

УДК 681.518.5:681.586.5

DOI: 10.31653/1819-3293-2024-1-29-92-103

ARTICLE HISTORY

Received 13.09.2024

Accepted 27.09.2024

Сандлер Альберт Кирилович<sup>1</sup>, Веретеннік Олександр Михайлович<sup>2</sup>  
НУ "Одеська морська академія", Одеса, Україна  
sa@onma.edu.ua<sup>1</sup>, vamod@ukr.net<sup>2</sup>

## Технічне діагностування суднових холодильних установок на основі волоконно- оптичних технологій

Sandler Albert<sup>1</sup>, Veretennik Oleksandr<sup>2</sup>  
National University "Odessa Maritime Academy", Odessa, Ukraine  
sa@onma.edu.ua<sup>1</sup>, vamod@ukr.net<sup>2</sup>

### Technical diagnostics of ship refrigerators plants based on fiber-optic technologies

***Резюме.** Обґрунтовано схематехнічне рішення датчику контролю вологості хладонів, яке забезпечить інваріантність результатів вимірювання до неконтрольованих експлуатаційних факторів та достатньо великий експлуатаційний ресурс. У запропонованому датчику одночасно збережені надійність та простота схематехнічних рішень датчиків відомих типів. Розроблено математичний опис процесу перетворення оптичної потужності у датчику. Обґрунтовано застосування скла зі штучного сапфіру для виготовлення елементів датчику.*

***Summary.** A well-founded schematic solution of the sensor for controlling the humidity of refrigerators, which will ensure the invariance of the measurement results to uncontrolled operational factors and a sufficiently large operational resource. The proposed sensor simultaneously preserves the reliability and simplicity of circuit solutions of sensors of known types. A mathematical description of the optical power conversion process in the sensor has been developed. The use of artificial sapphire glass*

*for the manufacture of sensor elements is substantiated.*

Основна складність у створенні адекватної системи діагностування СХУ полягає у тому, що експлуатація установки характеризується нестабільністю. Це обумовлене характерними для морських суден факторами: флуктуація температури, тиску й вологості навколишнього середовища, змінні навантажувальні режими.

Одним з напрямків, що визначають підвищення якості та вірогідності інформаційних систем моніторингу й діагностування технічного стану СХУ, є інтелектуалізація процесів обробки діагностичної інформації на основі технології експертних систем. Системи такого типу дозволяють забезпечити підвищення якості розпізнавання технічного стану установки.

У цей час використовується й розробляється багато інформаційних систем, методів і засобів моніторингу й діагностування технічного стану СХУ. Разом з тим необхідна розробка нових технологій та засобів, які забезпечували б ефективне технічне обслуговування й ремонт холодильної техніки за реальним технічним станом.

Найбільш ефективною системою технічного обслуговування й ремонту СХУ в цей час є система з методами організації ремонту, що базуються на індивідуальному спостереженні зміни технічного стану в процесі експлуатації шляхом контролю й діагностики, проведених на постійній основі плинном тривалих періодів часу. Але, певним чином, розвиток згаданих систем стримується недосконалістю датчиків, які контролюють параметри СХУ.

У існуючих реаліях особливу актуальність здобуває розв'язок науково-технічного завдання створення засобів, здатних за результатами превентивного технічного діагностування виявляти порушення у роботі СХУ на ранніх стадіях розвитку й запобігати їхньому переходу в аварійні ситуації [1].

У СХУ змінюється агрегатний стан хладону в залежності від температури та тиску у замкнутій системі, де він циркулює. Для цього за допомогою компресора фреон низького тиску та температури (0,3 ... 0,5 МПа, 10 ... 20 °С) стискається до тиску 1,5 ... 2,5 МПа та його температура підвищується при цьому до 70 ... 90 °С. Проходячи через конденсатор, хладон охолоджується і переходить в рідкий стан під високим тиском і надходить до капілярної трубки, де він випаровується і переходить у газовий стан. Однією з вимог до системи, де циркулює хладон, є мінімальний рівень вологості останнього (не більше 12 мг/кг фреону). Не виконання такої вимоги призводить до виходу з ладу приладу, оскільки волога при замерзанні закупорює отвір

капіляра і не дає можливості фреону циркулювати у системі [2, 3]. Це вимагає здійснювати постійний контроль такого параметру як вологість хладону.

Відомий датчик вологості у вигляді індикаторної таблетки, яка розташована на стойці у корпусі. Для можливості огляду датчика у верхню частину корпусу вбудовано прозоре скло з переликом кольорів, які відповідають різним рівням вологості (рис. 1) [4].



