

Коефіцієнт теплообміну випромінюванням  $\alpha_{\text{н}}$  визначають як

$$\alpha_d = \epsilon_{np} C_o \Psi = C_{np} \Psi, \quad (5)$$

де  $\epsilon_{np}$  - приведений коефіцієнт відносного випромінювання, який може бути прийнятий рівним 0,9-0,91;

$C_o$  - коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла:

$$C_o = 5,78 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$$

$C_{np} = \epsilon_{np} C_o$  - приведений коефіцієнт випромінювання, який може бути прийнятий рівним 5,1-5,2 Вт/(м<sup>2</sup>К<sup>4</sup>);

$\nu$  - температурний коефіцієнт, значення якого приблизно може бути знайдене як

$$\nu = 0,81 + 0,005(t_{пан} + t_{но}) \quad (6)$$

$\Phi$  - коефіцієнт повної опроміненості зовнішніх огорожень обігрівачою панеллю, що обчислюється за формулою:

$$\Phi = \varphi_{п-н} + \varphi_{п-н}^1 = \frac{F_{но} \sqrt{F_{пан}} - \varphi_{п-но}^2}{F_{но} \sqrt{F_{пан}} - 2\varphi_{п-н} + 1} \quad (7)$$

де  $\varphi_{п-н}$  - коефіцієнт прямого опромінення панеллю зовнішніх огорожень;

$\varphi_{п-н}^1$  - коефіцієнт непрямого опромінення панеллю тих же зовнішніх огорожень (шляхом відбиття від поверхонь внутрішніх огорожень).

До формули (4) входить також коефіцієнт конвективного теплообміну  $\alpha_k$ , що визначається за формулою

$$\alpha_k = \beta_k (t_{пан} - t_{вп})^{1/3} \quad (8)$$

де  $\beta_k$  - чисельний коефіцієнт, що дорівнює в умовах приміщення для вертикальних поверхонь - 1,66; для горизонтальних поверхонь при потоці тепла зверху вниз - 1,16; при потоці тепла знизу вгору - 2,16.

Загальний обсяг втрат тепла через зовнішній борт судна залежить від температури зовнішнього повітря, поверхні теплопередачі, товщини та теплопровідності ізоляції зовнішнього борту і температури на поверхні ізоляції борту. Всі перелічені фактори повинні задаватись заздалегідь, крім температури на поверхні ізоляції зовнішнього борту, яка може бути визначена, виходячи з умови невідпотівання зазначеної ізоляції (необхідно, щоб температура в найбільш несприятливо розташованій її частині ізоляції в заданих умовах була вищою від точки роси). Точку роси визначають на підставі двох параметрів - температури повітря в повітряному прошарку  $t_{анр}$  та його відносної вологості  $\tau$ .

Температуру повітря в нижній точці біля ізоляції зовнішнього борту  $t_{\text{впрм}}$  можна знайти за середньою температурою повітря у прошарку з урахуванням перепаду температур по висоті.

$$t_{\text{срнв}} \text{ н. б.} = \left[ t_{\text{ро}} + 1 \right] + \frac{\Delta t}{2} \quad (9)$$

На основі розглянутих теоретичних положень створено інженерну методику розрахунку зимової судової СКП з тепловідляючими панелями с ЕПРТ, яка дає змогу знаходити площі тепловідляючих панелей за формулою:

$$F_{\text{пдп}}^{\text{ном}} = \frac{Q_{\text{пдп}}^{\text{к}}}{C_{\text{пр}} \phi_{\text{в}} (t_{\text{пдп}} - t_{\text{но}}) + \alpha_{\text{кпдп}}^{\text{х}} (t_{\text{пдп}} - t_{\text{вп}})}, \quad (10)$$

де  $Q_{\text{пдп}}^{\text{к}}$  - кількість тепла, яку мають повинні виділити підволючні панелі в бік каюти;

$C_{\text{пр}}$  - приведений коефіцієнт опроміненості, рівний 4,9;

$t_{\text{пдп}}$  - температура підволючних панелей (приймається в залежності від висоти приміщення);

$t_{\text{но}}$  - температура зовнішньої обшивки;

$\alpha_{\text{кпдп}}^{\text{х}}$  - коефіцієнт тепловіддачі через конвекцію підволючних панелей;

$\phi_{\text{в}}$  - коефіцієнт повної опроміненості;

$\nu$  - температурний коефіцієнт,

а також необхідні потужності панелей та перевіряти систему за двома умовами комфортності.

