

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ МОРСЬКИЙ
ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені адмірала Макарова**

Скородумов Олександр Павлович

УДК 621.565.94/95:629.5

**ПІДВИЩЕННЯ ТЕПЛОГІДРОДИНАМІЧНОЇ
ЕФЕКТИВНОСТІ ПАРОВИХ НАГРІВАЧІВ ПОВІТРЯ
СИСТЕМ СУДНОВОГО МІКРОКЛІМАТУ**

Спеціальність 05.08.05 Суднові енергетичні установки

**Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук**

Миколаїв - 2002

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Українському державному морському технічному університеті імені адмірала Макарова Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник - доктор технічних наук,
старший науковий співробітник **Радченко
Микола Іванович**
Український державний морський технічний
університет імені адмірала Макарова,
головний науковий співробітник

Офіційні опоненти:

- д-р техн. наук, професор **Капустін Віктор
Володимирович**,
Севастопольський Національний технічний
університет, професор кафедри
- д-р техн. наук, професор **Крючков Юрій
Семенович**, Український державний
морський технічний університет імені
адмірала Макарова, професор кафедри

Провідна установа - Одеський Національний морський університет
Міністерства освіти і науки України

Захист відбудеться "17" червня 2002 р. о 11 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д38.060.01 Українського державного морського технічного університету імені адмірала Макарова за адресою: 54025, м. Миколаїв, пр. Героїв Сталінграду, 9

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Українського державного морського технічного університету імені адмірала Макарова за адресою: 54025, м. Миколаїв, пр. Героїв Сталінграду, 9

Автореферат розісланий 14 травня 2002 р.

Вчений секретар
спеціалізованої ради д-р
техн. наук, професор

В.Ф. Квасницький

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми дослідження. Особливості умов експлуатації морського флоту України, пов'язані зі значною віддаленістю районів рибного промислу і транспортних ліній від вітчизняних портів, висувають підвищені вимоги до системи суднового мікроклімату (ССМ) як енергетичної системи, що забезпечує комфортні умови перебування екіпажу і безпечної експлуатації суднової енергетичної установки і судна в цілому. Рівень надійності ССМ багато в чому визначає надійність і довговічність суднового енергетичного комплексу.

Основним елементом, що забезпечує термообробку повітря і роботу ССМ в осінньо-зимовий період та при плаванні в північних і південних широтах, є парові нагрівачі повітря (ПНП). Теплогідродинамічна досконалість ПНП визначає енергетичну ефективність і експлуатаційну надійність ССМ у цілому. Практика експлуатації ССМ на судах необмеженого і льодового районів плавання показує, що в 50 % випадків виходу з ладу ПНП, які працюють на зовнішньому повітрі, причиною є замерзання конденсату в трубках на часткових навантаженнях при від'ємній температурі повітря. Виконання низькотемпературної ступені ПНП з двох або трьох секцій знижує імовірність замерзання конденсату, але не виключає її цілком. Нестабільний відвід порушує циркуляцію конденсату у ПНП, створює небезпеку його замерзання і руйнування трубок першої секції. Підвищення надійності ССМ прямо пов'язане з усуненням цієї причини і забезпеченням надійної циркуляції теплоносія зі стабільним відводом конденсату з ПНП. Від інтенсивності теплопереносу, який визначає теплову ефективність ПНП, залежать рівень і рівномірність поля температур повітряних потоків. Остання є одним з основних параметрів, що забезпечують комфортні умови перебування на судні. Досвід експлуатації свідчить про те, що судові ПНП жодній з цих вимог¹ повною мірою не відповідають. Відсутність вирішення проблеми замерзання конденсату призвела до заміни парових нагрівачів повітря термосифонними із заздалегідь гіршими теплотехнічними та масогабаритними показниками. Проблема ускладнюється підвищеними у порівнянні із стаціонарними об'єктами вимогами з масогабаритних характеристик суднового енергетичного обладнання та нерівномірним розподілом парових і повітряних потоків. Таким чином, задача теплогідродинамічного удосконалення ПНП стоїть у судовій енергетиці дуже гостро.

Низька ефективність існуючих технічних рішень пов'язана з тим, що в їхній основі лежать теоретичні передумови, згідно з якими теплогідродинамічна досконалість ПНП визначається тільки зовнішнім теплообміном. Ці посилки покладені в основу методик теплового розрахунку ПНП, наведених в учбово-методичній, довідковій літературі й

у відповідних нормативних документах. У той же час практика експлуатації свідчить про те, що низькі теплова ефективність і

2

експлуатаційна надійність суднових ПНП пов'язані саме з процесами теплообміну на стороні теплоносія. Немоżliвість розв'язання проблем в експлуатації за допомогою існуючих теоретичних методів призвела до необхідності вирішення **наукової задачі** - розробки методики теплогідродинамічного розрахунку і математичної моделі ПНП, що дозволяють установити закономірності впливу реальних умов експлуатації ССМ (часткових навантажень, нерівномірності розподілу парових і повітряних потоків) на параметри робочих процесів у ПНП та проектувати теплогідродинамічно досконалі суднові ПНП.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Наведені в дисертації результати робіт використані у НДР, виконаних у рамках державних науково-технічних програм і напрямків розвитку науки і техніки: Міжвузівської науково-технічної програми "Енергоресурси та енергозбереження на водному транспорті України", № 55(1997 - 1999 рр.), НДР № ДР 0197U05021; напрямку "Екологічно чиста енергетика та ресурсощадні технології" (1999 - 2003 рр.), № ДР 010U002952.

Об'єктом дослідження є парові нагрівачі повітря систем суднового мікроклімату.

Предмет дослідження - робочі процеси в парових нагрівачах повітря, які визначають їх теплогідродинамічну ефективність та експлуатаційну надійність.

Метою науковою дослідження є підвищення енергетичної ефективності і безпеки експлуатації систем суднового мікроклімату шляхом теплогідродинамічного удосконалення парових нагрівачів повітря.

Основні задачі наукового дослідження:

- одержання експериментальних даних з параметрів повітря, пари та розподілу пари по трубках ПНП;
- встановлення закономірностей впливу часткових навантажень і розподілу витрат пари та повітря на параметри суднових ПНП;
- розробка методики теплогідродинамічного розрахунку та математичної моделі ПНП, які враховують особливості експлуатації ССМ суден необмеженого і льодового районів плавання;
- розробка і дослідження раціональних принципів здійснення робочих процесів у ПНП, схемно-конструктивних варіантів теплового і гідродинамічного удосконалення суднових ПНП, які їх реалізують.

Методи дослідження. Використано фізико-математичний метод дослідження характеристик ПНП. Математичному моделюванню передувало фізичне, результатом якого була фізична модель процесів, які відбуваються у ПНП. Математичне та фізичне моделювання використовувалися у ході поетапного виконання експериментального дослідження.

Наукове положення, що виноситься на захист:

Ступінчаста конденсація з проміжною сепарацією пари забезпечує збільшення густини теплового потоку на 20...30 % при рівномірному розподілі пари і повітря та на 30...40 % - при нерівномірному.

Наукові результати, які автор захищає на додаток до наукового положення:

1. Вперше встановлено, що частка поверхні, яка припадає на переохолодження конденсату з низькою інтенсивністю теплообміну, складає 20...40 % та обмежує сумарний тепловий потік у ПНП.

2. Встановлено, що теплове навантаження на перший ступінь двоступінчастих ПНП із переохолодженням конденсату повинна складати 50...60 % сумарної. З підвищенням температури повітря на вході та теплової продуктивності суднових ПНП діапазон відхилень розподілу теплового навантаження між ступенями від оптимальних співвідношень, який допускається, зростає.

3. Вперше експериментальним шляхом виявлені підвищені витрати пари через прилягаючі до виходу нагрівача трубки, які обумовлюють пульсації витрат пари на режимах стабільних теплових навантажень при експлуатації нагрівачів разом із конденсатовідвідниками.

4. Теоретично обґрунтовано й експериментально підтверджене розшарування поля температур повітря на виході ПНП з переохолодженням конденсату.

5. Встановлені закономірності впливу кратності циркуляції пари на теплові потоки при різних ступенях ребристості поверхні та режимних параметрах роботи ПНП: з підвищенням ступеня ребристості, витрат повітря та зниженням температури повітря приріст теплових потоків із збільшенням кратності циркуляції зростає; підвищення кратності циркуляції у півтора рази забезпечує приріст теплових потоків на 20...30 %, подальше збільшення кратності циркуляції не призводить до зростання теплових потоків.