Рис. 1. Датчик вологості хладону з індикаторною таблеткою

Основними недоліками його є достатньо велика похибка, оскільки оператор повинен провести порівняння кольору оптичного потоку відбитого від сенсора та таблиці вологості, необхідність зовнішнього освітлення, а також відсутність можливості мати електричний сигнал, який можливо використати в системах автоматизованого контролю роботи системи.

Також відомим є датчик, що містить корпус, у якому розташована відкрита оптопара, між елементами якої закріплений оптичний чутливий елемент з хлориду кобальту у вигляді пластини (рис. 2) [5].

Основними недоліками застосування відкритої оптопари у зоні низьких та наднизьких температур:

прискорене старіння та деградація характеристик напівпровідникових джерела та приймача випромінювання;

наявність відкритого оптичного каналу;

невеликий робочий ресурс;

неминуча зміна геометрії оптопари, характеристик оптичного каналу та вірогідності результатів вимірювання під впливом коливань температури хладону;

відсутність компенсації впливу неконтрольованих експлуатаційних факторів.

Слід зазначити, що неодноразові спроби виправити зазначені недоліки перелічених датчиків були невдалими.

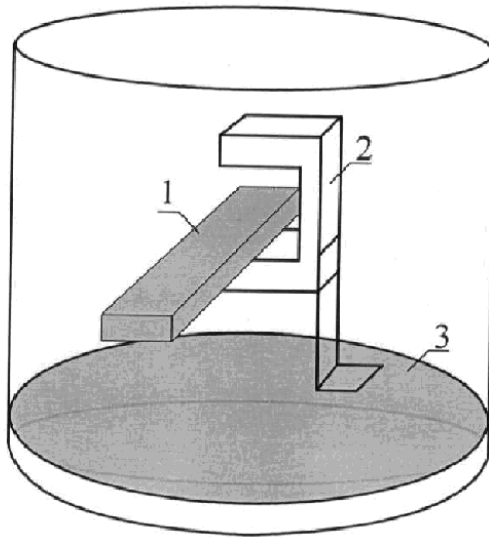


Рис. 2. Датчик вологості хладону з відкритою оптопарою:

- 1 – оптичний чутливий елемент з хлориду кобальту;  
2 – відкрита оптопара; 3 – корпус

Таким чином, науково-технічна задача створення датчику контролю вологості хладону, яка забезпечить достатню вирогідність результатів вимірювання, інваріантність результатів вимірювання до неконтрольованих експлуатаційних факторів та великий експлуатаційний ресурс є актуальною та доцільною.

Ціль роботи полягає у впровадженні новітніх засобів технічного діагностування для підвищення якості управління СХУ й надійності функціонування устаткування.

Об'єктом дослідження є процеси формування й перетворення діагностичного сигналу у засоби діагностики технічного стану СХУ.

Предметом дослідження є волоконно-оптичні засоби діагностування технічного стану робочої речовини СХУ.

Методи дослідження. Теоретична частина роботи виконана з використанням: а) системного аналізу – при визначенні структурних зв'язків між елементами засобу контролю параметрів робочої речовини та декомпозиції об'єкта дослідження; б) теорії оптичних хвилеводів –

при визначенні перетворення оптичної потужності у хвильовидній структурі "світловод-пластина"; в) математичного моделювання – при отриманні наближеної оцінки функціонування волоконно-оптичного датчика вологості хладону.

Пропонується вирішення поставленої задачі за рахунок впровадження нового волоконно-оптичного датчику (ВОД) контролю вологості хладону.

Основу датчику складають вимірювальні світловоди з сапфірового скла та термочутлива пластина з хлориду кобальту.

Суть схематичного рішення датчика пояснюється кресленням (рис. 3).