На основі розробленої методики створено програму для розрахунку системи на ПЕОМ.

У розділі 4 викладено методи проведення та результати експериментальних досліджень тепловідляючих панелей з ЕПРТ, а також комплексних випробувань судової СКП, оснащеної такими панелями, та порівняння її з традиційною, що показало переваги СКП з ЕПРТ.

Дослідження панелей з ЕПРТ проводились в три етапи. На першому етапі випробувалися дослідні зразки панелей, на яких відпрацьовувалися конструктивні вузли та визначалися попередні теплотехнічні характеристики: рівномірність розподілу температур на лицьових і тильних поверхнях панелей, значення температур на нагрівальних елементах, динамічні та статичні температурні

характеристики, тобто залежності температур від часу в процесі нагріву та охолодження панелей, а також температур, що встановлювалися на поверхніх панелях від потужностей (рис.2,3, 4), теплові потоки з лицьових і тильних сторін панелей, розраховувалися коефіцієнти тепловіддачі.

На другому етапі дослідні зразки панелей с ЕПРВТ, виготовлені на Херсонському суднобудівному заводі, випробовувалися як тепло- та електротехнічні вироби й елементи обладнання суднових приміщень. Комплекс випробувань, що проводився на другому етапі, включав у себе: електричні, теплофізичні, механічні, кліматичні, пожежні та санітарно-хімічні випробування.

Експериментальні дослідження панелей підтвердили їх повну відповідність вимогам нормативно - технічної документації. На основі результатів випробувань Головне управління Регістру дозволило застосування на судах, піднаглядних Регістру, поробірок типу В-1Б, в конструкціях яких використовуються модульні панелі з ЕПРВТ.

На третьому етапі панелі випробовувалися в умовах, що імітували двомісну типову модульну каюту, разом з системою кондиціонування повітря. При цьому вирішувались такі завдання:

- визначення теплофізичних характеристик та оцінка стану поверхні тепловідляючої зашивки суднової каюти;

- оцінка стану поверхні теплоізоляції зовнішнього борту;

- порівняльна оцінка ефективності роботи варіантів схем СКП (СКП з кількісним регулюванням та СКП з панелями з ЕПРВТ) та їх окремих елементів по забезпеченню комфортних теплових умов у каюті при створенні за зовнішнім огороженням параметрів повітряного середовища, характерних для судон необмеженого району плавання;

- уточнення теплових характеристик тепловідляючих панелей та алгоритмів керування ними;

- одержання даних для виведення залежностей, які б дозволи виконувати аналітичні розрахунки процесів теплообміну в модульній каюті та вибір обладнання;

- оцінка якості повітря каюти щодо визначення ГПК шкідливих та токсичних речовин, що виділяються при нагріванні панелей.

Для кількісної характеристики рівня комфортності був використаний метод Фангера, який широко застосовується в світовій практиці кондиціонування повітря стаціонарних споруд та на транспорті. Критерій узагальнює прийняту у вітчизняній практиці