6. Обґрунтовано, що при постійній витраті пари зі збільшенням витрати повітря і ступеня ребристості поверхні ПНП із переохолодженням конденсату тепловідвід залишається практично незмінним.

Достовірність результатів дослідження забезпечена коректною постановкою наукової задачі; задовільним узгодженням даних, отриманих за допомогою математичної моделі, та експериментальних; необхідною точністю експерименту і результатами порівняльного аналізу запропонованих та існуючих технічних рішень.

Теоретичне значення мають наступні результати дослідження:

- принципово новий спосіб реалізації робочого процесу в ПНП шляхом ступінчастої конденсації з проміжною сепарацією пари, метод розрахунку параметрів процесу та його математична модель, які сприяють подальшому розвитку теорії теплообмінників з внутрішньо трубною конденсацією пари;

- закономірності впливу часткових навантажень та розподілу витрат пари і повітря на параметри суднових ПНП;

4

- математична модель ПНП, яка враховує режими часткових навантажень та нерівномірний розподіл парового і повітряного потоків.

Практичну цінність мають:

- методика і програма розрахунку теплових характеристик суднових ПНП, які використовуються при проектуванні теплогідродинамічно досконалих нагрівачів;

- експериментально встановлений нерівномірний розподіл витрат пари по трубах, який виключає можливість роботи ПНП із стабільним відводом конденсату;

- оптимальні співвідношення витрат пари через ступені ПНП;

- номограми для визначення витрат і параметрів теплоносія на виході із ПНП у залежності від режимів експлуатації;

- схема регулювання витрат пари через ПНП;

- схемно-конструктивні рішення ПНП, які забезпечують надійну та енергетично ефективну їхню експлуатацію на судах необмеженого і льодового районів плавання.

Основні результати роботи використані організаціями, що проектують, виготовляють та експлуатують ПНП: Укррибфлотом, м. Севастополь (схеми регулювання витрат пари у двоступінчастих парових нагрівачах НПП-40 і 63 на рибопереробних судах типу "Антарктида"); ЦНДіП "Тайфун", м. Миколаїв, у ПНП суднових кондиціонерів і магістральних (методика та програма теплогідродинамічного розрахунку та розрахунку оптимальних співвідношень витрат пари через ступені ПНП, номограма для визначення витрат і параметрів теплоносія на виході із ПНП у залежності від режимів експлуатації), заводом "Екватор", м. Миколаїв (оптимальні співвідношення витрат пари у двоступінчастих парових нагрівачах НПП-6,3...63).

Конкретна особиста участь автора в одержанні наведених у дисертації наукових результатів полягає в розробці методики, програми теплового розрахунку та математичної моделі ПНП із урахуванням переохолодження конденсату; в двомірній постановці та вирішенні задачі дослідження впливу нерівномірних повітряних потоків на теплову ефективність ПНП та нерівномірності парових потоків; у встановленні закономірностей впливу кратності циркуляції пари на теплові потоки при різних ступенях ребристості поверхні та режимних параметрах роботи ПНП; в розробці раціональних схемно-конструктивних рішень, які виключають замерзання конденсату і забезпечують високу теплогідродинамічну ефективність суднових ПНП.

Апробація роботи. Основні результати були апробовані на 2-й міжнародній науково-технічній конференції "Проблеми енергозбереження й екології в суднобудуванні" (Миколаїв, 1998) та конференції "Fifth International Conference on Unconventional Electromechanical and Electrical systems" (Poland, 2001).

Публікації. По темі дисертації опубліковані 8 друкованих наукових праць, у тому числі 6 статей у наукових спеціалізованих виданнях (без співавторів 2), 1 доповідь, 1 теза доповіді.

5

Структура дисертації. Дисертація складається з вступу, 5 розділів і висновків. У додатках приведені протоколи випробувань парових нагрівачів повітря та документи, що підтверджують впровадження основних результатів дослідження.

Обсяг дисертації складає 162 сторінки машинописного тексту та 16 сторінок додатків, 79 рисунків і 5 таблиць. Бібліографія містить 122 найменування.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У розділі 1 був виконаний аналіз нагрівачів повітря, що випускаються провідними вітчизняними та закордонними фірмами для систем мікроклімату, з погляду їхньої теплової ефективності та експлуатаційної надійності. Його результати свідчать про те, що найбільш раціональними з енергетичної точки зору (витрат палива, електроенергії) і габаритів для суднових умов експлуатації є парові нагрівачі. Проте, і останні далеко не повною мірою відповідають підвищеним вимогам з теплової ефективності та експлуатаційної надійності, які висуваються до систем мікроклімату суден необмеженого і льодового районів плавання. Практика експлуатації суднових ПНП показала, що основною причиною виходу їх з ладу було замерзання конденсату з розривом теплообмінних трубок. Вкрай низька інтенсивність теплопереносу на заповнених конденсатом ділянках поверхні ПНП обумовлює невисоку теплову ефективність нагрівачів у цілому. Таким чином, теплогідродинамічна недосконалість ПНП пов'язана з наявністю переохолодженого конденсату. До того ж задача ускладнюється специфікою умов суднової експлуатації, що характеризуються частковими тепловими навантаженнями, а також нерівномірним розподілом повітряних і парових потоків.

Існуючі методики розрахунку не враховують особливості тепломасообмінних процесів у ПНП, обумовлені наявністю переохолодженого конденсату, і не дозволяють розкрити та реалізувати резерви теплогідродинамічного удосконалення суднових ПНП.

Хоча ПНП і не є основними споживачами пари на суднах, але частка витрати палива, яка на них приходить, сягає 5...7 % і не брати до уваги енергетичних втрат, пов'язаних з неефективною роботою ПНП, не можна. До того ж раціональні технічні рішення, знайдені для ПНП, цілком можуть бути застосовані і для інших більш великих споживачів пари, на які, приміром, на рибпромислових суднах приходить 20...30 % загальних витрат палива.

У розділі 2 розроблена математична модель ПНП, яка використовувалася для встановлення закономірностей впливу експлуатаційних параметрів (температури повітря на вході, витрат пари і

повітря, нерівномірності їхнього розподілу) на теплогідродинамічні характеристики ПНП. Останні, в свою чергу, враховувалися при розробці схемно-конструктивних рішень, які забезпечують підвищення

6

енергетичної ефективності та безпечну експлуатацію систем суднового мікроклімату.

При створенні математичної моделі довжина L трубки нагрівача розбивалася на число ділянок, рівне k . На кожному i -м кроці визначалися параметри пари (конденсату) і повітря на виході з i -ї ділянки (паровміст x_{2i} або температура конденсату $t_{\text{кт}2i}$, температура повітря $t_{\text{в}2i}$), а також кількість відведеної на i -й ділянці теплоти Q_i (рис.1). Середня температура повітря на виході з ПНП розраховувалася як

$$t_{\text{в}2} = \sum_{i=1}^k t_{\text{в}2i} / k, \text{ а тепловідвід з поверхні трубки як } Q_{\text{тр}} = \sum_{i=1}^k Q_i.$$

Сумарний тепловідвід з поверхні

$$\text{ПНП: } Q = \sum_{j=1}^n Q_j, \text{ паровміст:}$$

$x_2 = x_{2k}$, температура конденсату: $t_{\text{кт}2} = t_{\text{кт}2k}$. Тут i і j – порядкові номери ділянок трубки і самої трубки, а k і n – число ділянок і трубок у ПНП.

Вхідні параметри: $t_{\text{в}1}$, $t_{\text{п}1}$, x_1 , $G_{\text{в}}$, $G_{\text{п}}$, геометричні характеристики L , d , β , де $t_{\text{в}1}$ і $t_{\text{п}1}$ – температура повітря і пари, x_1 – паровміст на вході в нагрівач, $G_{\text{в}}$ і $G_{\text{п}}$ – сумарні витрати повітря і пари, d – внутрішній діаметр трубки, β – ступінь ребристості.

Вихідні параметри: Q , $t_{\text{в}2}$, x_2 , $t_{\text{кт}2}$, $\Delta P_{\text{п}}$.