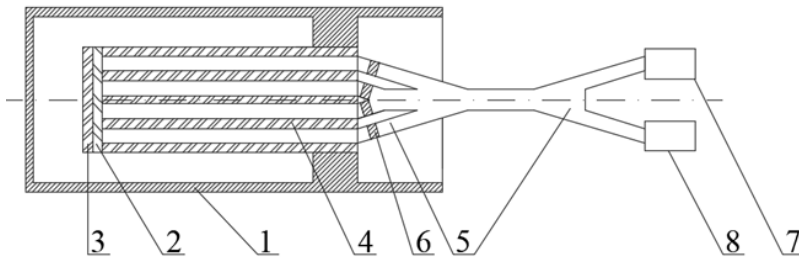


Рис. 3. Датчик контролю вологості хладону: 1 – корпус; 2 – пластина з хлориду кобальту; 3 – віддзеркалюючий шар; 4 – волоконно-оптичні світловоди; 5 – розгалужувач; 6 – оптичний фільтр; 7 – джерело оптичного випромінювання; 8 – приймач оптичного випромінювання

У корпусі 1 міститься розгалужувач 5, у відповідних гілках якого розташовані оптичні фільтри 6. Кожна гілка розгалужувача сполучена з волоконно-оптичним світловодом 4. Світловоди без зазору сполучені з пластиною з хлориду кобальту 2, зворотній бік якої має віддзеркалюючий шар 3. Оптичне випромінювання від джерела потрапляє через розгалужувачі до світловодів та пластини з хлориду кобальту.

Пройшовши крізь пластину випромінювання відбивається від віддзеркалюючого шару та повертається через світловоди та розгалужувачі до приймача випромінювання.

Випромінювання крізь розгалужувач та оптичні фільтри потрапляє до кожного світловода зі своєю власною довжиною хвилі. Після проходження світловодів випромінювання відбивається від

віддзеркалюючого шару та повертається до розгалужувача. При зміні температури хладону пластина з хлориду кобальту змінює свій колір та умови перетворення оптичної потужності у сполученні "світловод-пластина".

Сполучення "світловод-пластина" утворює складну оптичну хвилеводну структуру. Згідно з теорією, рішення рівнянь Максвелла дозволяють точно визначити хвилеводні характеристики такої структури. Однак рішення можна одержати лише чисельними методами, що вимагають значного обсягу обчислювальних робіт. Тому доцільним є застосування гауссового наближення, яке надає можливість одержати аналітичні вирази практично для всіх характеристик поширення хвилі в оптичному волокні (ОВ) з довільним профілем показника заломлення (ППЗ).

Перетворення гауссового пучка мод є гауссовим за формою, а перетворення однорідного пучка дає циліндричний аналог функції  $\sin x/x$ . Інтенсивність  $A^2(u)$  дифракційної структури однорідного пучка є майже гауссовою для значень  $ur_s$ , менших за першого нуля функції  $J_1(ur_s)$ .

У той же час, гауссовий пучок з радіусом серцевини  $\rho \approx 0,75ur_s$  має майже таку ж інтенсивність дифракційної структури, як однорідний пучок радіуса  $r_s$ . Функція  $A^2(u)$  є майже гауссовою для пучків різних згладжених профілів, проміжних між однорідним і гауссовим. Це означає, що результати й висновки, отримані для гауссового пучка, можуть бути з достатньою точністю застосовні для будь-яких ОВ з довільним ППЗ [6].

Якщо гауссовий пучок падає перпендикулярно торцю ОВ, то електричне поле при цьому має вигляд:

$$E_x = \exp\left(\frac{-r^2}{2\rho_s^2}\right),$$

де  $\rho_s$  – розмір плями пучка.

Таким чином,  $E_x$  не залежить від циліндричної координати  $\phi$ , що означає порушення тільки мод з індексом  $l = 0$  або  $HE_{1m}$  мод. Для основної моди, поляризованої уздовж поздовжньої осі ОВ,

$$\psi_0 = F_0 = \exp\left(\frac{-r^2}{2r_0^2}\right),$$

де  $r_0 = \rho / \sqrt{V}$  – розмір плями моди;  $\rho$  – радіус серцевини волокна;  $V$  – хвилеводний параметр.

Якщо прийняти що  $n_i = n_{co}$ , то частина потужності пучка, що поширюється в основній моді

$$\frac{P_0}{P_i} = \left( \frac{2\rho_s r_0}{\rho_s^2 + r_0^2} \right)^2, \quad (1)$$

де  $P_0$  – оптична потужність, що надійшла від джерела випромінювання;  $P_i$  – оптична потужність, що повернулася до фотоприймача.