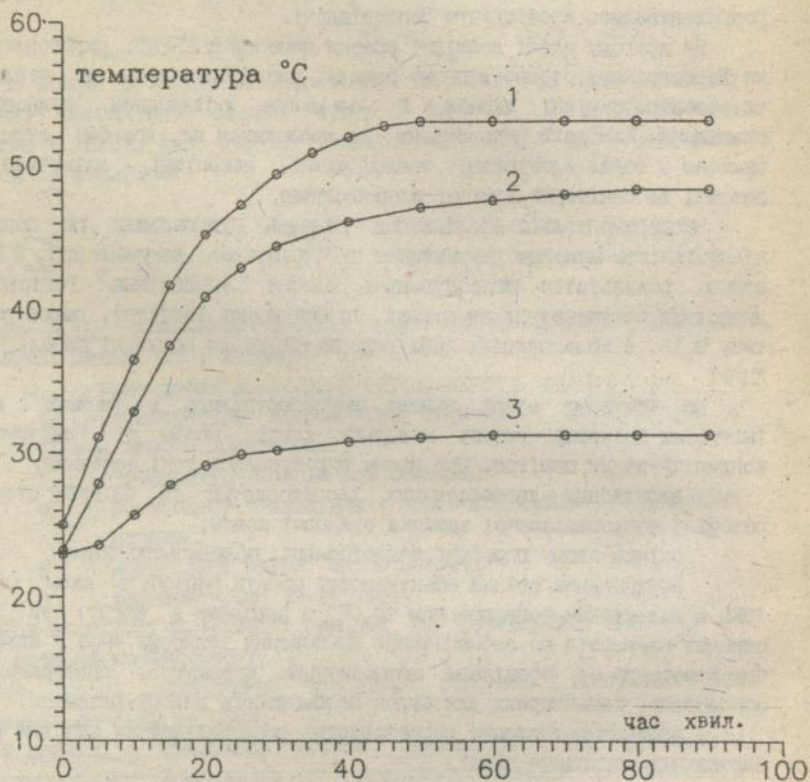


Рис.2. Динамічні характеристики стінової панелі з ЗФРВТ:  
1 - нагрівальні елементи; 2 - лицьова сторона панелі;  
3 - тильна сторона панелі

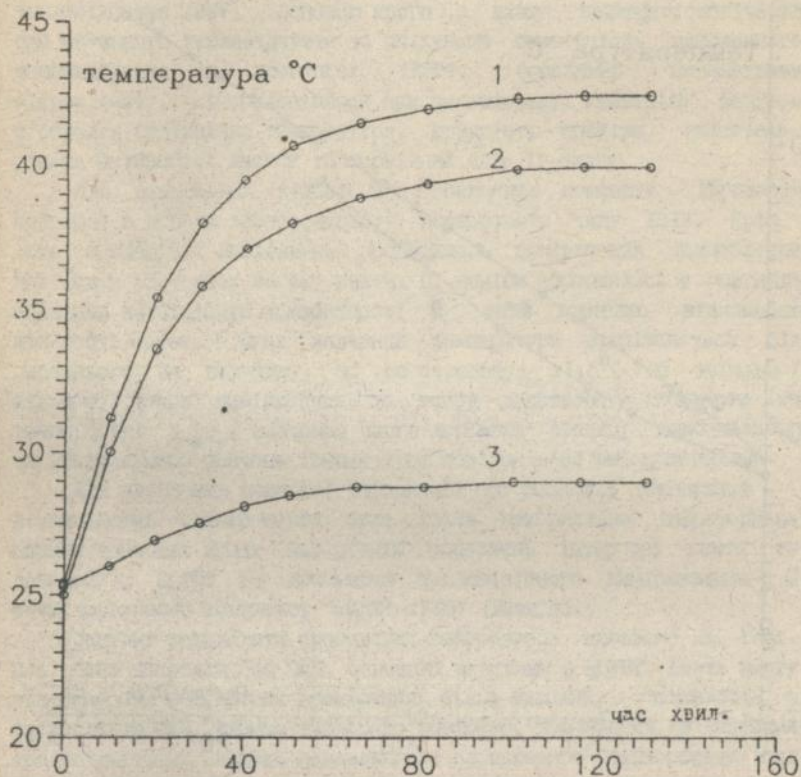


Рис.3. Динамічні характеристики піддолючної панелі з ЗІРЗТ:  
1 - нагрівальні елементи; 2 - лицьова сторона панелі;  
3 - тильна сторона панелі