Як основні використовувалися рівняння теплових балансів і теплопередачі, складені для кожної ділянки трубки. Паровміст x_{2i} і температура повітря на виході $t_{\text{в}2i}$ визначалися залежностями $x_{2i} = x_{1i} - Q_i / (G_{\text{в}i} \cdot r)$, $t_{\text{в}2i} = t_{\text{в}1} - Q_i / (G_{\text{в}i} \cdot c_{\text{пв}})$.

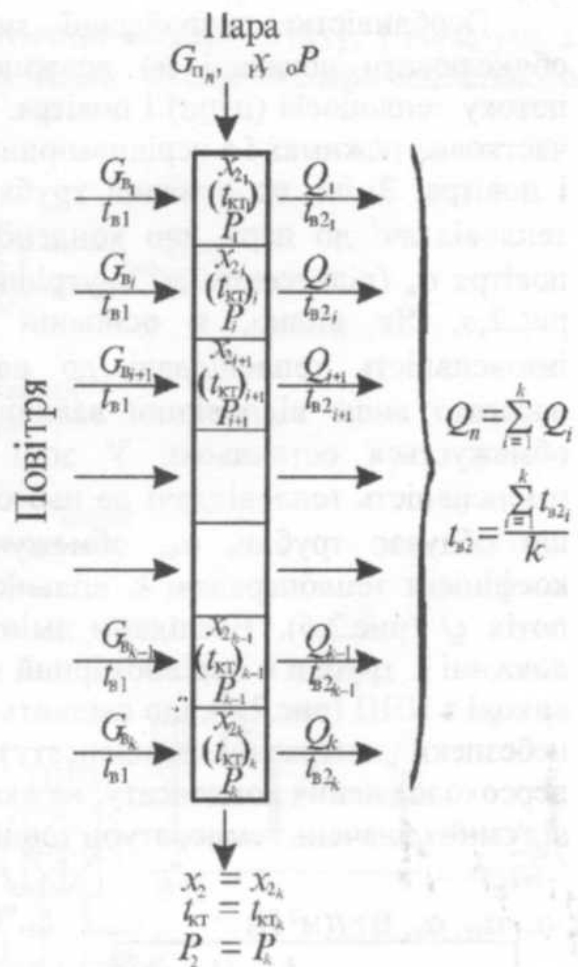


Рис.1. До математичної моделі ПНП

Значення коефіцієнтів тепловіддачі до повітря розраховувалися за допомогою загальноприйнятих залежностей для ребристих поверхонь, а до пари, що конденсується, – відповідно до відомого рівняння:

$$\alpha_p = 0,15 \Phi_{\text{ж}} \frac{\mu_{\text{ж}} c_{\text{ж}} \text{Re}_{\text{ж}}^{0,9}}{d I},$$

де $\mu_{\text{ж}}$ – коефіцієнт динамічної в'язкості рідини, $c_{\text{ж}}$ – теплоємність рідини, $\text{Re}_{\text{ж}}$ – критерій Рейнольдса для рідини, $\Phi_{\text{ж}}$ – відношення падінь тиску на тертя двофазового потоку і рідкої фази.

Параметр I обчислювався за співвідношенням

$$I = 5\text{Pr}_{\text{ж}} + A \cdot \ln[1 + B \cdot \text{Pr}_{\text{ж}}(0,09636 \text{Re}_{\text{ж}}^{0,585} - 1)],$$

у якому коефіцієнти A і B були отримані кореляцією експериментальних даних з коефіцієнтів тепловіддачі при внутрішньотрубній конденсації пари, наведених в літературних джерелах.

Особливістю розробленої моделі є те, що вона дозволяє обчислювати локальні по довжині трубок параметри двофазового потоку теплоносія (пари) і повітря, тобто моделювати роботу ПНП на часткових режимах і з нерівномірним розподілом масових потоків пари і повітря. Зміна по довжині трубки L коефіцієнтів теплопередачі k , тепловіддачі до пари, що конденсується, α_p , до конденсату $\alpha_{\text{кт}}$, до повітря α_v (віднесених до внутрішньої гладкої поверхні) показана на рис.2,а. Як видно, в основній частині фазового переходу, де інтенсивність тепловіддачі до пари (коефіцієнт тепловіддачі α_p) набагато вище відповідної величини до повітря α_v , теплопередача обмежується останньою. У зоні ж переохолодження конденсату інтенсивність тепловіддачі до нього $\alpha_{\text{кт}}$ значно нижче, ніж до повітря, що обдуває трубки, α_v , обмежуючи теплопередачу – відповідно коефіцієнт теплопередачі k , щільність теплового потоку q і тепловий потік Q (рис.2,б). Наслідком зміни інтенсивності теплопередачі по довжині L трубки є нерівномірний профіль температури t_{v2} повітря на виході з ПНП (рис.2,б), що свідчить про вкрай несприятливі (з погляду безпеки замерзання конденсату) умови теплообміну на ділянках переохолодження конденсату, на яких температура t_{v2} наближається до від'ємних значень температури зовнішнього повітря на вході t_{v1} .

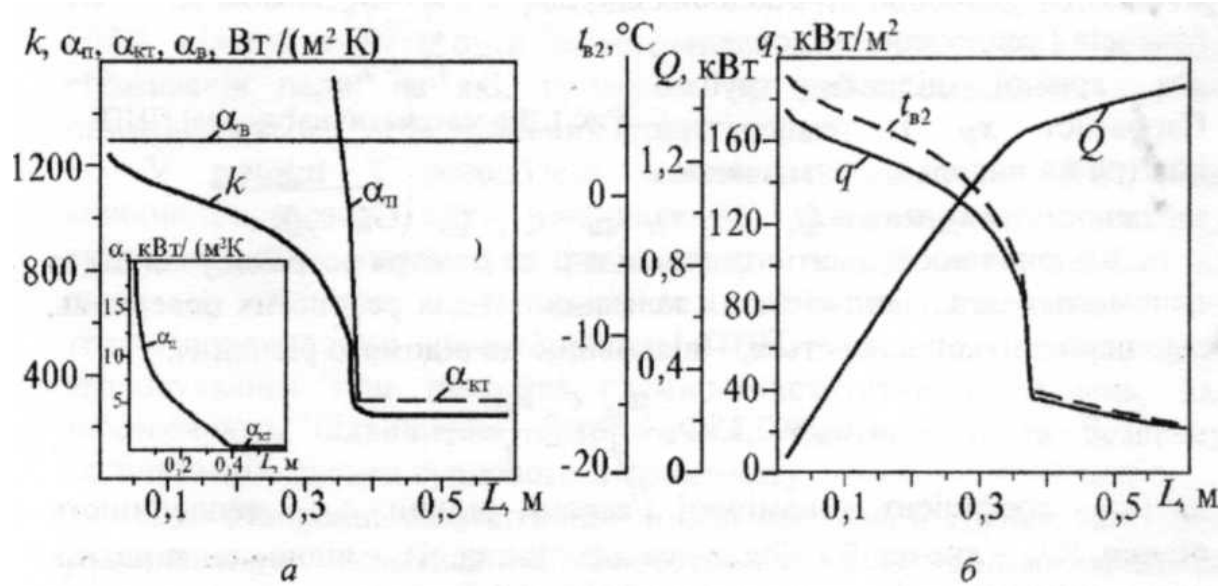


Рис.2. Залежність значень коефіцієнтів тепловіддачі α , теплопередачі k (а), густини теплового потоку q , теплового потоку Q та температури повітря на виході $t_{\text{в2}}$ (б) від довжини трубки L нагрівача

Розділ 3 присвячений експериментальному дослідженню ПНП. Його метою було одержання даних, по-перше, з тепловідводів з поверхні нагрівачів і температур повітря на виході, необхідних для встановлення адекватності математичної моделі об'єкту, і по-друге, з розподілу витрат пари по трубках ПНП. Схема експериментального стенда наведена на рис.3.