Вираз (1) описує співвідношення оптичних потужностей при збудженні ОВ похилим пучком. У цьому випадку

$$\frac{P_0}{P_i} = \left( \frac{2\rho_s}{\rho_s^2} \right) \frac{\left[ \int_0^{\frac{\rho_s}{\rho}} F_l(R) J_l(kR) \exp\left(\frac{-R^2 \rho^2}{2\rho_s^2}\right) R dR \right]^2}{\int_0^\infty F_l^2(R) dR}. \quad (2)$$

Якщо при отриманні (2) гауссовий пучок замінити однорідним з радіусом  $\rho_s$ , одержимо аналогічне вираження для слабонапрямого ОВ зі східчастим ППЗ

$$\frac{P_0}{P_i} = \left( \frac{2\rho_s}{\rho_s^2} \right) \frac{\left[ \int_0^{\frac{\rho_s}{\rho}} F_l(R) J_l(kR) R dR \right]^2}{\int_0^\infty F_l^2(R) dR},$$

де  $k$  – хвильове число.

Розглянемо

$$\int_0^{\frac{\rho_s}{\rho}} F_l(R) J_l(kR) R dR = I_1.$$

Для  $\rho_s \geq \rho$

$$\begin{cases} F_l(R) = \frac{J_l(UR)}{J_l(U)}, \text{ для } 0 \leq R \leq 1, \\ F_l(R) = \frac{K_l(WR)}{K_l W} J_l(kR) R dR, \text{ для } 0 \leq R \leq \infty, \end{cases}$$

де  $U = \rho(k^2 n_{co}^2 - \beta^2)^{0.5}$  – параметр моди в серцевині;  $K_l, J_l$  – функції Бесселя.

Тоді

$$I_1 = \int_0^1 \frac{J_l(UR)}{J_l(U)J_l(kR)} R dR + \int_0^{\frac{\rho_s}{\rho}} \frac{K_l(WR)}{K_l(W)J_l(kR)} R dR = I_3 + I_4,$$

$$I_3 = J_l(U)^{-1} \int_0^1 J_l(UR)J_l(kR) R dR, \quad (3)$$

де  $W = \rho(\beta^2 - k^2 n_{cl}^2)^{0.5}$  – параметр моди в оболонці.

Скористаємося інтегралом від добутку функцій Бесселя [6], тоді (3) перетвориться до виду:

$$I_3 = \frac{kJ_l(U)J_{l-1}(k) - UJ_l(k)J_{l-1}(U)}{J_l(U)(U^2 - k^2)},$$

$$I_4 = \int_0^{\frac{\rho_s}{\rho}} \frac{K_l(WR)}{K_l(W)J_l(kR)} R dR.$$

Повторне застосування інтегралам від добутку функцій Бесселя [6] визначить  $I_4$  як

$$I_4 = \frac{(\rho_s k K_l(W_s) J_{l-1}(k_s) - W J_l(k_s) K_l(W_s)) - \rho(k K_l(W) J_{l-1}(k) - W J_l(k))}{K_l(W)(W^2 + k^2)\rho}.$$

Якщо повернутися до (1), то

$$\frac{P_1}{P_i} = \left( \frac{2\rho^2}{\rho_s^2} \right) \frac{[I_3 + I_4]^2}{I_2} = \frac{[I_3 + I_4]^2 4\rho^2 U^2 K_1^2(W)}{\rho_s^2 K_{l+1}(W) K_{l-1}(W)}. \quad (4)$$

Вираз (4) враховує найбільш загальний випадок порушення хвилеводу. Якщо розглядати співвісне розташування пучка й одномодового хвилеводу, то впливає, що буде порушена тільки  $HE_{11}$  – мода й  $\theta_i = k_s = k = 0$ . Прийняття цих обмежень приводить до перетворення (4) до вигляду, за умови  $\rho_s \geq \rho$ :

$$\frac{P_0}{P_i} = \left( \frac{2U}{VW_s} \right)^2 \left[ \left( \frac{V^2}{U^2} \right) - \left( \frac{\rho_s - K_1(W_s)}{\rho K_1(W)} \right) \right]. \quad (5)$$

Якщо припустити [6]  $r_0 = \rho(2 \ln V)^{-1}$ , то гауссове наближення дозволить модифікувати (5) та отримати вираз, що описує процес передачі оптичної потужності між ОВ та пластиною з хлориду кобальту:



$$\frac{P_0}{P_i} = \frac{(2 \ln V)(V-1)^2}{V^2}. \quad (6)$$

Графічна залежність (6) наведена на рис. 4.