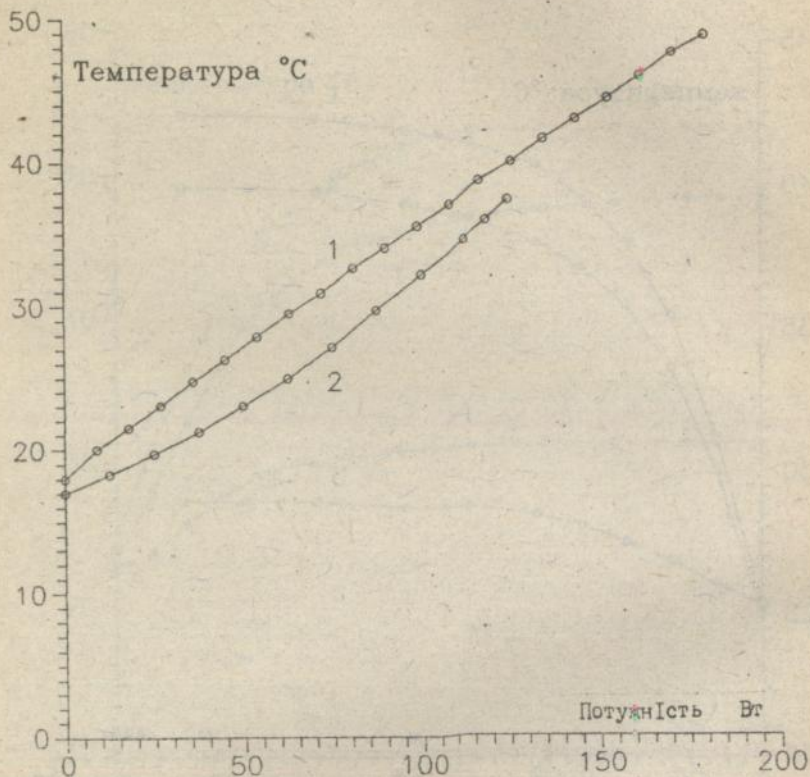


Рис.4. Залежність температури на поверхні панелі з ЗНРВТ від їх потужності; 1 - стінна панель; 2 - підвішувача.

комплексну оцінку мікроклімату в градусах РТ, доповнивши її врахуванням термічного опору одягу мешканця приміщення та родом його діяльності.

Фангер ввів два кількісних критерії: очікуване значення тепловідчуття (PMV) – основою якого є шкала психофізіологічного суб'єктивного тепловідчуття та очікувана ймовірність неприємного тепловідчуття в процентах (PPD). Основними параметрами мікроклімату, які враховуються при використанні критеріїв Фангера є середня радіаційна температура, швидкість повітря, вологість, рівень активності людини та термічний опір її одягу.

Для визначення кількісного показника комфорту (критеріїв Фангера) в роботі застосовувався комфортамір типу I2I2. Крім того, в процесі досліджень проводились вимірювання температури повітря в 17 точках об'єму каюти. Ці виміри оброблялись у вигляді значення коефіцієнта комфортності  $k_c$ , який дорівнює відношенню кількості точок, в яких значення температури відрізняється від середнього на величину, що не перевищує  $\pm 1,5^\circ\text{C}$  до загальної кількості точок вимірювання, а також додаткового критерію по температурі  $t_{no-n}$ , значення якого дорівнює різниці максимального та мінімального значень температури повітря в об'ємі приміщення.

Для одержання повнішої інформації про розподіл температур в приміщенні стенда-каюти було також використано інфрачервону зйомку теплових полів внутрішніх поверхонь інтер'єру каюти та панелей з ЕПРВТ за допомогою тепловізійного вимірювально-обчислювального комплексу "AGEMA-4168" (Швеція).

Основні результати проведених випробувань наведено в табл. 2-4. Вони показали, що СКП, оснащені панелями з ЕПРВТ, дають змогу підтримувати в суднових приміщеннях більш високій, порівняно з традиційною СКП, рівень теплового комфорту, пов'язаний з кращими тепловідчуттями завдяки переважанню променевого теплообміну над конвективним та більш рівномірному розподілу температури повітря по висоті, а також можливості підтримання нормованої Санітарними правилами різниці температур повітря та навколишніх поверхонь приміщення ( $\pm 4^\circ\text{C}$ ). Наявність працюючих стінових тепловідляючих панелей дає змогу уникнути пошкодження теплової ізоляції судового корпусу внаслідок її відпотівання та проморожування. Покращуються економічні показники СКП за рахунок встановлення теплового комфорту в каюті при температурі повітря  $18^\circ\text{C}$  замість нормованих Санітарними правилами  $20^\circ\text{C}$ , транспортування з центрального

Таблиця 2. Порівняльні технічні дані традиційної СКП та СКП з ЕПРВТ.