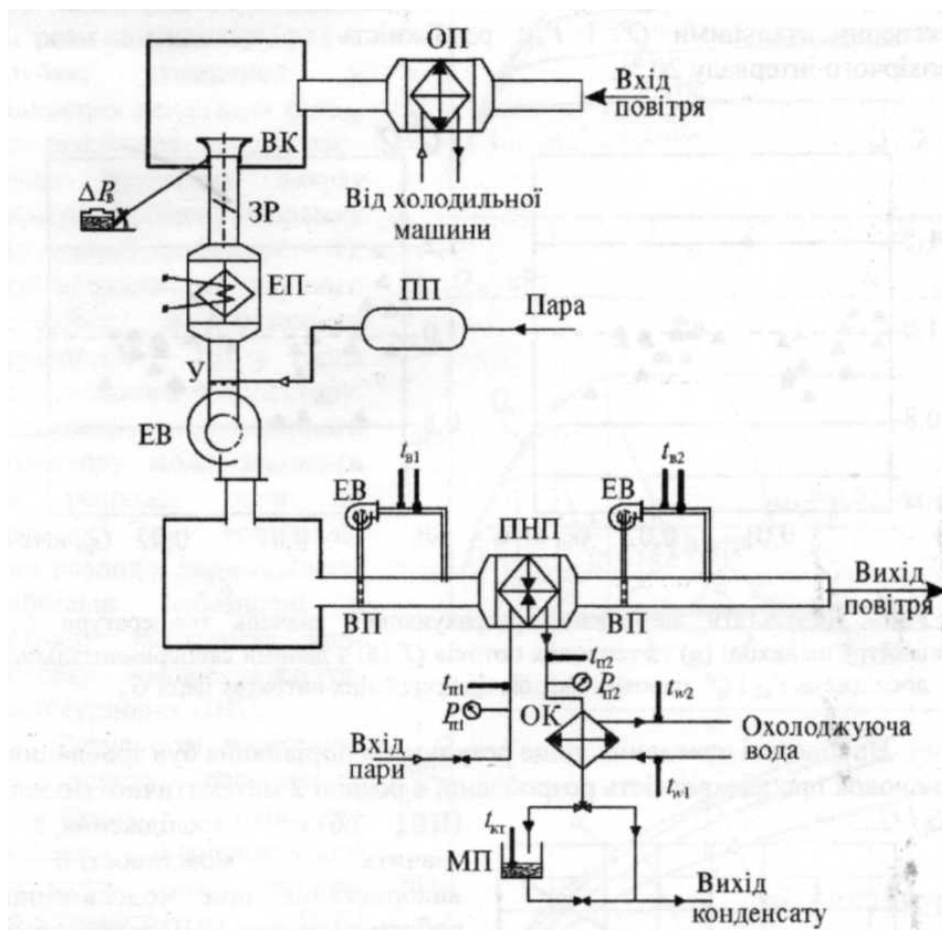


Рис.3. Схема експериментального стенду:

9

ПНП - паровий нагрівач повітря; ОП - охолоджувач повітря;
 ЕВ - електровентилятор; ВК - вимірювальний колектор; ЗР - заслінка регулююча; ЕП - електричний підігрівач повітря; У - увлажнювач повітря;
 ПП - пароперегрівач; ВП - відбірник повітря; ОК - охолоджувач конденсату;
 МП - мірна посудина;

$t_{в1}, t_{в2}$ – температура повітря на вході та виході відповідно;
 $t_{п1}, t_{п2}$ – температура пари на вході та виході;
 $t_{в1}, t_{в2}$ – температура охолоджуючої води на вході та виході;
 $P_{п1}, P_{п2}$ – тиск пари на вході та виході

Результати порівняння розрахункових величин теплових потоків Q^r і температур повітря на виході нагрівача $t_{в2}^r$ з експериментальними даними Q^3 і $t_{в2}^3$ представлені на рис.4. Як видно, розрахункові значення Q^r (рис.4,а) і $t_{в2}^r$ (рис.4,б) задовільно узгоджуються з експериментальними Q^3 і $t_{в2}^3$: розбіжність не виходить за межі довірчого інтервалу 20 %.

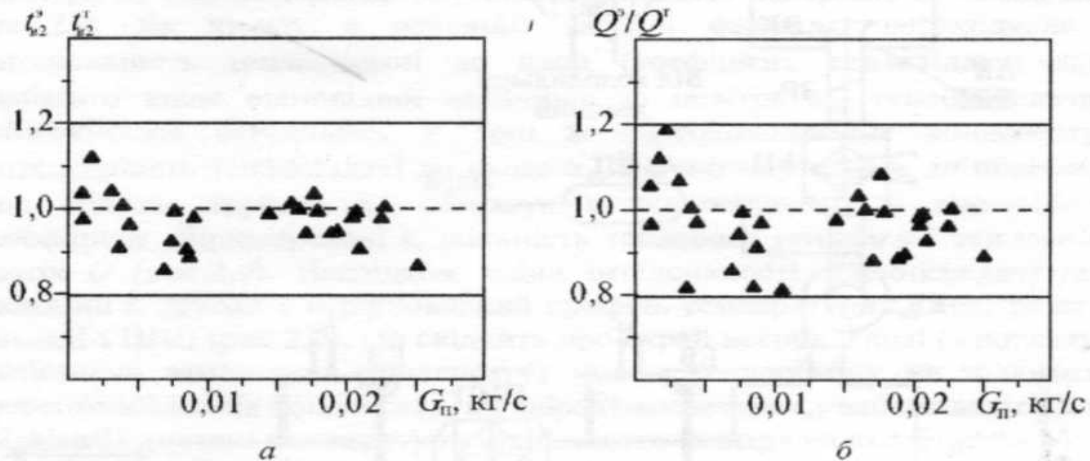


Рис.4. Результати зіставлення розрахункових значень температури $t_{в2}^r$ повітря на виході (а) та теплових потоків Q^r (б) з даними експериментальних досліджень $t_{в2}^3$ і Q^3 парових нагрівачів при різних витратах пари $G_{п}$

На підставі наведених вище результатів порівняння був зроблений висновок про адекватність розробленої в розділі 2 математичної моделі ПНП об'єкту дослідження, а значить і можливості її використання при моделюванні роботи суднових ПНП у реальних умовах експлуатації: на режимах часткових теплових навантажень і при нерівномірному розподілі повітряних і парових потоків.

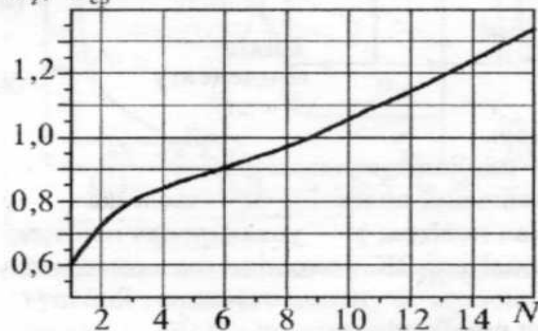


Рис.5. Значення відносних витрат пари G_i / G_{cp} по трубках нагрівача:
 G_i – витрата пари через i -у трубку;
 G_{cp} – середня по трубках витрата пари

Встановлені в ході математичного моделювання закономірності зміни теплових характеристик ПНП були покладені в основу проектування ефективних ПНП, а також враховувалися при розробці їхніх схемних рішень.

При випробуваннях ПНП без збірного колектору був установлений нерівномірний розподіл витрат пари G_n через трубки, наведений у відносних величинах $G_i/G_{\text{ср}}$ на рис.5. Як видно, має місце зростання витрат пари по трубках у напрямку від першої трубки ($N = 1$), яка примикає до вхідного патрубка, до останньої трубки ($N = 16$) у торця розподільного колектору. Наявність збірного колектору може впливати на розподіл пари по трубках. Тому встановлений розподіл пари відбиває найбільш небезпечні з погляду замерзання конденсату умови експлуатації суднових ПНП.