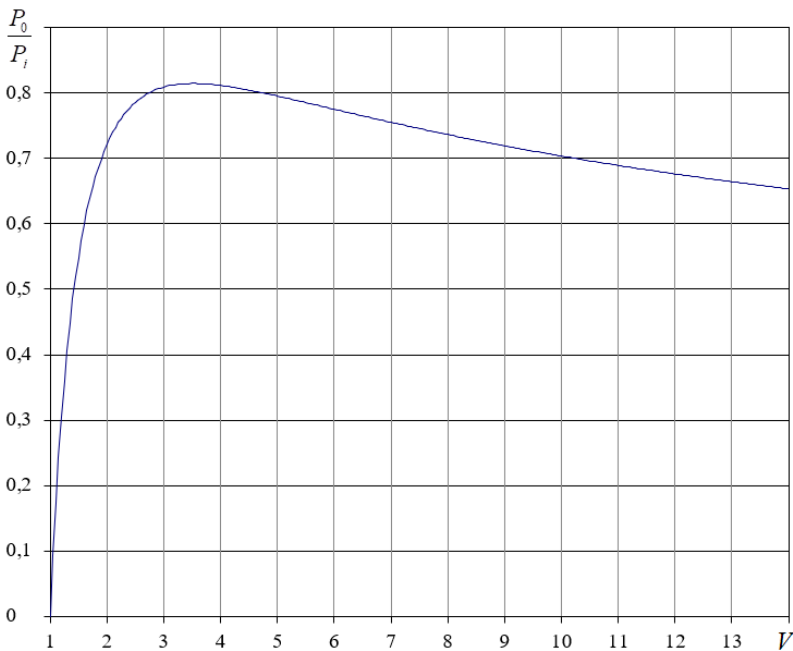


Рис. 4. Залежність частки оптичного випромінювання, що втрачається, від хвильового параметру

Аналіз залежності (рис. 4) свідчить про достатній для розв'язування задачі контролю вологості хладону робочій діапазон у одномодовому режимі роботи датчика та рівень чутливості.

Одномодовий режим обрано з міркувань виключення негативного впливу міжмодової дисперсії у ОВ. Міжмодова дисперсія значно обмежує інформаційну пропускну здатність усього вимірювального тракту й змушує використовувати низькоефективні світловипромінюючі діоди (СВД) як джерела випромінювання.

Крім того застосування корпусу та волоконно-оптичних світловодів зі штучного сапфіру, забезпечать:

інваріантність результатів вимірювання до неконтрольованих експлуатаційних факторів;

достатньо великий експлуатаційний ресурс;

можливість легкої заміни елементів та калібрування датчика взагалі.

Створення ВОД, на основі скла зі штучного сапфіру, дозволить отримати засіб вимірювання, який є інваріантним до неконтрольованих впливів дестабілізуючих факторів та має достатню чутливість до контрольованих параметрів. Застосування такого засобу сприятиме організації постійного та довготривалого контролю технічного стану робочих речовин СХУ.

Засіб вимірювання запропонованої конструкції має певні обмеження щодо свого застосування. Головне з таких обмежень відноситься до механічної стійкості. Тобто вологомір може забезпечити отримання вірогідної інформації в умовах коли не відбувається руйнація його елементів під впливом ударних навантажень. Враховуючи особливості компоновки та застосування ВОД можна зазначити, що найбільш вразливим елементом є волоконно-оптичні конектори зв'язку.

З оглядом на можливості, обмеження та недоліки, розвиток дослідження має полягати у:

подальшому вдосконаленні моделі ВОД, яка дозволить враховувати більше факторів, що впливають на можливість здійснювати безперервний моніторинг стану робочих речовин СХУ протягом тривалих термінів часу;

пошуках альтернативних скломатеріалів з більш досконаліми фізико-механічними властивостями для створення вимірювального засобу [7, 8];

оптимізації конструкції ВОД за критеріями довготривалої надійності та швидкодії [9, 10].

У відповідності до сформульованої задачі запропоновано нове схемотехнічне рішення ВОД. Завдяки завадостійкості до впливу експлуатаційних ДФ при здійсненні постійного та довготривалого діагностування та прогнозування технічного стану робочих речовин СХУ. На відміну від існуючих, запропонований ВОД спроможний підвищити точність вимірювання. Експлуатаційні показники датчика було експериментально підтверджено. Крім того, були проведені експериментальні випробування в діапазоні відносної вологості 20...60% для подальшої перевірки ефективності комбінації запропонованого засобу з аналогічними. Відхилення величини оптичної потужності за межами заданого статичного тиску незначне та

знаходиться в межах статистичної похибки. Такого результату вдалося досягнути за рахунок того, що запропонований ВОД має лінійну реакцію на зміну вологості контролюваного середовища.