Температура в навантажувальній камері, °С	Тип СКП				
	Одноканальна СКП з ЕПРВТ			Одноканальна СКП з кількісним регулюванням (традиційна)	
	Витрати припливного повітря, що надходить в приміщення, м <sup>3</sup> /ч	Температура припливного повітря, °С	Усереднене значення температури повітря в приміщенні, °С	Потужність, що підводиться до панелей з ЕПРВТ на зашивці зовнішнього борту, кВт	Потужність, що підводиться до панелей з ЕПРВТ на зашивці підволоки, кВт
0	70/90	18,0/30,0	18,0/20,0	0/0	0,240/0
-10	70/160	18,0/32,5	17,5/20,3	0,165/0	0/0
-25	70/100	18,0/38,0	17,9/20,0	0,165/0	0,240/0

Таблиця 3. Порівняльні характеристики традиційної СКП та СКП з ЕПРВТ.

Температура в навантажувальній камері, °С	Тип СКП					
	Одноканальна СКП з ЕПРВТ			Одноканальна СКП з кількісним регулюванням (традиційна)		
	Процент комфортності щодо температури повітря в об'ємі приміщення	Різниця максимального та мінімального значень температур повітря в об'ємі приміщення, °С	Мінімальне значення температури на поверхні ізоляції зовнішнього огороження, °С	Різниця максимального та мінімального значення температури на поверхні ізоляції зовнішнього огороження, °С	Значення критерію Фангера	Середня температура поверхні зовнішнього огороження, °С
0	0,764/0,470	2,0/6,4	8,2/9,3	9,3/8,6	+0,06/+0,05	16,65/17,51
-10	0,764/0,587	2,0/7,2	9,5/6,0	4,4/12,1	-0,19/+0,17	24,9/17,05
-25	1,0/0,176	2,2/10,2	5,5/1,4	8,0/16,4	+0,05/+0,06	23,8/16,35

Таблиця 4. Порівняльна ефективність традиційної СКП та СКП з ЕПРЕТ.

Тип СКП	Температура повітря в навантажувальній камері, °С	Оцінка стану мікроклімату в каюті	Оцінка стану ізоляції зовнішнього огороження	Порівняльні витрати енергії
СКП традиційна	$-10 \leq t_{\text{нн}} \leq 0$	Незадовільно	Не відпотиває	1,0
СКП з ЕПРЕТ		Задовільно	Не відпотиває	0,52-0,73
СКП традиційна	$-25 \leq t_{\text{нн}} \leq -10$	Незадовільно	Відпотиває	1,0
СКП з ЕПРЕТ		Задовільно	Не відпотиває	0,65-0,52

кодиціонера повітря в температурі  $18^{\circ}\text{C}$  в кількості, необхідній для підтримання оптимального газового складу в суднових приміщеннях та виносення в них потрібної кількості вологи, а також зниження до мінімуму втрат тепла в трубопроводах у режимах нагріву які не потребують ізоляції.

У розділі 5 викладено основні принципи проєктування суднових СКП з тепловіддільними панелями з ЕПВТ.

Проєктування починається з вибору тепловіддільних панелей та місць їх розташування в приміщенні залежно від планувальних рішень судна, розташування меблів і т. д. (вибір решти обладнання СКП провадиться традиційним способом).

При виборі тепловіддільних панелей керуються тими ж принципами, що й при проєктуванні інших систем обігріву, наприклад, економічність. Проте при цьому враховують деякі особливості панельно-променевого обігріву, перш за все, припустимо з точки зору тепловідчуттів людини температуру поверхні панелей. Необхідно також враховувати стан поверхні обігрівачного приладу, тобто значення коефіцієнта випромінювання  $\epsilon$ , оскільки переоцінка значення цього коефіцієнта може привести до серйозних технічних прорахунків.