Результати дослідження впливу парових і повітряних потоків та їхнього нерівномірного розподілу на теплову ефективність ПНП наведені у **розділі 4**. Як видно (рис.6,а), зі збільшенням витрати повітря при постійній витраті пари темпи приросту сумарного тепловідводу, високі при низьких G_v , сповільнюються. Це пов'язано з переходом від неповного фазового переходу ($x_2 > 0$) до

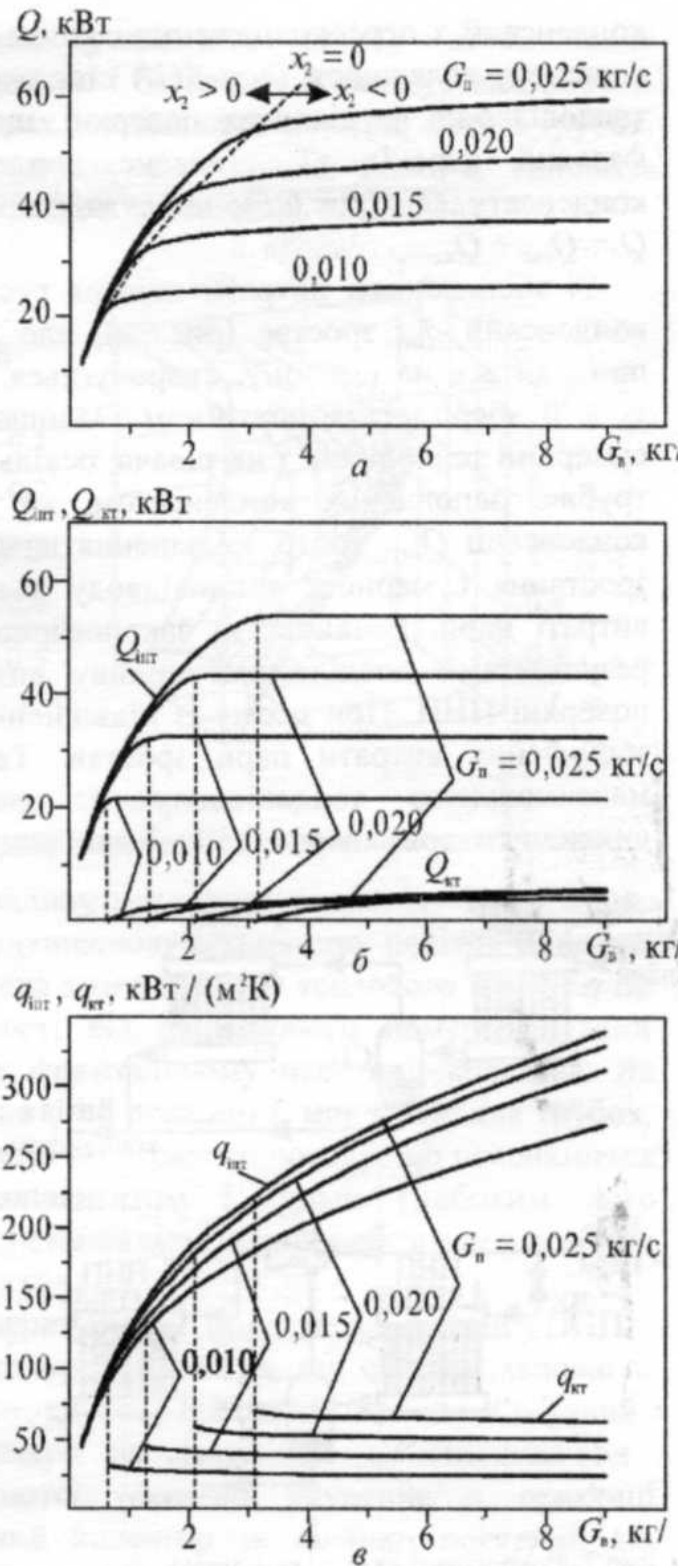


Рис.6. Значення тепловідводів сумарних Q (а), у зонах конденсації $Q_{\text{кн}}$ і переохолодження конденсату $Q_{\text{кт}}$ (б), густини теплового потоку $q_{\text{кн}}$ і $q_{\text{кт}}$ в цих зонах (в) в залежності від витрат повітря G_v при різних витратах пари G_n

конденсації з переохолодженням конденсату ($x_2 < 0$). Причина такого характеру залежності $Q = f(G_v)$ стає очевидною з результатів аналізу тепловідводів на ділянках поверхні, що приходяться на інтенсивний фазовий перехід $Q_{\text{інт}}$ (власне конденсацію) і переохолодження конденсату $Q_{\text{кт}}$ (рис.6,б), як складових загального тепловідводу Q : $Q = Q_{\text{інт}} + Q_{\text{кт}}$.

Зі збільшенням витрати повітря густина теплового потоку у зоні конденсації $q_{\text{інт}}$ зростає (рис.6,в), але довжина ділянки трубки, що приходить на цю зону, скорочується. У результаті тепловідвід при $x_2 < 0$ зберігається постійним. Залишається практично постійним і сумарний тепловідвід з нагрівача, оскільки його величина $Q_{\text{кт}}$ з ділянок трубки, заповнених конденсатом, на порядок менше, ніж у зоні конденсації $Q_{\text{інт}}$, тобто збільшення витрати повітря не приводить до зростання сумарного тепловідводу з поверхні ПНП при постійній витраті пари. Встановлені закономірності були підтверджені також результатами дослідження впливу витрати пари на тепловідвід з поверхні ПНП. При цьому із підвищенням витрати повітря ефект від збільшення витрати пари зростає. Таким чином, для досягнення максимального тепловідводу з поверхні нагрівача необхідно виключити зону переохолодження конденсату шляхом відповідного збільшення витрати пари.

Ці ж закономірності зберігаються і при різних ступенях ребристості поверхні ПНП: чим вище ступінь ребристості, тим ефект від збільшення витрати пари (від переходу на неповну конденсацію) вище.

Розроблені схемні рішення, які забезпечують роботу ПНП із неповною конденсацією, представлені на рис.7.

Оскільки до суднових ПНП висуваються жорсткі вимоги з компактності, то має місце значна нерівномірність повітряних потоків на вході в нагрівачі. Ця нерівномірність ускладнює задачу забезпечення ефективної у тепловому відношенні і безпечної в експлуатації роботи ГШП при від'ємних температурах зовнішнього повітря, коли з трубок, що знаходяться в зоні підвищених швидкостей повітря, виходить переохолоджений, аж до температури замерзання, конденсат.

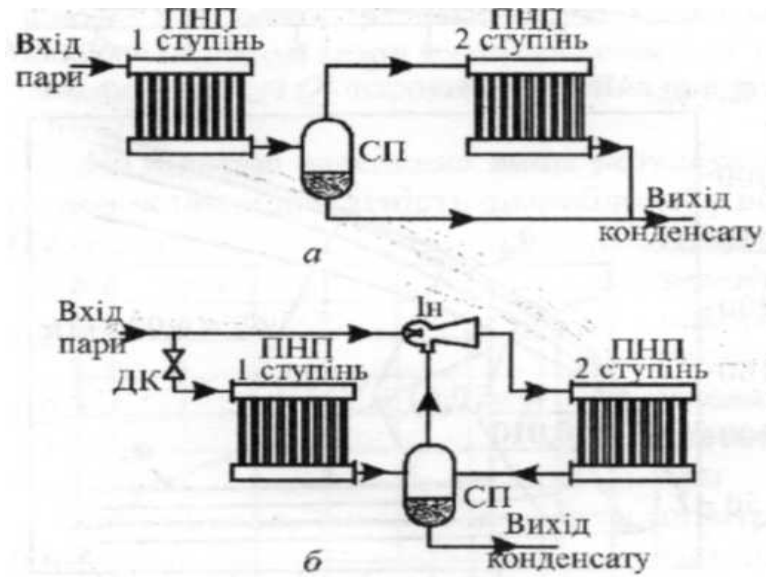


Рис.7. Розроблені схемні рішення:
а - двоступінчаста конденсація з проміжною сепарацією пари; *б* - з рециркуляцією пари у другому ступені нагрівача;
 СП - сепаратор пари; Ін - інжектор;
 ДК - дросельний клапан

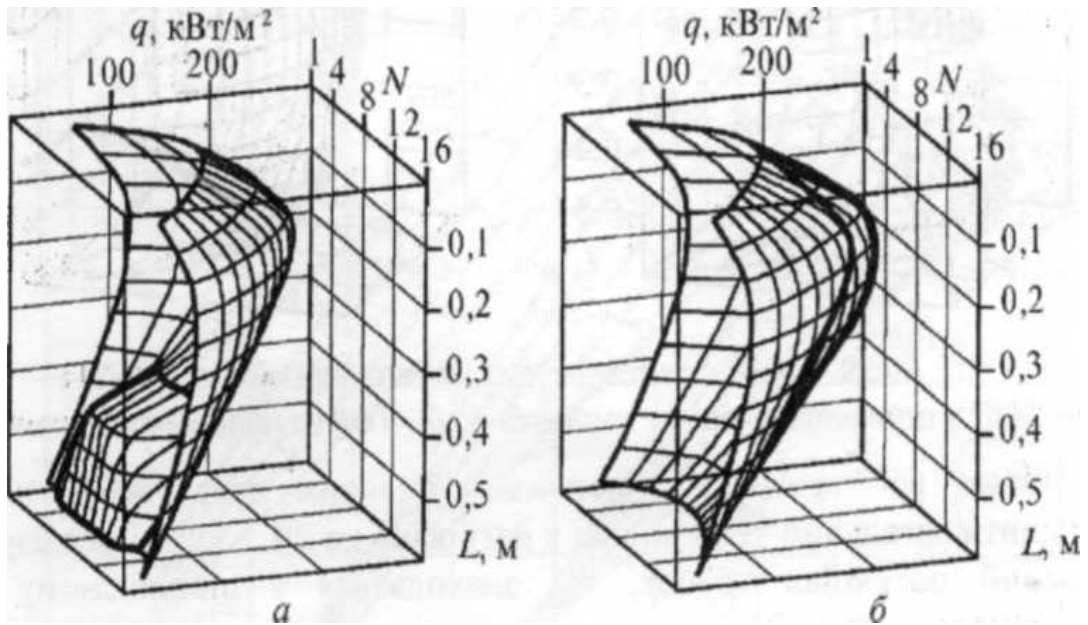


Рис.8. Густини теплового потоку д: *а* - ПНП з переохолодженням конденсату; *б* - ПНП з неповною конденсацією