Впровадження нового ВОД вологості хладону дозволить підвищити якості управління СХУ й надійність функціонування встаткування.

#### ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

1. Севергин, М. В. Автоматизированная система управления компрессорной холодильной установкой на основе диагностики режимов работы оборудования: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.07. / Санкт-Петербург. гос. тех. ин-т. – С-Пб., 1998. – 18 с.

2. Вассерман, А. А., Мальчевский, В. П. Термодинамические свойства смесей гидрофторуглеродов и природных хладагентов. – Одесса: Феникс, 2013. – 288 с.

3. Бабакин, Б. С., Бабакин, С. Б. Хладагенты и холодильные масла. – М.: ДеЛиплюс, 2017. – 390 с.

4. Danfoss SGN10s. URL:<https://www.danfoss.com/en/search/?Query=SGN10S&pageSize=NaN&filter=documentationLanguage%3Aen%2CdocumentationArchived%3Afalse>.

5. Патент України № 122365. МПК G01N25/56(2006.01). Датчик контролю вологості хладонів /А. В. Юдачов, Т. Г. Василенко. Заявник та володар патенту Запорізька державна інженерна академія. – u201703390. – заявл. 07.04.2017; опубл. 10.01.2018, бюл. №1. – 3 с.

6. Снайдер, А., Лав, Д. Теория оптических волноводов. – М.: Радио и связь, 1987. – 656 с.

7. Сандлер, А. К. Чувствительный элемент волоконно-оптического акселерометра на основе сапфирового стекла // IX міжнародна науково-методична конференція "Суднова електроінженерія, електроніка і автоматика", 05-06 листопада 2019 р.: матеріали конференції. – Одеса: НУ "ОМА". – 2019. – С. 27 – 33. [dx.doi.org/10.31653/2706-7874](https://doi.org/10.31653/2706-7874).

8. Сандлер, А. К. Застосування альтернативних скломатеріалів для датчиків деформації та вібрації елементів пропульсивного комплексу // Автоматизація суднових технічних засобів. – 2023. – Вып. 28. – Одесса: НУ "ОМА". – С. 79 – 89. DOI: [10.31653/1819-3293-2023-1-28-79-89](https://doi.org/10.31653/1819-3293-2023-1-28-79-89).

9. Sandler A. Fiber-optic inclinometer for diagnosing elements of the propulsion complex of autonomous vessels // Slovak international scientific journal. – 2023. – № 72. – VOL. 1. – P. 46 – 53. DOI: [10.5281/zenodo.8016986](https://doi.org/10.5281/zenodo.8016986).

10. Sandler A., Budashko V., Khniunin S., Bogach V. Improving the mathematical model of a fiber-optic inclinometer for vibration diagnostics of elements in the propulsion system with sliding bearings // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Applied physics. – 2023. – Vol. 5. – №. 5(125). – P. 24–31; DOI: 10.15587/1729-4061.2023.289773.

**Abstract.** *One of the directions that determine the improvement of the quality and reliability of information systems for monitoring and diagnosing the technical condition of ship refrigerating installations is the intellectualization of diagnostic information processing processes based on the technology of expert systems. Systems of this type make it possible to improve the quality of recognition of the technical condition of the installation. The most effective system of technical maintenance and repair of a ship's refrigerating installation at this time is a system with methods of organizing repairs based on individual observation of changes in the technical condition during operation through control and diagnostics carried out on a constant basis over long periods of time. But, in a certain way, the development of the mentioned systems is restrained by the imperfection of the sensors that control the parameters of the ship's refrigeration unit. The goal of the work is to introduce the latest technical diagnostic tools to improve the quality of the management of the ship's refrigerating installation and the reliability of the equipment's operation. The object of research is the processes of formation and transformation of a diagnostic signal in a means of diagnosing the technical condition of a ship's refrigeration unit. The subject of the study is fiber-optic means of diagnosing the technical condition of the working substance of a ship's refrigeration unit. It is proposed to solve the given problem due to the introduction of a new fiber-optic sensor to control the humidity of the refrigerant. The basis of the sensor consists of measuring optical fibers made of sapphire glass and a heat-sensitive plate made of cobalt chloride. The creation of a fiber-optic sensor based on artificial sapphire glass will allow obtaining a measuring tool that is invariant to the uncontrolled effects of destabilizing factors and has sufficient sensitivity to controlled parameters. The use of such a tool will contribute to the organization of permanent and long-term control of the technical condition of the working materials of the ship's refrigeration plant.*