Економічність тепловіддільних панелей визначається співвідношенням теплових потоків з їх тильних і лийових поверхонь. Останнє залежить від наявності оптимального шару теплової ізоляції на тильній стороні панелей. В кожному конкретному випадку це питання повинні вирішувати розробники системи. Потім шляхом розрахунку визначають необхідні площі грівчих панелей та їх теплову потужність з перевіркою виконання двох умов комфортності.

Кількість типорозмірів панелей у приміщенні має бути мінімальною. Для оптимізації кількості тепловіддільних панелей необхідно об'єднати приміщення судна в групи з близькими втратами тепла. При цьому слід намагатися, щоб у приміщеннях зі значними втратами тепла (наріжні каюти, каюти верхніх поверхів тощо...) були встановлені панелі тих же типорозмірів, що і в інших приміщеннях. Сумарна тепловіддача панелей, призначених для кожного приміщення, не повинна більш як на 10 % відрізнитися від розрахункових втрат тепла через огорожуючі конструкції.

Розробка схем електричної комутації та захисту тепловіддільних панелей, а також схем автоматичного регулювання

температури повітря в суднових приміщеннях ведеться відносно вимог нормативно-технічної документації, прийнятої в суднобудуванні.

Як варіанти схемних рішень судових СКП з ЕПРВТ були запропоновані:

- одноканальна СКП з розташуванням у приміщеннях, що обслуговуються, електричних тепловідділяючих панелей з ЕПРВТ. законаних у вигляді частини зашивки зовнішнього огороження та підволоку;

- одноканальна СКП з доводчим електричним нагрівачем та бортовими панелями з ЕПРВТ. Цей варіант дасть змогу запобігти відіютиванню та промерзанню ізоляції зовнішнього борту та зменшити втрати тепла повітрям при транспортуванні;

- система з використанням місцевих автономних кондиціонерів, що виконані у вигляді вертикальних стояків-пілонів, розроблених ВО "Екватор", які займають у плані невелику площу ( $\approx 0,12 \text{ м}^2$ ) з бортовими та підвoločними панелями.

Для впровадження СКП з тепловідділяючими панелями з ЕПРВТ в практику суднобудування таку систему вперше було спроектовано ЦКБ "Чорноморсуднопроект", виготовлена та встановлена на арктичному криголамі проекту ІССІ, побудований на Херсонському суднобудівному заводі. Результати натурних випробувань повністю підтвердили правильність теоретичних залежностей та експериментальних досліджень, а також показали ефективність використання вказаної системи.

#### ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі проаналізовано різні типи СКП, що застосовуються на судах вітчизняної та зарубіжної побудови. На основі вивчених літературних даних зроблено висновок про те, що підвищення комфортності СКП може бути досягнуто за рахунок децентралізації систем та розвитку засобів індивідуального регулювання, а підвищення економічності - шляхом раціонального використання та економії енергії, включаючи застосування її нетрадиційних джерел, а також утилізацію. Показано, що перспективним напрямком удосконалення судових СКП в створення систем нового для суднобудування типу з тепловідділяючими панелями на основі ЕПРВТ.

Для впровадження цього напрямку в практику суднобудування необхідно було провести ряд теоретичних та експериментальних

досліджень, розробити конструктивні елементи, технічні засоби, технологічну базу цих систем, створити методологію їх розрахунку та проектування, а також перевірити їх на практиці. Ці завдання розв'язані в дисертаційній роботі.

На основі аналізу різних ЕПРВТ показано перспективність застосування електронагрівальних тканин для тепловидільних панелей, що використовуються в судювих СКП. Створено два типи електронагрівальних тканин (а.с. СРСР № 1585405), на які розроблено та затверджено технічні умови (ТУ 7-04-15-249-89).

Запропоновано конструкції та технологічні процеси виготовлення тепловидільних панелей з ЕПРВТ (а.с. СРСР №1548107). Розроблено та затверджено технічні умови на них (ТУ МЛТИ 0665148-90).

Теорію промислового теплообміну адаптовано до судювого приміщення з урахуванням його специфіки, на цій основі створено інженерну методику розрахунку теплообміну судювого приміщення, обладнаного панелями з ЕПРВТ, яка дає змогу знаходити площі тепловидільних панелей, їх потужності і перевірити систему за двома умовами теплового комфорту. Розроблено програму для розрахунку вказаної СКП на ПЕОМ.