Був проведений аналіз впливу реального розподілу повітряного потоку на вході в ПНП (з підвищеною швидкістю повітря в центрі перетину). На рис.8 представлена зміна густини теплового потоку q по довжині трубок L у залежності від порядкового номера N , який визначає положення трубок у фронтальній перетині нагрівача. Як видно, найбільш різке зниження q по довжині L має місце для трубок, розташованих у швидкісному ядрі повітряного потоку, що пояснюється значним їх заповненням конденсатом і більш глибоким його переохолодженням. Ці трубки і становлять значну небезпеку з погляду замерзання конденсату.

Відповідні профілі температури $t_{в2}$ повітря на виході з ПНП представлені на рис.9. Температура $t_{в2}$ повітря, що обдуває заповнені конденсатом хвостові ділянки трубок, наближається до $t_{в1}$. Такий характер поведінки $t_{в2}$ вказує на існування небезпечних зон замерзання конденсату. З метою їхнього усунення в практиці експлуатації екранують збірний колектор та ділянки поверхні, які примикають до нього, практично виключаючи їх з теплообміну. З метою усунення переохолодження конденсату і пов'язаної з цим небезпеки його замерзання доцільна робота ПНП із неповним фазовим переходом. Підвищені кратності циркуляції виключають накопичення конденсату в окремих трубках.

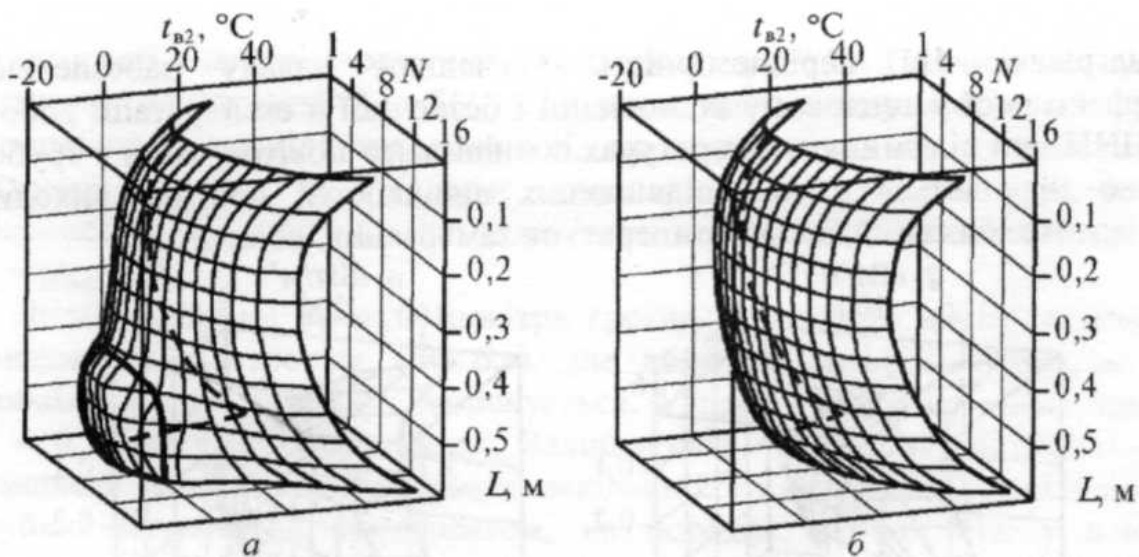


Рис.9. Профілі температури ($t_{в2}$ повітря на виході з ПНП : а - ПНП з переохолодженням конденсату; б - ПНП з неповною конденсацією

Отже, робота ПНП із неповним фазовим переходом дозволяє збільшити загальний тепловідвід з нагрівача на 20...30 % і реалізувати тепловий потенціал трубок, які знаходяться у швидкісному ядрі повітряного потоку. З переходом на неповну конденсацію вирішуються також питання, пов'язані з нерівномірним розподілом пари. При цьому сумарну витрату пари треба збільшити таким чином, щоб переохолодження конденсату було відсутнє й у трубках з найменшою витратою пари. Завдяки відсутності переохолодження конденсату поле температур повітря на виході з ПНП вирівнюється, що є однією з основних вимог, які висуваються до систем суднового мікроклімату.

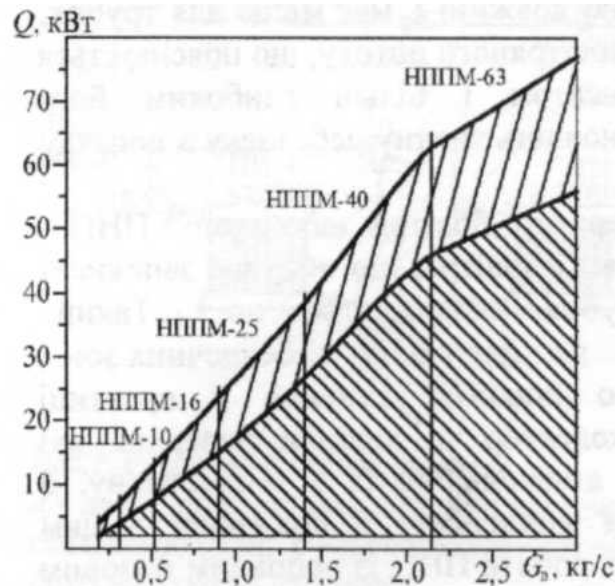


Рис.10. Поле теплових навантажень
типорозмірного ряду суднових нагрівачів:
▨ – стандартні ПНП; ▨ – розроблені

закономірності впливу умов експлуатації на характеристики ПНП (розділ 4) були використані при розробці практичних рекомендацій (розділ 5) з удосконалення суднових ПНП, які серійно випускаються (ЦНДіП "Тайфун", ВАТ "Завод "Екватор", м. Миколаїв), реалізація яких дозволяє значно розширити поле теплових навантажень типорозмірного ряду нагрівачів типу НПП-6,3...63. Як видно з рис. 10, тепловідвід з поверхні нагрівачів підвищується приблизно на 30 %.

Розроблені рекомендації включали значення оптимальних співвідношень витрат пари через ступені двоступінчастих ПНП. При цьому максимальний тепловідвід з поверхні ПНП досягався при витраті пари на перший ступінь, рівній 50...60 % сумарної.

Також були розроблені номограми для визначення параметрів теплоносія і повітря на виході з кожного ступеня двоступінчастих суднових нагрівачів типорозмірного ряду НПП-6,3...63. Одна з них (для НПП-40) наведена на рис. 11 у вигляді характеристик тепловідводу $Q = f(t_v)$. Для першого ступеня – це залежність $Q = f(t_{v2-1})$ при різних температурах повітря на вході (верхня половина рис.11, де t_{v2-1} – температура повітря на виході першого ступеня), а для другого ступеня – це залежність $Q = f(t_{v1-2})$, де t_{v1-2} – температура повітря на вході у другий ступінь (нижня половина рис.11). Причому $t_{v2-1} = t_{v1-2}$, а температура повітря на виході з ПНП приймалася рівною 20 °С. Пунктирні лінії, що перетинають графічні залежності $Q = f(t_v)$ при різних витратах повітря G_v , відповідають постійним паровмістам x_2 або температурам конденсату $t_{кт}$ на виході з ПНП, а суцільні лінії – витратам пари G_p . Розроблені номограми на відміну від відомих придатні і для нетрадиційних способів роботи суднових ПНП із неповною конденсацією пари.

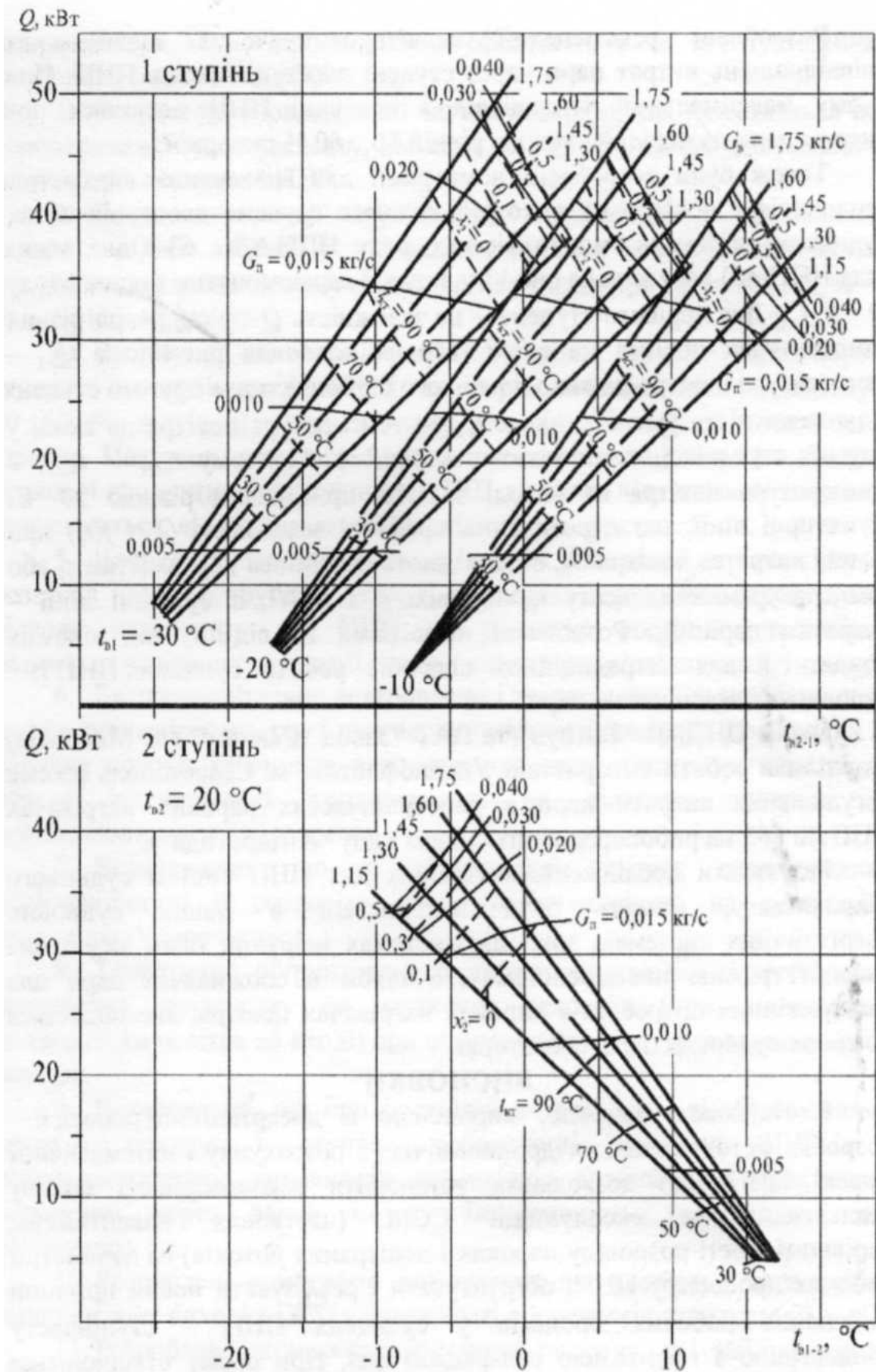


Рис. 11, Номограма для розрахунку теплогідродинамічних характеристик ступенів нагрівача НПП-40

Окрім ЦНДіПІ "Тайфун" та ВАТ "Завод "Екватор" (м. Миколаїв) результати роботи використані Укррибфлотом, м. Севастополь (схеми регулювання витрати пари в двоступінчастих парових нагрівачах НПП-40 і 63 на рибопереробних судах типу "Антарктида").

Результати досліджень, виконаних для ПНП систем судновою мікроклімату, можуть бути використані в інших суднових енергетичних системах, зокрема, системах інертних газів, осушення ізоляції трюмів, пневмосистемах, а також в споживачах пари для технологічних потреб та в парових нагрівачах повітря, яке подається до топок суднових парогенераторів.

ВИСНОВКИ

1. Науковою задачею, вирішеною в дисертаційній роботі, є розробка методики теплогідродинамічного розрахунку і математичної моделі ПНП, що дозволяють установити закономірності впливу реальних умов експлуатації ССМ (часткових навантажень, нерівномірності розподілу парових і повітряних потоків) на параметри робочих процесів у ПНП, обґрунтувати і реалізувати новий принцип здійснення робочих процесів у суднових ПНП - ступінчасту конденсацію з проміжною сепарацією фаз. При цьому створюються умови для стабільного відводу конденсату, що виключає імовірність його замерзання і втрату теплоти з пролітною парою, тобто підвищуються теплогідродинамічна ефективність та експлуатаційна надійність суднових ПНП.

2. Вперше встановлено, що частка поверхні, яка приходить на переохолодження конденсату, складає 20...40 % і обмежує сумарний тепловідвід з поверхні ПНП.

3. Встановлено, що ступінчаста конденсація з проміжною сепарацією пари забезпечує збільшення густини теплового потоку на 20...30 % при рівномірному розподілі пари і повітря та на 30...40 %-при нерівномірному.

4. Визначені оптимальні співвідношення витрат пари через ступені двоступінчастих ПНП із переохолодженням конденсату: 50...60 % сумарної витрати через перший, низькотемпературний, ступінь. Показано, що з підвищенням температури повітря на вході і теплової продуктивності суднових ПНП діапазон відхилень витрат, які допускаються, від оптимальних співвідношень зростає.

5. Вперше експериментальним шляхом виявлений нерівномірний розподіл пари по трубках, який є причиною порушення стабільного відводу конденсату від ПНП на режимах постійних теплових навантажень при експлуатації разом з конденсатовідвідниками.

6. Експериментально встановлено і теоретично обґрунтовано, що як при рівномірному, так і при нерівномірному розподілі повітряних і парових потоків причиною розшарування поля температур повітря є низька інтенсивність теплопередачі на ділянках поверхні з переохолодженням конденсатом.

7. Встановлено, що зі збільшенням витрат пари вплив нерівномірності її розподілу по трубках нагрівача на сумарний тепловідвід скорочується.

8. Теоретично обгрунтоване й експериментально підтверджене замерзання конденсату на часткових режимах (при підвищенні температури повітря на вході) при від'ємних температурах зовнішнього повітря.

9. Встановлено, що при постійній витраті пари зі збільшенням витрати повітря і ступеня ребристості поверхні ПНП із переохолодженням конденсату тепловідвід залишається практично незмінним через вкрай низьку інтенсивність тепловіддачі до конденсату.

10. Розроблені номограми для визначення витрати і параметрів теплоносія на виході з ПНП у залежності від режимів експлуатації.

11. Розроблені схемно-конструктивні рішення, які забезпечують енергетично ефективну та надійну роботу ПНП при низьких температурах зовнішнього повітря і на часткових режимах.

Обгрунтовані і розроблені ефективні способи регулювання подачі пари до двоступінчастого ПНП у всьому діапазоні режимів експлуатації.

12. Результати роботи можуть бути використані в інших суднових енергетичних системах, зокрема, системах інертних газів, осушення ізоляції трюмів, пневмосистемах, а також в споживачах пари для технологічних потреб та в парових нагрівачах повітря, яке подається до топків суднових парогенераторів.

Основні результати дисертації опубліковані в наукових спеціалізованих виданнях:

1. Скородумов А.П., Радченко Н.И. Повышение безопасности эксплуатации паровых нагревателей воздуха судовых систем кондиционирования // 36. наук, праць УДМТУ. - Миколаїв: УДМТУ. - 2002. - № 1(379). - С.61-67.