Проведено експериментальні дослідження тепловидільних панелей з ЕПРВТ як окремих тепло- та електротехнічних виробів, а також комплексні випробування судювої СКП, обладнаної такими панелями, та її порівняння з традиційною одноканальною СКП з кількісним регулюванням. Комплексні випробування проведено в умовах стенда, який імітує типову двомісну модульну каюту.

Виконані дослідження показали, що розроблені тепловидільні панелі з ЕПРВТ відповідають усім вимогам Регістру і допущені до практичного використання на судах.

Створені СКП, оснащені панелями з ЕПРВТ, дають змогу підтримувати в судювих приміщеннях вищий, порівняно з традиційними СКП, рівень теплового комфорту, проводити швидкі зміни та автоматичне регулювання теплових умов у судювих приміщеннях, мають кращі економічні показники (наприклад, економія палива для суден проєктів 05025 та 13030 становить відповідно 13,7 та 17,4 т на рік), наявність працюючих стінових тепловидільних панелей дає змогу уникати пошкоджень теплової ізоляції корпусу судна внаслідок її відсутності та промерзання.

Проведено натурні випробування СКП, обладнаної

тепловиділяючими панелями з ЕПРВТ в період ходових випробувань судня проекту ІОБЗІ, які підтвердили доцільність її використання, а також правильність отриманих теоретичних залежностей та прийнятих конструктивних рішень. Розроблено методику проєктування вказаних систем і запропоновано типові схемні рішення.

Таким чином, проведено комплекс досліджень та розробок, який створив основи для використання СКП з ЕПРВТ у практиці суднобудування для суден різних класів та призначень.

Слід, проте, відзначити, що зроблено лише перші кроки в реалізації цього напрямку, який, безумовно, є актуальним і перспективним.

Основний зміст дисертації опубліковано в таких роботах:

1. Захаров Ю.В., Гриффон Л.А., Эльгарт Я.Л. Использование панелей на базе электронагревателей с поверхностнораспределенным тепловыделением для обеспечения тепловых условий в жилых и служебных помещениях судов. // Охрана труда и охрана окружающей среды в судостроении: Сб. науч. тр. Николаев: НКИ, 1987. - С. 44-47.
2. Захаров Ю.В., Гриффон Л.А., Эльгарт Я.Л. Нагреватель картора холодильного компрессора. // Холодильная техника. - 1990. - № 4. - С. 7-11.
3. Эльгарт Я.Л. Некоторые нагреватели с поверхностнораспределенным тепловыделением в судовых системах. Сб. Электронагревательные устройства на основе композиционных резистивных материалов. К.: ИТМ АН УССР, 1988. - С. 76-79.
4. Эльгарт Я.Л. Перспективы применения электронагревательных устройств с поверхностнораспределенным тепловыделением в судовом теплосбонном оборудовании. // Судовое энергомашиностроение. Сб. научн. тр. Николаев.: НКИ, 1987. - С. 40-43.
5. Эльгарт Я.Л. Судовая система кондиционирования воздуха с тепловыделяющими панелями. / Сб. Энергосберегающие электронагревательные устройства на основе композиционных резистивных материалов. К.: ИТМ АН Украины, 1993. - С. 156-168.
6. Эльгарт Я.Л. Электроотопительные панели с поверхностнораспределенным тепловыделением. К.: УКРИНИНТИ, 1991. - 12 с.
7. Эльгарт Я.Л. Эффективные судовые системы кондиционирования воздуха и отопления. К.: УКРИНТЭИ, 1992. - 14 с.

8. А.с. № 1548107 СССР, МКИ В 63 В 3/68. Модульная зашивка судового помещения./ Захаров Ю.В., Гриффон Л.А., Гнездилов В.В., Эльгарт Я.Л. и др. Опубл. 7.03.90, бвл. № 9.
9. А.с. № 1585405 СССР, МКИ D 03 D 15/02. Ткань с электропроводящей нитью./ Хватов С.И., Стулов В.В., Эльгарт Я.Л., Гриффон Л.А. Опубл. 15.08.90, бвл. № 30.



458070

AB 30.510  
**AB 30.510**