2. Радченко Н.И., Скородумов А.П. Исследование влияния неравномерности воздушных потоков на тепловую эффективность паровых нагревателей судовых систем кондиционирования // Холодильная техника и технология. - 2000. - Вып. 66. - С. 66 - 70.

3. Скородумов А.П. Экспериментальное исследование паровых нагревателей воздуха судовых систем кондиционирования // 36. наук, праць УДМТУ. - Миколаїв: УДМТУ. -2001. -№ 6(378). -С. 95- 101.

4. Радченко Н.И., Скородумов А.П., Бойчук В.В., Сирота А.А. Концепция пароснабжения технологических потребителей // Новости теплоснабжения. - 2001. - №11(15). - С. 20 - 23.

5. Радченко Н.И., Скородумов А.П. Пути повышения тепловой эффективности паровых нагревателей воздуха систем кондиционирования // Вестник Международной академии холода.- С.Петербург. Москва - 2002. - Вып. 1. - С. 10-12.

6. Скородумов А.П. Математическая модель паровых нагревателей воздуха систем судового микроклимата // 36. наук, праць УДМТУ. - Миколаїв: УДМТУ. - 2002. - №2 (380). - С. 150-158.

7. Radchenko A.N., Skorodumov A.P. Calculation of heat transfer during cooling the motor of hermetic refrigeration compressor // Fifth International Conference on Unconventional Electromechanical and Electrical systems-Poland - 2001 - P. 511-514.

8. Радченко Н.И., Скородумов А.П. К расчету теплоотдачи при конденсации водяного пара внутри труб // Проблемы энергосбережения и экологии в судостроении: Тезисы докладов 2-й международной науч.-техн. конф. - Николаев: УГМТУ. - 1998. - С. 35.

Особистий внесок здобувача в роботи, опубліковані у співавторстві: [1] - аналіз умов безпечної експлуатації систем мікроклімату суден необмеженого і льодового районів плавання та

вирішення задачі усунення замерзання конденсату; [2] - двовірна постановка та вирішення задачі дослідження впливу нерівномірних повітряних потоків на теплову ефективність ПНП, розробка методики, програми теплового розрахунку і математичної моделі ПНП з урахуванням переохолодження конденсату; [4, 5] - результати аналізу причин низької ефективності ПНП та пароконденсатних систем, розробка раціональних схемних рішень; [7] - методика теплогідродинамічних розрахунків двофазових потоків; [8] - аналіз впливу переохолодження конденсату на теплопередачу у ПНП.

АНОТАЦІЯ

Скородумов О.П. Підвищення теплогідродинамічної ефективності парових нагрівачів повітря систем суднового мікроклімату. - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.08.05 - суднові енергетичні установки. -Український державний морський технічний університет імені адмірала Макарова, Миколаїв, 2002.

Дисертація присвячена підвищенню енергетичної ефективності і безпеки експлуатації систем суднового мікроклімату шляхом теплогідродинамічного удосконалення парових нагрівачів повітря. Встановлені закономірності впливу часткових теплових навантажень і нерівномірного розподілу пари та повітря на параметри робочих процесів нагрівачів. Воші були покладені у основу нового принципу реалізації робочих процесів - ступінчастої конденсації. Встановлено, що ступінчаста конденсація з проміжною сепарацією пари забезпечує збільшення густини теплового потоку на 20...30 % при рівномірному розподілі пари і повітря та на 30...40 % - при нерівномірному їх розподілі. При цьому імовірність замерзання конденсату виключається повністю. Розроблені схемні рішення, які реалізують запропонований принцип роботи парових нагрівачів повітря.

Ключові слова: суднова енергетична установка, система суднового мікроклімату, паровий нагрівач повітря, ступінчаста конденсація, сепарація пари.

АННОТАЦИЯ

Скородумов А.П. Повышение теплогидродинамической эффективности паровых нагревателей воздуха систем судового микроклимата. - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.08.05 - судовые энергетические установки. -

Украинский государственный морской технический университет имени адмирала Макарова, Николаев, 2002.

Диссертация посвящена повышению энергетической эффективности и безопасности эксплуатации систем судового микроклимата (ССМ) путем теплогидродинамического совершенствования паровых нагревателей воздуха (ПНВ). Нагреватели являются основным элементом, обеспечивающим термообработку воздуха и работу ССМ в осенне-зимний период и при плавании в северных и южных широтах. Теплогидродинамическое совершенство ПНВ определяет энергетическую эффективность и эксплуатационную надежность ССМ в целом. Опыт эксплуатации ССМ на судах неограниченного и ледового районов плавания показывает, что в 50 % случаев выхода из строя ПНВ причиной является замерзание конденсата в трубках на частичных нагрузках при отрицательной температуре воздуха на входе. Задача усложняется неравномерным распределением паровых и воздушных потоков.

Низкая эффективность существующих технических решений обусловлена тем, что в их основе лежат теоретические предпосылки, согласно которым теплогидродинамическое совершенство ПНВ определяется только наружным теплообменом. В то же время практика эксплуатации свидетельствует о том, что низкие тепловая эффективность и эксплуатационная надежность судовых ПНВ связаны с процессами внутреннего теплообмена - на стороне теплоносителя. Невозможность разрешения проблем в эксплуатации с помощью существующих теоретических методов обусловила необходимость решения научной задачи разработки методики теплогидродинамического расчета и математической модели ПНВ, позволяющих установить закономерности влияния реальных условий эксплуатации ССМ (частичных нагрузок, неравномерности распределения паровых и воздушных потоков) на параметры рабочих процессов в ПНВ и проектировать теплогидродинамически совершенные судовые ПНВ.

Выполнен комплекс экспериментальных и теоретических исследований, в результате которых было установлено, что доля поверхности, приходящейся на переохлаждение конденсата, составляет 20...40 % и ограничивает суммарные тепловые потоки в ПНВ, а низкая интенсивность теплоотдачи к конденсату вызывает расслоение поля температур воздуха. Неравномерное же распределение пара по трубкам

ПНВ является причиной нестабильного отвода конденсата и опасности его замерзания при отрицательных температурах воздуха на входе. В результате был предложен новый принцип работы ПНВ - ступенчатая конденсация с промежуточной сепарацией пара. Показано, что работа нагревателей по указанному способу обеспечивает приращение плотности теплового потока на 20...30 % при равномерном распределении пара и воздуха и на 30...40 % - при неравномерном. Установлены оптимальные значения соотношения расходов пара между ступенями двухступенчатых ПНВ. Разработаны номограммы для определения параметров ПНВ в зависимости от режимов их эксплуатации. Предложены схемно-конструктивные решения, обеспечивающие надежную и энергетически эффективную работу ПНВ при низких температурах наружного воздуха и на частичных режимах. Основные результаты работы использованы организациями, проектирующими, изготавливающими и эксплуатирующими судовые ПНВ. Результаты работы могут быть также использованы в других судовых энергетических системах, в частности, системах инертных газов, осушения изоляции трюмов, пневмосистемах, а также в потребителях пара для технологических нужд и в паровых нагревателях воздуха, подаваемого в топку судовых парогенераторов.

Ключевые слова: судовая энергетическая установка, система судового микроклимата, паровой нагреватель воздуха, ступенчатая конденсация, сепарация пара.

SUMMARY

Skorodumov A.P. Increasing the heat-hydrodynamic efficiency of steam air heaters for ship microclimate systems. - Manuscript.

The dissertation for the scientific degree of the candidate of technical sciences on speciality 05.08.05 - marine power plants - Ukrainian State Maritime Technical University named after admiral Makarov, Mikolayiv, 2002.

The dissertation is devoted to increasing the energetic efficiency and working safety of ship microclimate systems by heat-hydrodynamic improving the steam air heaters. The regularities for influence of partial heat loadings and non-equal steam and air distribution upon working processes parameters of heaters have been settled. These were put into the base of new principle of working processes realization - step condensation. Increasing the heat flux in 20...30 % with equal steam and air distribution and in 30...40 % - with non-equal their distribution as a result of step condensation with intermediate steam separation was settled. With this the risk of condensate freezing is excluded entirely. The scheme decisions of proposed steam air heaters work principle have been developed.

Key words: marine power plant, ship microclimate system, steam air heater, step condensation, steam separation.